Geo-Temas

Sociedad Geológica de España

Volumen 20



XI Congreso Geológico de España

ÁVILA
2-6 DE JULIO 2024
XI Congreso Geológico de España

CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas
IGME 175 AÑOS Instituto Geológico y Minero de España 1849-2024

Geo-Temas

Revista no periódica editada por la Sociedad Geológica de España

http://www.sociedadgeologica.org
Depósito legal: S.398-2012

ISSN: 1576-5172 (versión impresa)
2792-2308 (versión digital)

Geo-Temas es una publicación de carácter no periódico en la que se recogen los resúmenes cortos o extensos de las comunicaciones presentadas en los Congresos Geológicos que celebra cuatrienalmente la Sociedad Geológica de España, así como en otros congresos, jornadas y simposios de carácter científico y organizadas por las comisiones de la SGE u otras asociaciones mediante convenios específicos. Los organizadores de cada reunión son los responsables de la obtención de los fondos necesarios para cubrir en su totalidad los gastos de edición y difusión del correspondiente número de Geo-Temas. Al no constituir una publicación de carácter periódico, Geo-Temas es distribuida exclusivamente a los inscritos en los actos a los cuales va dirigida la edición, reservándose un cierto número de ejemplares para la distribución por parte de la SGE.
La SGE no se hace responsable de las opiniones vertidas por los autores de los artículos, siendo por tanto éstas responsabilidad exclusiva de los respectivos autores.
La propiedad intelectual queda a plena disposición del autor de acuerdo con las leyes vigentes. queda prohibida la reproducción total o parcial de textos e ilustraciones de esta revista con fines comerciales sin autorización escrita de la SGE o de los autores. Se permite sin necesidad de autorización la generación de separatas para uso de los autores y la reproducción con fines docentes.

EDITORA PRINCIPAL

Sonia García de Madinabeitia Martínez de Lizarduy
Departamento de Geología, Universidad del País Vasco UPV-EHU, 48940 Leioa, Bilbao (España)
Tel: +34 946 01 54 55; e-mail: sonia.gdm@ehu.eus

EDITORES ADJUNTOS

Nieves López González
Instituto Español de Oceanografía
Centro Oceanográfico de Málaga
e-mail: nieves.lopez@ieo.es

Alberto Pérez López
Dpto. de Estratigrafía y Paleontología
Facultad de Ciencias,
Universidad de Granada
e-mail: aperezl@ugr.es

Aitor Cambeses Torres
Dpto. de Mineralogía y Petrología
Facultad de Ciencias,
Universidad de Granada
e-mail: aitorc@ugr.es

COMITÉ ORGANIZADOR

Presidencia Honorífica: Mª del Pilar Mata Campo
Presidencia: Ana Ruiz Constán
José Francisco Mediato Arribas
Mercedes Reyes Castillo Carrión
Almudena de la Losa Román
Virginia Rodríguez Gómez

Eva Bellido Martín
César Husillos Rodríguez
MªTeresa López López
Raquel Martín Banda
Iván Martín Méndez
Isabel Reguera García

María Druet Vélez
Carlos Marín Lechado
Antonio Pedrera Parias
Ángel Enrique Salazar Rincón
Luís Carcavilla Urquí

COMITÉ CIENTÍFICO

Aitor Cambeses Torres
Alejandro Jiménez Bonilla
Alejandro Robador Moreno
Amelia Calonge García
Ana Lucía Vela
Ana Ruiz Constán
Ángeles Fernández González
Anna Gabàs Y Gasa
Antonio García Casco
Antonio González Ramón
Antonio Pedrera Parias
Blanca Martinez García
Carlos Marin Lechado
Carolina Canora Catalán
Carolina Guardiola Albert
Concepción Ayala Galán
Concepción Fernández Leyva
Dánae Sanz Pérez
Daniel Vázquez-Tarrío
David Brusi Belmonte
Desirée Palomino Cantero
Diana Moreno Martin
Diana Ponce De León Gil
Eduarzo González Clavijo
Eduardo Mayoral Alfaro
Elisabeth Díaz Losada
Enrique Álvarez Areces
Enrique Merino Martínez
Fernando Bohoyo Muñoz
Fidel Martín González
Francisco Javier López Moro
Gemma Ercilla Zárraga
Inés Galindo Jiménez
Inmaculada Expósito Ramos
Irene Novo Fernández
Irene Pérez Cáceres
Isabel Abad Martínez
Isabel Rábano Gutiérrez
Iván Martín Rojas
Javier Élez Villar
Javier Escuder Viruete
Javier Martínez Martínez
Jesús Francisco Jordá Pardo
Joaquín A. Proenza Fernández
Jorge Colmenar Lallena
Jorge Fernández Suárez
Jorge Navarro Commet
Jose F. Mediato Arribas
Jose Francisco Molina Palma
Juan Álvarez García
Juan Carlos García López Davalillo
Juan Cruz Larrasoaña Gorosquieta
Juan Tomás Vázquez Garrido
Manu Monge Ganuzas
Manuel Díaz Azpiroz
Manuela Chamizo Borreguero
Mª Carmen Feria Martín
Mª Carmen Fernández Puga
Mª José Sánchez García
Mª Pilar Mata Campo
Miquel Poyatos Moré
Nadia Herrero Martínez
Nemesio Heredia Carballo
Nieves Sánchez Jiménez
Pablo Calvín Ballester
Pablo G. Silva Barroso
Paola Infante Blasco
Patricia Ruano Roca
Pilar González Montero
Rafael Navarro Domínguez
Ramón Casillas Ruiz
Raquel Martín Banda
Rayco Marrero Días
Ricardo Arenas Martín
Ricardo León Buendía
Roger Urgeles Esclasans
Rosa Mediavilla López
Rubén Díez Fernández
Rubén Loma
Ruth Soto Marín
Santiago Ledesma Mateo
Sara Torres López
Sergio Martos Rosillo
Soledad García Gil
Sonia Sánchez Martínez
Susana Fernández Menéndez
Susana Mª Timón Sánchez
Tania Mochales López
Teresa Llorens González
Viola Bruschi
Xavier García Martínez

SEDE EDITORIAL

Sociedad Geológica de España:
Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced, s/n. 37008 Salamanca, España.
http://www.sociedadgeologica.org

Imagen de portada: Volcán de Tajogaite (La Palma, Islas Canarias).
Autor: Carlos Camuñas Palencia (IGME-CSIC)

Geo-Temas

Sociedad Geológica de España

ÁVILA
2-6 DE JULIO 2024

XI Congreso Geológico de España

Editores:

Ana Ruiz Constán
Carlos Marín Lechado
Antonio Pedrera Parias

Vol. 20 (2024)

Geo-Temas

Vol. 20 (2024)

ÍNDICE

XI CONGRESO GEOLÓGICO DE ESPAÑA. SESIONES

Geología Marina

Estudios de productividad y corrientes en el Mar interior de Maldivas (Océano Índico) basados en foraminíferos planctónicos. 45
M. Alonso-García, A. Cárdaba Bajo, M. Díaz Cenalmor, M. Herrero Simón, T. Rodrigues y D. Oliveira

Desarrollo de un USV para trabajos costeros. 46
B. Y. N. Benabdeloued, J. L. Ronda, J. E. Tent-Manclús, D. Bonomo y J. Alcántara-Carrió

Introducción a POSIT: una herramienta innovadora para la detección y caracterización integral de pockmarks en el fondo marino y otras geomorfologías. 47
A. Canari, S. Martínez-Loriente, E. Blázquez-Gómez y J.J. Alonso del Rosario

Formación de cyclic steps en ambientes confinados y no confinados del Cañón de Carchuna (Mar de Alborán) 48
J. Cerrillo-Escoriza, A. Micallef, F.J. Lobo, Á. Puga-Bernabéu, P. Bárcenas, I. Schulten, R. Durán, A. Carrión-Torrente, A. López-Quirós, M. Luján, O. Sánchez-Guillamón, M.J. Sánchez

Tectónica de los márgenes continentales de la Península Ibérica y de las llanuras abisales adyacentes 49
M. Druet, F. Bohoyo, A. Maestro, S. Mink, J. García-Senz, A. Pedrera, R. Rodríguez-Fernández

Identificación de potenciales almacenes geológicos en sedimentos marinos profundos: implicaciones en Geociencias de la Energía y en la Transición Energética (Proyecto ALGEMAR) 53
M. Druet, E. Llave, B. Benjumea and ALGEMAR Team (A. Arnáiz, L. Azevedo, H. Bedle, E. Berrezueta, F. Bohoyo, S. de Castro, D. Duarte, E. Ducassou, J. García-Crespo, J. García-Senz, J. García-Mayordomo, P. Fernández-Canteli, T. Feyzullayev, R. Flecker, C. Garrido, F. J. Hernández-Molina, S. Ledesma, P. Llanes, D. Lubo-Robles, A. Maestro, R. Martín-Banda, J. Martín-León, A.N. Martínez, H. Matías, J. F. Mediato, I. Munteanu, L. Ng, F. Pangaro, A. Pedrera, P. Pinto, A. Ramos, M. I. Reguera, M. Rodrigo, F.J. Rodríguez-Tovar, M. Rogerson, M. Ron, C. Roque, J. Tritlla, F.J. Sierro, A. Viana

Los márgenes entre las islas de Tenerife y Gran Canaria integrando observaciones sísmicas y del fondo marino: proyecto Guanche 56
F. Estrada, R. Bartolomé, R. Cabieces, D. Casas, M. Cubas, O. Sánchez-Guillamón, H. Latorre, A. Neri, D. Palomino, J.T. Vázquez y A. Villaseñor.

Estudio del impacto del fondeo de grandes buques en el sedimento y la fauna del fondo marino de la plataforma continental del golfo de Cádiz. 57
L.M. Fernández-Salas, M. García, P. Bárcenas, N. López-González, C. Farias, S. Román, Y. Vila y R. Jiménez-Romero.

Peligros geológicos en cascada: análisis de la Zona de Cizalla Bética-Alborán-Rif a través del proyecto BARACA 61
J. Galindo-Zaldívar, G. Ercilla y grupo BARACA

Inicio de la Corriente Circumpolar Antártica en el Paso del Drake: implicación de los eventos tectónicos y las variaciones sedimentarias 62
A. Gamisel-Muzás, C. Escutia, F. Bohoyo

Morfología y sedimentación en la plataforma continental y talud superior del noroeste de Galicia y su relación con los hábitats bentónicos 63
M. García, L.M. Fernández-Salas, I.P. Diez-García, J. Valeiras y I. Herraiz

Contourite stratigraphic models in the Alboran Sea: water flow regime variations of the light intermediate and dense deep Mediterranean water masses 67
G. Ercilla, B. Alonso, C. Juan, N. López-González, I. Cacho, G. Francés, D. Palomino, P. Bárcenas, M. Yenes, J. Nespereira, B. Ausín, P. Mata, D. Casas

Comparación geomorfológica de márgenes continentales ibéricos: interacción entre la tectónica y la sedimentación durante el Cuaternario 70
G. Ercilla, J. Galindo-Zaldívar, C. Juan, F. Estrada, J. Iglesias, J. Valencia, V. Tendero-Salmerón, E. d'Acremont, M.C. Fernández-Puga, L. González-Castillo, A. Madarieta-Txurruka, D. Palomino, M. Teixeira, J. T. Vázquez

Posibles escenarios geológicos para el Banco del Guadalquivir (Golfo de Cádiz, Portugal). 73
C.Giraldo Ceballos

Experimento GEOMARHIS: Estudio geofísico multi-escala de la tectónica oblicua, partición de la deformación y los peligros geológicos asociados en el margen sumergido del norte de La Española 77
J.L. Granja-Bruña, A. Muñoz-Martín, G. De Vicente, M. Gómez-Ballesteros, J. Martín-Dávila, J. Fiz, F.J. Martínez-Moreno, A. Rodríguez-Zurrunero, J.M. Gorosábel-Araus, M.A. De la Fuente-Oliver, M. Berriolópez, M. Druet, I. Díez-García, F. Fernández-Sáez, A. Olaiz, M. Rueda-Fort, A. Muñoz-Cemillán, V. Ory, C. Granado, M. Catalán, A. Carbó-Gorosabel

Reconstruyendo la dinámica superficial oceánica: Patrones de productividad de cocolitóforos durante la Terminación V en el Golfo de Cádiz. 78
M. González-Martín, J.A. Flores, M. Alonso-García, M. F. Sánchez-Goñi y G. Hes

Efectos de la dinámica sedimentaria y ambiental sobre las asociaciones de nanofósiles calcáreos en el Golfo de Cádiz durante el Plioceno temprano 79
L. Martín-García, F. J. Jiménez Espejo y J. A. Flores

Colecciones Geológicas Marinas de Referencia (CGMR-ICM) 80
C. Martín, G. Ercilla y F. Estrada

Explorando la complejidad tectónica y geomorfológica de una falla direccional submarina mediante datos de muy alta resolución y técnicas avanzadas de cartografía automatizada 82
S. Martínez-Loriente, R. Duran, H. Perea, J. Llopart, R. Urgelés, E. Gràcia

Revelando la actividad cuaternaria del sistema de falla de Yusuf (mar de Alborán) a través de análisis sísmicos multiescala. 83
H. Perea, S. Martínez-Loriente, A. Canari, R. Bartolome y E. Gràcia

Cambios de salinidad en la MOW durante los últimos 55 000 años reflejan ciclos de precesión en el balance hídrico del Mediterráneo 84
J. P. Tarruella, I. Cacho, A. Català, T.M. Béjard y F.J. Sierro

Anomalías magnéticas del Mar de Alborán: modelos 2-D e implicaciones geodinámicas 88
V. Tendero-Salmerón, J. Galindo-Zaldívar, E. d'Acremont, M. Catalán†, Y. M. Martos, A. Ammar, G. Ercilla

Evolución reciente del acantilado marino del Morro de Toix (Alicante, SE España). 89
J. E. Tent-Manclús, D. Bonomo, J. Alcántara-Carrió, y A. Estévez

Interacción entre montes submarinos y zonas de cizalla en el Sector Central del Mar de Alborán (Mediterráneo Occidental). 93
J.T. Vázquez, O. Sánchez-Guillamón, D. Palomino, A. García-Ledesma, P. Bárcenas, M. García, M. Sayago, J. Galindo-Zaldivar, A. Madarieta-Txurruka, F. Estrada, E. d'Acremont, G. Ercilla

Acomodación de la convergencia de placas en la Cuenca Occidental del Mar de Alborán y el Golfo de Cádiz 94
R. Vegas y J.T. Vázquez

Geología Sedimentaria

Yacimiento paleontológico de La Esfinge, Gran Canaria: nuevas contribuciones al conocimiento del paleoclima del Plioceno en las Canarias orientales, España 99
M. Almenara, J.F. Betancort, A. Lomoschitz, J. Meco

Carbonatos biogénicos (queras) en secuencias de loess-paleosuelos de la cuenca del Ebro: potenciales marcadores paleoambientales 100
D. Álvarez Morales, C.A. Torres-Guerrero, A. Travé, F. Preusser, J.M. Plata y R.M. PochHerrera y O. Oms

Producción carbonatada y condiciones redox registradas en una cuenca de retroarco de la Península Ibérica 101
J.J. Álvaro, S. Lorenzo, B. Martínez-Benítez, y A.P. Pieren

Los efectos de la transición del endorreismo al exorreísmo sobre la sucesión del Neógeno superior de la cuenca del Duero 102
I. Armenteros, P. Huerta, L. González-Acebrón, R. Martín-García, A. Rodríguez-Berriguete, A. Martín-Pérez, A. Košir

Análisis mediante ArcGIS Pro y ArGIS Online de los parámetros ambientales, dinámica de crecimiento carbonatado y respuesta hidrológica de la Cueva de Nerja (Málaga). 103
J.M. Arráez, C. Jiménez de Cisneros y C. Liñán-Baena

Reef building during the Thanetian (late Paleocene): facies architecture of some representative Pyrenean examples, N Spain 104
J.I. Baceta, G. Mateu-Vicens, S. Tomas and V.P. Wright

Caracterización 3D de heterogeneidades sedimentarias y su impacto en las propiedades de reservorio en areniscas fluviales amalgamadas: Formación Montllobar (Ypresiense, Cuenca de Tremp-Graus). 105
G. Bello, F. Tejedor, M. Poyatos-Moré, P. Cabello, A. van Yperen, J. Holbrook, I. Midkandal and O. Oms

Análisis Petrofísico de Elementos Arquitecturales – un enfoque basado en una base de datos 106
G. Bello, J. Howell y A. Hartley

El sistema deltaico de Sabiñánigo: un ejemplo de sistema marino-somero tectónicamente controlado con interacción de aporte sedimentario axial y transversal al orógeno (Cuenca de Jaca, Pirineos) 107
S. Boya, M. Poyatos-Moré, M. Roigé, D. Gómez-Gras, J. Fusté

Ciclicidad climática durante el Albiense medio – Cenomaniense temprano: desarrollo de paleosuelos de clima húmedo en sistemas deposicionales áridos. 108
C.A. Bueno-Cebollada, R. de la Horra, J.F. Barrenecheac, N. Meléndez, E. Barrón, M. Fregenal-Martínez

Episodios de cambio ambiental acelerado durante el Evento Anóxico Oceánico del Aptiense (OAE 1a) – registro de una cuenca pelágica en el Tethys occidental 109
J.M. Castro, C. Sequero, M.L. Quijano, G.A. de Gea, R. Aguado, B.D.A. Naafs y R.D. Pancost

Episodios de cambio ambiental acelerado en el Barremiense superior: registro geoquímico y paleontológico 110
G.A. de Gea, R. Aguado, M. Company, J. M. Castro, L. O'Dogherty, J. Sandoval, M.L. Quijano, C. Sequero, S. Froehner y M. Martinez

La estructura de la Hoya del Prado, Sierra de Javalambre, Teruel: Una caldera volcánica de colapso jurásica 114
C: de Santisteban Bové y A. Ramos Rodoño

Análisis icnológico y morfológico de la discontinuidad Messiniense-Plioceno en Los Colmenares (Cuenca del Bajo Segura, SE España) 118
D. Díez-Canseco, H. Corbí, J. Soria, L.A. Buatois y M.G. Mángano

La sucesión siliciclástico-carbonatada roja miocena en el área de Salamanca. 119
X. Domínguez Arce y I. Armenteros

Modelización físico-química de la precipitación de carbonatos pedogénicos en un suelo tipo Terra Rossa desarrollado sobre calizas 120
D. Domínguez-Villar, K. Krklec y K. Matan

Was the amplitude of continental thermal variations during glacial times similar to the one recorded in oceans? - Novel data from cave records in central Spain. 121
D. Domínguez-Villar, K. Krklec, R.L. Edwards, H. Cheng y F.J. Sierro

Caracterización de la Formación Areniscas de Castellón (Mioceno superior) en el Surco de Valencia. Implicaciones para el almacenamiento subterráneo de CO2 125
M. Gil-Ortiz, E. Gomez-Rivas, J. Alcalde, P. Cabello, G. Zamora

¿Cómo afecta la diagénesis al aspecto en campo de las areniscas? Implicaciones para la definición de unidades litoestratigráficas 126
L. González-Acebrón, S. Campos-Soto, M.I. Benito, I.E. Quijada y P. Suarez-Gonzalez

Nota sobre las peculiaridades estratigráficas del Muschelkalk en el sector de La Vall d´Uixó (Sierra del Espadán, Cordillera Ibérica) 127
P. P. Hernaiz Huerta

El registro sedimentario de la laguna de Caballo Alba (Segovia) 131
P. Huerta, I. Armenteros, C. Recio, A. Rodríguez-Berriguete, R. Martín-García. P. Carrasco J. Carrasco

Secuencias lacustres de alta frecuencia en la formación cretácica de El Castellar (subcuenca de Galve) y su caracterización temporal 132
N. Illueca, A. R. Soria y C. L. Liesa

Caracterización mineralógica y geoquímica de los suelos externos de la Gruta de las Maravillas. Datos preliminares de la dinámica de crecimiento carbonatado actual y respuesta hidrológica de la cueva. 133
C. Jiménez de Cisneros, A. González-Ramón, M. López-Chicano, A. Peña, F.J. Jiménez -Espejo y W. Martín-Rosales

Calcium carbonate biomineralisation in plant roots: outstanding examples from Marina Baixa, Alacant 134
A. Košir and A. Martín-Pérez

Reconstrucción paleoambiental de una plataforma carbonatada-siliciclástica mixta del Cenomaniense-Coniaciense de los Pirineos (margen norte del Macizo de Bortziriak – Cinco Villas).....135
M. Ladrón de Guevara, A. Bodego, A. Aranburu, L. Damas Mollá, J.A. Uriarte, L. Troya, S. Alcorta, J.M. Iturralde, E. Iriarte y I. Antigüedad

Arquitectura de facies de la sucesión lacustre-palustre de Peña Adrián (Mioceno Superior, Cuenca Miranda-Trebiño, NE Iberia). 136
Z. Larena, X. Murelaga, C. Arenas y J.I. Baceta

Relación entre los Conglomerados de Sant Miquel de Montclar (Eoceno, margen SE de la cuenca del Ebro) y las unidades estratigráficas adyacentes.....138
M. López-Blanco, N. Carrera, P. Arbués, E. Beamud, M. Garcés, M.A. Marín, Ll. Cabrera, E. Roca, O. Ferrer, O. Gratacos

The Middle Eocene Climatic Optimum (MECO) in the South-Pyrenean Foreland Basin (NE Spain): Stratigraphic record and effects in a Source to Sink transect. 139
M. López-Blanco, M. Garcés, L. Valero, E. Beamud, P. Arbués, A. Vinyoles, R. Silva-Casal

Quimioestratigrafía (isótopos de Re-Os) y cicloestratigrafía del Sondeo del Cau (SE España) – el OAE 1a - Aptiense – Tethys Occidental 143
R. Martínez-Rodríguez, S. Batenburg, D. Selby, J. M. Castro, G. A. de Gea, L. M. Nieto, P. A. Ruiz-Ortiz, S. Robertson

Impacto del guano de murciélago sobre carbonato espeleotémico: nuevos datos experimentales.....144
R. Martínez-Rodríguez, M.B. Muñoz-García, A. Molero, X. Arroyo, J. Martín-Chivelet, y A.I. Ortega

Relaciones entre subsidencia, sedimentación y edafogénesis en el Plioceno de la Cuenca de Madrid (Colmenar de Oreja, SE Madrid).....145
R. Martín-García, L. González-Acebrón, A. Rodríguez-Berriguete, A. Martín-Pérez, A. Košir I. Armenteros, P. Huerta.

Paleocauce del Mijares. Posible almacén geológico offshore en la plataforma marina de Castellón.....146
J. F. Mediato, J. García-Crespo, P. Fernández-Canteli, I. Moreno-González, E. Berrezueta

Evaluación de las facies Buntsandstein para Almacenamiento geológico de CO2 en la Cuenca del Ebro. 147
J. F. Mediato, J. García-Crespo, R. de la Horra, P. Fernández-Canteli, J. Martínez-Martínez, I. Moreno-González, D. Marcos, M. Rueda, E. Berrezueta D. García-Fernández

Silicificación de madera en el Estefaniense superior del Pirineo suroriental.....148
E. Onetti, I. Cantarero, A. Tosal, C. Martín-Closas y A. Travé

Cambios ambientales registrados en sedimentos del océano profundo del Noroeste del Atlántico asociados al incremento de icebergs de los últimos 50 años.....149
I. Pérez-Rodríguez, E. Papachristopoulou, C. Orejas, J. Wharton y D. Thornalley

La superficie de rubefacción asociada a la discordancia angular intra Ediacárica en el límite meridional de la actual Zona Centro Ibérica.....150
A. P. Pieren, M. Rodríguez-Martínez, S. López Andrés

Naturaleza del basamento y fisiografía de cuenca como factores de control en la variabilidad sedimentaria y petrológica de areniscas marino-someras transgresivas (Eoceno superior, Cuenca del Ebro).....151
M. Poyatos-Moré, D. Gómez-Gras, J. Fusté, O. Fité, M. Rambla, N. Guerrero, M. Díaz, X. Solé y C. Puigdefàbregas

Análisis estratigráfico de una sucesión mixta clástica-carbonatada en una cuenca Paleógena controlada por la tectónica (Este de Omán).....152
M. Poyatos-Moré, I. Midtkandal, V. Vicedo, R. Robles-Salcedo, P.T. Osmundsen and A. Braathen

Caracterización de diques clásticos en la Formación Allen (Cretácico Superior) de la Cuenca Neuquina (Argentina).....153
M. Pozo, T. Musso, G. Pettinari, M. Hernández, y A. Martínez

Resedimentación en taludes carbonatos en un contexto tectónicamente activo (Prebético Mioceno, Cordillera Bética, S España).....154
Á. Puga-Bernabéu, T. Alberjón-Peñas, S. García-Pozo, J. Aguirre, J.C. Braga

Modelos deposicionales de estrechos dominados por mareas en la Cordillera Bética.....155
Á. Puga-Bernabéu, F. Sola y J.C. Braga

La actividad paleosísmica del yacimiento de las Hoyas, Cretácico Inferior (Cuenca, España) 156
M.A. Rodríguez-Pascua, J.F. Medianto, A.D. Buscalioni, J. Marugán Lobón

Procedencia y evolución de los sistemas sedimentarios en el extremo oeste de la cuenca de Jaca-Pamplona (Eoceno medio-Mioceno inferior).....157
M. Roigé, X. Coll, D. Gómez-Gras, A. Teixell, D. Stockli, S. Boya, M. Poyatos-Moré y J. Fusté

Caracterización, evolución e interacción de áreas fuente en la cuenca de Tremp-Graus durante el Eoceno inferior (Pirineos) 158
M. Roigé, D. Gómez-Gras, J. Fusté, M. Poyatos-Moré, S. Boya, C. Puigdefàbregas y A. Teixell

Análisis de las facies deltaicas del complejo del Sant Llorenç del Munt (Eoceno, cuenca del Ebro, NE de España) como análogos para el almacén de CO2 e H2 verde: resultados preliminares 159
E. Rua-Alkain, M. Douet, L.M. Yeste, M. López-Blanco, C. Viseras y P. Cabello

Análisis de las condiciones paleoambientales en los yacimientos de huevos de dinosaurio del las Sierras Exteriores 160
C. Sanz-Ascaso, B. Bauluz, M. Moreno-Azanza y L. Ezquerro

Corredores marinos en el Jurásico: comparación de registros sedimentarios en EEUU y la Ibérica 161
C. Sequero, L. Ezquerro, R. Coimbra, E. Puértolas-Pascual, S. Riechelmann, R. Hoffmann, M. Moreno-Azanza

Composición isotópica del agua de cristalización de yesos Messinienses del promontorio Balear y su relación con la Cuenca de Sorbas..... 162
N. Sierra-Ramírez, J. Tur-Piedra, E. Gomez-Rivas, J. García-Veigas, E. Playà y L. Gibert

δ18O del agua de precipitación en la Península Ibérica: Machine Learning aplicado a la calibración climática de registros paleoisotópicos 165
A. Stachnik, J. Martín-Chivelet, y M. Morellón

Estratigrafía del Eoceno Prebético: edad, evolución y organización en ciclos. 166
J. E. Tent-Manclús, M. Martín-Martín, C. Miclăuș, J. Tosquella, F. Serrano y J.A. Martín-Pérez

Análisis sedimentológico y petrofísico multiescalar de un sistema mixto carbonato-clástico eoceno (Cuenca de Àger, Pirineos Meridionales, España) 167
S. Tomás, R. Mercedes-Martín, M. Poyatos-Moré, S. Maerz, A. Zhalgasbayeva, M. Ortega, J. Fischer, E. H. Herrera y O. Oms

La influencia de los procesos marinos en la arquitectura fluvial de las formaciones Montllobar y Castigaleu (Ypresiense, Pirineos)..... 168
A. Toribio, A. van Yperen, M. Poyatos-Moré, J. Fusté, D. Gómez-Gras, E. López, V. Moreno, I. Midtkandal, J. Holbrook, O. Oms

Sedimentología de un sistema aluvial-lacustre con microbialitas en la cuenca de Montalbán (Cretácico Superior, NE Spain) 169
D. Torromé, M. Aurell, A. Martín-Pérez y A. Košir

Geometría y Heterogeneidad de un Análogo Aflorante Fluvial de alta sinuosidad: Perspectivas desde la Formación Capella (Eoceno, Cuenca de Graus-Tremp)..... 170
L.M. Yeste, J.L. Cuevas, M. Gil-Ortiz, Miguel López-Blanco, P. Cabello y C. Viseras

Paleomagnetismo

Cronología de los sedimentos del Eoceno-Oligoceno del frente oriental del antepaís pirenaico: implicaciones paleogeográficas y ambientales. 171
E. Beamud, L. Valero, O. Gratacós, C. Peigney, P. Santolaria, A. Sáez, J.A. Muñoz, E. Roca

Análisis de series temporales de datos magnéticos de sedimentos en el Mediterráneo Occidental: importantes ciclicidades paleoambientales durante la última glaciación..... 172
S. Beltrán de Heredia García-Nieto, V. Villasante Marcos, F. Martínez Ruiz, S. Casanova Arenillas, F. J. Rodríguez Tovar

Análisis magnético del tránsito Paleoceno/Eoceno en una secuencia sedimentaria continental (Formaciones Esplugafreda y Claret, cuenca Tremp-Graus, Pirineos)..... 173
M.F. Bógalo, D. S. C. Vieira, S. Kele, A. Payros, J.J. Villalaín, E. Vernet, P. Calvín, G. Újvári

Propiedades magnéticas a lo largo de la serie turbidítica remagnetizada de la Cuenca de Jaca..... 174
P. Calvín, E.L. Pueyo, R. Egli, E. Izquierdo-Llavall, P. Sierra-Campos, P. Mata, J.C. Larrasoaña

Resultados paleomagnéticos y de paleointensidad en una secuencia de coladas basálticas del Cáucaso Menor 175
M. Calvo Rathert, E. M. Sánchez Moreno, E. Herrero-Bervera, G. Vashakidze, J. Morales Contreras, N. Pérez-Rodríguez, A. Goguitchaichvili, J. Solé Viñas

Registro arqueomagnético de baldosas de viviendas afectadas por la erupción de 2021 del volcán Tajogaite (La Palma, Canarias)..... 179
Á. Carrancho, M. Calvo-Rathert, J. Mª. Parés, V. Soler, E. Vernet, Mª. F. Bógalo y E. M. Sánchez-Moreno

Aplicación de la prospección magnética al estudio de la ciclidad en series verticales: ejemplos de las cuencas del Ebro y Cameros..... 180
A. Casas, L. Arlegui, B. Oliva, T. Román y C. Liesa

Las fábricas magnéticas como marcadores de la evolución de la microplaca Ibérica durante el Cretácico y Cenozoico. 181
A. Casas, B. Oliva, M. Marcén, P. Calvín, L. A. Pérez-Valera, L. Yenes, S. Torres, V. C. Ruiz, T. Mochales, A. Simón, J. J. Villalaín, M. F. Bogalo y T. Román

Exploring Reversed Zoning through Magnetic Fabric: A Case Study of the Castelo Branco Pluton (Central Portugal)..... 182
C. Cruz, I.M.H.R. Antunes, F. Noronha y H. Sant'Ovaia

Resultados arqueomagnéticos preliminares del Nivel R del Abric Romaní (Capellades, Barcelona).....186
J. del Río, A. Palencia Ortas, M. Gómez-Paccard, Á. Carrancho, J. Vallverdú, P. Saladié, M. G. Chacón Navarro, E. Carbonell i Roura

La susceptibilidad magnética y su utilidad como proxy climático en sedimentos remagnetizados: El caso de la Cuenca de Cameros 188
C.L. Liesa, A.M. Casas, L.E. Arlegui, N. Illueca, A. Luzón y A.R. Soria

El efecto del calentamiento en la anisotropía magnética: potenciando o revelando sub-fábricas ocultas 189
M. Marcén, J.J Villalaín

Evaluación de la susceptibilidad magnética en suelos afectados por incendios rurales en la Serra da Estrela (Centro de Portugal) 190
V. Martins, J. Ribeiro, C. Cruz, C. Mansilha y J.E. Marques

Magnetic Susceptibility and Parameter B: A Comprehensive Analysis for the Classification of Two-Mica Granites 191
A. Mota, H. Sant'Ovaia y F. Noronha

Deformación a partir de la fábrica magnética en la Fm. Utrillas de la Cordillera Cantábrica.....194
B. Oliva Urcia, A. Casas, T. Román Berdiel, J. J. Villaín y S. Torres López

Avances en la magnetoestratigrafía y cicloestratigrafía de los sedimentos de la Formación Baza (Granada) 195
J.M. Parés, A. Santamaría Barragán, S. Colino García, D. Anastasio, C. Berti, A. Churruca Clemente, T. Fujioka, S. Pla Pueyo, C. Viseras, J.M., Jiménez y M. Duval

Rotaciones de eje vertical en el arco de Cazorla-Alcaraz (Béticas Orientales, SE España).....196
L.A. Pérez-Valera, M. Sánchez-Gómez, F. Pérez-Valera y J. Villalaín

El registro continental del evento Porcupine.....198
E. L. Pueyo, L. Otaño, R. Silva-Casal, P. Calvín, C. Laplana, M. A. Galindo-Pellicena, M. Duval, M. P. Mata, J. M. Parés y A. Muñoz

Kmax y Kmin. ¿y tú de quién eres? 199
Ó. Pueyo Anchuela, A. Gil Imaz y A. Pocoví Juan

Reconstrucción paleogeográfica y de condiciones de sedimentación de la capa de oolitos ferruginosos de Arroyofrío por ASM (Calloviense-Oxfordiense).....200
Ó. Pueyo Anchuela, J. Ramajo Cordero, A. Gil Imaz, M. Aurell Cardona y G. Meléndez

Registro de la actividad extensional y compresiva en las fábricas magnéticas del sector occidental de la Cuenca de Cameros.....201
T. Román-Berdiel, B. Oliva-Urcia, S. Torres, L. Yenes, J.J. Villalaín y A. Casas-Sainz

Investigando los portadores magnéticos del relleno sedimentario de Gran Dolina, Atapuerca (España).....202
I. Romo-Díez, J.M. Parés, M. Duval, M. Mosquera y A. Ollé

Estudio de la fábrica magnética de las vulcanitas del Albiense – Santoniense del Sinclinorio de Bizkaia (Cuenca Vasco-Cantábrica).....203
V. Ruiz González, F. Martín-Hernández, y D. Muñoz-López

Registro paleomagnético en un espeleotema de Cueva Mayor (Atapuerca) con contribución de hollín en sus láminas.....204
E. M. Sánchez-Moreno, E. Iriarte, E. Font, Á. Carrancho, M. Calvo-Rathert y M-F. Bógalo

Anisotropy of Magnetic Susceptibility in Iberian Variscan orogen granites: implications for magmatism and tectonics 205
H. Sant'Ovaia, C. Cruz, A. Gonçalves, P. Nogueira y F. Noronha

Fábricas magnéticas en las rocas volcánicas del Pérmico de la cuenca de Anayet (Pirineos Centrales).....207
A. Simón-Muzás, R. Soto, J. Gisbert, M. Macouin, S. Rousse y A. M. Casas-Sainz

Estudio preliminar de la contaminación ambiental en el campus de la UAM a partir de las propiedades magnéticas de hojas de árboles.....208
S. Torres-López, M.F. Bógalo, B. Jimenez Ruiz-Ruano y L. Trigos Luque

Variación del campo magnético terrestre desde el Pleistoceno superior al Holoceno en La Palma, Islas Canarias: registro del vector completo en coladas de lava.....209
E. Vernet, M. Calvo-Rathert, Á. Carrancho, Y. Yamamoto, J. M. Parés y V. Soler

Nuevos resultados paleomagnéticos mesozoicos en la Placa Ibérica y sus implicaciones en relación con su rotación durante el Cretácico.....210
L. Yenes, P. Calvín, J. J. Villalaín, M. Marcén, A. M. Casas, S. Torres, L. A. Pérez-Varela, B. Oliva-Urcia, T. Román-Berdiel, T. Mochales, M. F. Bógalo y V. C. Ruiz-Martínez

Patrimonio Geológico

Propuesta de itinerarios geológicos virtuales en el Valle del Copiapó (norte de Chile): una herramienta para la difusión e impulso del geoturismo en el Desierto de Atacama. 211
M. Abad, P. Moisan, T. Izquierdo, M. Cáceres, R. Fernández, G. Mansilla, B. Muñoz, M. Naveas, L. Travela, F. Ruiz

Extracción de perfiles estratigráficos de alta definición en materiales diversos como método de conservación de texturas y estructuras para su uso didáctico y científico. 215
E. Baeza y X. Moreno

Explorando la aplicación de funciones de densidad en evaluaciones numéricas de inventarios de lugares de interés geológico. 216
D. Ballesteros

Manual para la elaboración de carteles interpretativos para la divulgación de la geología. 217
D. Brusi, M. González y C. Puig

El Máster Universitario en Patrimonio natural: valorización y gestión de la Universitat de Girona. 221
D. Brusi, C. Rodríguez y M. Casadevall

Fotogrametría aplicada al seguimiento del estado de conservación del patrimonio geológico: estudio de caso del geositio Yacimiento de Icnitas de Vale de Meios (Portugal). 222
T. S. Canesin, C. D. Viana, J. Vegas, M. Álvarez de Buergo, P. PereiraPereira, Paulo.

Espectroscopía vibracional (Raman e IR) de las veladuras y de las pinturas rupestres de La Chorrera, Los Yébenes, Toledo. 223
A.I. Casado, R. Asiain, A. Lobato, M. Taravillo E. Guillamet y L.M. Muñoz-Fragua

Lugares de Interés Geológico de Used. Ejemplo de La Cantera de "La Ceyda". 224
J. Causape, P. Gisbert y R. Soto

Los informes de afectación a patrimonio geológico. Una herramienta de geoconservación preventiva en Cataluña. 228
A.I. de Paz, J. Piña, C. Puig y E. Pujal

Avances en la actualización del Inventario de Espacios de Interés Geológico de Cataluña (IEIGC), noroeste de España. 231
A.I. de Paz, C. Puig, N. Herrero y P. Casanovas

Protección del patrimonio geológico urbano a través de normativa de jardinería: el nuevo Plan Director de Arbolado de la ciudad de Segovia. 234
A. Díez-Herrero, J. Vegas, A. Díez, y N. Sacristán

Propuesta de un Lugar de Interés Geológico: Peña Beneita, un olistolito de cuarcita tipo armoricano con icnitas (Ordovícico Inferior) dentro de un depósito sinorogénico varisco de bloques-en-matriz (Carbonífero inferior). 238
J.M. Domínguez Fernández, E. González Clavijo y E.J. González Clavijo

Caracterización petrográfica y mineralógica de las rocas utilizadas como materiales de construcción e n el itinerario urbano geológico-histórico de Candelario (SE de Salamanca, España). 242
A. Fernández-Fernández, A.M. Martínez-Graña, C.E. Nieto-Martín, J.A. González-Delgado, J.M. Gasca-Pérez

Geodiversidad del Camino de Santiago entre volcanes en la isla de Gran Canaria. Una georuta jacobea singular. 244
J. Mangas y J. Yepes

Las esponjas marinas del Cámbrico de la Zona Centroibérica: relevancia de los LIG en la divulgación y conservación del patrimonio geológico. 245
S. Menéndez, M. Rodríguez-Martínez, E. Moreno-Eiris y A. Perejón

La diversidad de la legislación autonómica española en relación con la geoconservación. Cuatro ejemplos: Aragón, País Vasco, Castilla y León, y Cataluña. 249
M. Monge-Ganuzas, N. Herrero, P. Infante, C. Martínez-Jaráiz.

Uso del decomiso de material geológico sustraído como herramienta de concienciación para la geoconservación. 251
A. Rodríguez y M. Carreras

Caracterización del sector profesional de la geo-conservación en España (2024). 255
A. Rodríguez-Florit, N. Herrero-Martínez, J.C. Utiel-Alfaro y M. Monge-Ganuzas

Puesta en valor y divulgación del patrimonio geológico fuera del IELIG: el caso de la costa de Gáldar (Isla de Gran Canaria). 259
A.J. Rodríguez-Rubio y J. Mangas

Pangea Database®: Una vía hacia la estandarización de datos del patrimonio geológico y paleontológico. 260
M. Roquet, V. Vicedo, Y. Díaz-Acha, M. Campeny

La subzona de Villarroya del Cabalgamiento de Cameros (LIG IB004), un lugar con una excepcional asociación patrimonial.....261
L. Otaño, C. Laplana, M. A. Galindo-Pellicena, A. Garzón, C. Ezquerro, A. Muñoz, E. L. Pueyo

Identificación y caracterización del patrimonio geológico en la Reserva Nacional Magallanes (Patagonia chilena) para el desarrollo de actividades educativas, turísticas y de conservación.....265
F. Valenzuela, M. Schilling, S.N. Nielsen y J. Pardo-Pérez

Monitorización del impacto del cambio climático en el patrimonio geológico del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias).....266
J. Vegas, M. González-Roquero, A. Díez-Herrero, G. Lozano, E. Martín-González, N. Sánchez, C. Romero Carmen.

Historía de la Geología

Historiografía de fuentes de terremotos históricos en el noroeste peninsular (periodo 1755-1900).....270
C. Crespo-Martín, F. Martín-González y C. Portillo-Poveda

El incremento de la colección de minerales españoles del museo del IGME (Museo Geominero): una historia desde mediados del siglo XIX.....271
R. Jiménez Martínez, R. González-Laguna, M.J. Torres Matilla y M.P. Hernández Pinilla

El IGME y su contribución a la exploración de hidrocarburos en España.....275
J. Navarro Comet

La identificación de la espinela y la ciencia árabe medieval.....279
M.C. Osácar Soriano y M.A. Pellicer García

"Yeso Estrella Negra de Villarroya" en las colecciones del Museo Geominero (IGME, CSIC): una posible historia de su hallazgo.....281
L. Otaño, C. Laplana, M.A. Galindo-Pellicena, R. Celorrio, N. Garrido, J. Toivonen y E.L. Pueyo

La participación histórica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en las excavaciones del yacimiento clásico de Villarroya.....285
E.L. Pueyo, C. Laplana, M.A. Galindo-Pellicena, Á. Salazar, J.C. Jiménez y L. Otaño

Dos acontecimientos relevantes en la historia del Museo Geominero (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC).....289
I. Rábano

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y los inicios de la cartografía geológica de escala media (1:50.000).....290
A. Salazar Rincón

Seis pioneros de la Geología en la Universidad Central.....294
B. Soutullo y M.B. Muñoz-García

El papel de la carga sedimentaria durante avenidas fluviales desde los trabajos históricos de la Comisión del Mapa Geológico de España.....298
D. Vázquez-Tarrío, K.P. Sandoval-Rincón y A. Díez-Herrero

Petrología, Geoquímica y Geocronología de Rocas Ígneas y Metamórficas

Aprendizaje automático para la modelización de propiedades físicas y litofacies en la Mina de Riotinto, España.....299
A. Balaguera, M. Torne, R. Carbonell, P. Sánchez, Sen Du, M. Schimmel, J. Díaz J. Vergés, J. Fernández, S. Rodríguez, D Davoise

Thermodynamic and trace-element modelling of charnockitic-enderbitic magmas.....300
A. Cambeses, S. Chakraborty, S. Bashak, A. García-Casco

Extensión y significado de las unidades geológicas más antiguas de la isla de Fuerteventura (Islas Canarias).....301
R. Casillas, A. Ahijado, C. Fernández, M. Gutiérrez, J.R. Colmenero, A. Hernández-Pacheco, L.P. Fernández, A. Demény, G. Nagy, E. García-Navarro, M. Camacho, F. Jourdan, U. Glasmacher, C. Castillo, S. Harangi, R. Lukacs, A. Belousov, M. Belousova, K. Balogh, D. Gimeno, J. Alonso-Henar, J. De la Nuez, M. Quesada, M.C. Martín-Luis, V. Perelló, G. Martín

Dating polymetamorphic garnet by U-Pb LA-ICP-MS. A case study from the Western Sierras Pampeanas (Argentina).....305
C. Casquet, S.O. Verdecchia, C.D. Ramacciotti, R. Albert, A.Gerdes, E.G. Baldo, R.J. Pankhurst

LA-ICP-MS como herramienta en el estudio de procesos geodinámicos: Análisis de Clinopiroxenos en Peridotitas.....308
M. Castillo-Carrión, J. Escuder-Viruete, P. Valverde-Vaquero, F.J. Fernández, F. Pérez Valera, M.T. Andrés Álvez y J. Escuder Magallón

Distorsión por difusión del sistema isotópico U-Th-Pb en circón como consecuencia de un choque térmico: un estudio en enclaves graníticos en lamproitas del SE de España.....309
R. Corpas, A. Cambeses, J.F. Molina, P. Montero, F. Bea, I. Novo-Fernández, N. Pujol-Solá, M.M. Repczyńska, L. Barcos, A. Garcia-Casco

La Formación Ollo de Sapo y sus equivalentes mundiales: implicaciones tectónicas para Gondwana 311
M. García-Arias, M. Morales Cámera, J.A. Dahlquist, P. Gao, S. Couzinié y A. Díez-Montes

Metamorfismo de rocas máficas metasomáticas (granulitas de alta presión de Cabo Ortegal, NO Iberia) 315
A. García-Casco, I. Novo-Fernández, N. Pujol-Solá, J.A. Proenza, R. Arenas

Geochemical comparison of circular plutonic complexes with extrusive rocks from Sal Island (Cape Verde) 316
M. García-Rodríguez, C. Villaseca, C. de Ignacio, D. Orejana, J. Mata y R. Caldeira

Dataciones U-Pb SHRIMP sobre zircones de los granitoides paleozoicos de la Meseta Marroquí 320
A. Jabaloy-Sánchez, C. Accotto, L. González-Menéndez, D. Martínez Poyatos, A. Azor, A. Azdimousd, H. El Haïbi, A. Tahiri, H. El Hadi y F. González Lodeiro

Presencia de circones detríticos africanos y amazónicos en la sucesión ediacárica del Orógeno Mauritano 321
R. Jiménez, D. Martínez Poyatos, A. Azor, F. González Lodeiro, C. Accotto, M. Salem Sabar y A. Lekouyrie

La sucesión volcano-sedimentaria ediacarana del inlier de Ougnat Oriental (Anti-Atlas Oriental, Marruecos): análisis de facies, geocronología e implicaciones geodinámicas. 322
B. Karaoui, Ch. Breitkreuz, Z. Yajioui, A. Karaoui, A. Mahmoudi, A. Zanetti, Mattia Bonazzi

CatVolc: Nueva base de datos sobre geoquímica y geocronología de los materiales volcánicos de la Zona Volcánica Catalana (España) 323
M. Miranda-Muruzábal, A. Geyer, M. Aulinas, H. Albert, M. Vilà, F. Michero, X. Bolós, D. Pedrazzi, G. Gisbert, L. Planagumà

The Ediacaran margin of Laurentia, the Clymene Ocean and the related sedimentary basins. A study case from the Sierra de Fiambalá (Argentina) 324
C.D. Ramacciotti, M.A. Larrovere, C. Casquet, C.I. Lembo Wuest, M. Morales Cámera, P.H. Alasino, J.A. Murra, M.A. Basei, L. Herazo, E.G. Baldo

Parental magma signatures recorded in hybrid zones 328
C. Rodriguez, J. Martí y M. F. Pereira

Assessing the formation of Cordilleran batholiths: A study based on the geochronology of the Carboniferous Tabaquito batholith in the Frontal Cordillera (Argentina) 329
G. Santos da Cruz, J.A. Moreno, J.A. Dahlquist, M.M. Morales Cámera, M.A.S. Basei and P.S. Zandomeni

Ignimbritas reomórficas riolíticas y traquíticas Misisipienses de la Cuenca de Matachel (Zona de Ossa-Morena). 333
F. Sarrionandia, J. Errandonea-Martin, E. Larrondo, M. Carracedo-Sánchez, L. Eguiluz y J.I. Gil Ibarguchi

Estructuras relacionadas con el emplazamiento de la granodiorita de la sierra de Collserola en la aureola de contacto (Cadena Costera Catalana) 334
J. Soler, G Alías y C. Aguilar

Fragmentos líticos en vulcanismo postcaldera: Descifrando el sistema hidrotermal de la Isla Decepción, Antártida 338
O. Vilanova-Pagès, H. Albert, A. Geyer, M. Aulinas, J. Ibáñez, A. Álvarez-Valero y A. Polo-Sánzhez

Palagonitización en rocas volcánicas de la Isla Decepción, Antártida. 339
O. Vilanova-Pagès, A. Geyer, H. Albert, M. Aulinas, G. Gisbert, J. Ibáñez, A. Álvarez-Valero y A. Polo-Sánchez

Una revisión de los entornos sedimentarios volcánicos de Ediacara en el interior de Saghro, Anti-Atlas oriental, Marruecos, que revela la diversidad de estilos volcánicos en condiciones terrestres. 340
Z. Yajioui, B. Karaoui, A. Karaoui, C. Breitkreuz, A. Mahmoudi

Geología Estructural y Tectónica

Nota sobre la presencia de una sucesión cretácica-cenozoica bajo el Manto de Somiedo. Implicaciones tectónicas 341
J. L. Alonso, L. P. Fernández, M. I. de Paz-Álvarez, G. de Vicente y S. Llana-Fúnez

Análisis estructural de la Falla de Santa María del Espino (Rama Castellana, Cordillera Ibérica): Transpresión debida a convergencia en dirección NNO-SSE. 345
J. Alonso-Henar, C. Fernández, G. de Vicente, A. Muñoz-Martín, A. Olaiz

Transpresión no estacionaria. 349
J. Alonso-Henar, C. Fernández y M. Díaz-Azpiroz

Desarrollo e implementación de una máquina de modelado análogo para el estudio de flujos no estacionarios. Principales características y posibilidades experimentales 353
J. Alonso-Henar, J. A. López Orozco, L. Real, M. Velasco, J. A. Álvarez Gómez, C. Fernández Rodríguez, J. L. Granja Bruña, J. M. Insua Arévalo, M. P. Llanes Estrada, J. J. Martínez- Díaz, F. J. Martínez Moreno, A. Muñoz Martín, I. Romeo-Briones, J. Ruíz, J.L. Sánchez Roldán, H. Uzkeda y G. de Vicente

Modelización numérica del papel de la reología de la sal y los mecanismos gravitacionales en la evolución de márgenes de rift....354
M. Bakhtbidar, P. Santolaria, P. Granado, J. B. Ruh y O. Gratacós

Análisis exploratorio y correlación de la resistencia de diferentes tipos de roca con ensayos de tracción y compresión simple 355
N. Belandria, L. Arlegui, R. Ucar y F. Torrijo

Evolución y cinemática de la minicuenca secundaria de El Bolón: Perspectivas de los mantos salinos sin-contraccionales de las Béticas Externas, Península Ibérica 356
D. Canova, E. Roca, C. Fernandez, O. Ferrer, J. Afzal y F. Escosa

Estructura compresiva de una pared salina controlada por la geometría halocinética preexistente, Marruecos....357
M. Carrión-Jiménez, A. Teixell, N. Fernandez

Diapirismo salino durante el emplazamiento del sistema de pliegues y cabalgamientos surpirenaico central: El Diapiro de Les Avellanes. 359
G. Cofrade, Ò. Gratacós, I. Cantarero, O. Ferrer, E. Roca, J.A. Muñoz, P. Ramirez-Perez, y A. Travé

Procesos de deformación en las zonas de cizalla basales de diversos mantos de la Zona Cantábrica....360
M.I. de Paz Álvarez, S. Llana Fúnez y J.L. Alonso

Un megapliegue alpino en el basamento de Iberia central 361
R. Díez Fernández, G. de Vicente, D. Moreno-Martín, C. Fernández, R. Arenas, F. J. Rubio Pascual

Fractured clasts in conglomerates and sedimentary breccias. Examples from the eastern margins of the Ebro basin 362
E. Druguet, J. Carreras and O. Oms

Sismicidad en el sector occidental del margen nor-Ibérico y su relación con la estructura cortical: observaciones preliminares....364
G. Fernández Viejo, S. Llana Fúnez, C. López Fernández, J.M. González Cortina, J. Acevedo, J. Olona y L. Pando

Primeros datos sobre la geometría y cinemática de la Falla de la Piedra de La Playa, Complejo Basal de Fuerteventura (Islas Canarias). 365
C. Fernández, J. Alonso-Henar y R. Casillas

Modelo cinemático para la génesis de tectonitas S bajo transtensión triclínica. 366
C. Fernández, M. Díaz Azpiroz y J. Alonso-Henar

Historia de reactivación de las fallas de San Carlos y Liordes (los Picos de Europa) a partir del análisis de estructuras y la caracterización geoquímica de los minerales asociados 370
A. G. Flórez Rodríguez, J. García Sansegundo, A. Martín Izard, D. Pedreira, M. Ziegler, A. R. Niemeijer y H. J. L. van der Lubbe

Inversión tectónica de la cuenca Vasco-Cantábrica y los Pirineos 371
J. García-Senz, A. Pedrera, B. López-Mir

Una comparación preliminar entre el Golfo de Cádiz y alrededores con el margen de Nueva Escocia. 372
C. Giraldo Ceballos

Estudio geológico-estructural de la falla de Manteigas-Vilariça-Bragança (NW Península Ibérica): evolución desde su formación y reactivaciones. 376
S. González-Muñoz y F. Martín-González

Estudio de modelos análogos sobre la influencia de la reología en el comportamiento de fallas strike-slip: Resultados preliminares....377
S. González-Muñoz, M. Rincón y F. Martín-González

Revisión, reinterpretación y reconstrucción 3D de la Falla Norpirenaica 378
O. Gratacós, J.A. Muñoz, y L. Serra

Evolución del margen Ibérico durante la orogenia alpina: indicaciones del macizo de Eaux-Chaudes (Zona Axial pirenaica occidental) derivadas de la geocronología de U-Pb y de la termocronología (U-Th) / He en zircones....379
M. Guardia, A. Griera, A. Teixell, R. Chatterjee, D. Stockli, L. Stockli y N. Caldera

Nueva interpretación estructural y modelización numérica de la cuenca de Cameros (La Rioja) 380
M. Ibáñez-Belloso A. Teixell, M. Guardia, A. Griera y E. Saura

Inversión de las cuencas de Ballongue-Baronnies (Zona Norpirenaica): Aportación de la fábrica magnética y el paleomagnetismo....381
M. Marcén, P. Calvín, E. Izquierdo-Llavall, P. Santolaria

Estructura y contexto tectónico de la depresión cenozoica de Maceda en el Orógeno Alpino 382
F. Martín-González, E. Barrón y A. Martín-Serrano

Control de una falla activa en sistemas de venas de yeso Plio-Cuaternarios (la falla de Galera, S Spain)....383
I. Medina-Cascales, A. Carrazana, E. Gómez-Rivas, P. Alfaro, F.J. García-Tortosa y I. Martín-Rojas

Implicaciones paleogeográficas de la deformación del Devónico Inferior en el Dominio de Obejo-Valsequillo (SW del Macizo Ibérico)....384
D. Moreno-Martín, R. Díez Fernández y R. Arenas

Geometría y modelado numérico de los cabalgamientos Alpinos y de los pliegues de propagación de falla asociados en el macizo de Honrubia-Sepúlveda (Sistema Central) 385
A. Muñoz-Cemillán, A. Muñoz-Martín, G. de Vicente, A.J. Olaiz

Reconocimiento de distintas unidades estratigráficas en el Triásico de Cambil (Jaén): implicaciones tectónicas....389
A. Pérez-López, P. Perrone, M. Sánchez-Gómez y F. Pérez-Valera

Evolución de la exhumación Cenozoica en los Pirineos Orientales: de la compresión a la extensión a partir de termocronología de (U-Th) / He 390
S. Peris Cabré, A. Griera, D. Gómez-Gras y A. Teixell

Caracterización de la deformación en el Sinclinorio de Bizkaia (Cuenca Vasco-Cantábrica)....391
L. Rodríguez-Méndez, N. Vegas y A. Aranguren

Crustal fluid flow evolution from Mesozoic rifting to Alpine compression in the Greater Caucasus and Adjara-Trialeti fold-and-thrust belts, SW Georgia 392
J.B. Ruh, D. Cruset, O. Enukidze, V. Alania, A. Mohammadi y A. Giorgadze

Paleomagnetismo y rotaciones de eje vertical en la Zona Oblicua del Segre (Unidad Central Surpirenaica)....393
F. Saiz, P. Juvany, M. Garcés, E. Beamud, M. López-Blanco

Caracterización estructural de las láminas de Frankenfels-Lunz en los Alpes Calcáreos del Norte 397
F. Saiz, M. Snidero, J.A. Muñoz, P. Granado, P. Santolaria

Restitución, tiempo a tiempo, del corte geológico de la Noguera Pallaresa, Pirineos Centrales....398
P. Santolaria y J.A. Muñoz

Caracterización estructural de la zona de Laspaules-Castanesa (Zona centro-meridional de la Zona Axial Pirenaica)....399
P. Santolaria, J.A. Muñoz, M. Snidero, M. De Matteis, P. Granado, E. Carola, M. Liesa y F. Sàbat

Herencia estructural en la cuenca del Ebro (margen SE "Ibérico")....400
R. Soto, P. Clariana, J. García-Crespo, J. Mediato, C. Ayala, F. Rubio, C. Rey-Moral, B. Benjumea y P. Canteli

Reconstrucción palinspástica 3D: El sinclinal de Anemzi en el Alto Atlas Central (Marruecos), un estudio paleomagnético y estructural. 401
L. Yenes, P. Santolaria, P. Calvín, J.J. Villalaín, M. Marcén

Mujeres y Geología

Red de Ingenieras de Minas del Ecuador 402
F.D. Andrade, C.A. Rojas and Network of Mining Engineers of Ecuador

¿Cómo están representadas las personas que se dedican a la geología en los libros de texto de secundaria españoles?....403
G. Calvo

"Geociencias Arcoíris", una iniciativa pionera en España para conocer la situación de las personas con diversidad afectivo sexual y de género que trabajan en Geociencias 407
J. Carmona, L. Gil, J. Pey, C. Jiménez de Cisneros, B. Martínez, B. Valero Garcés, D. Ponce de León, I. Blasco, E. Díaz-Losada

Percepciones y contribuciones de las paleontólogas en el congreso de la Asociación Europea de Paleontología de Vertebrados del 2023....408
P.M. Carro-Rodríguez, I. Menéndez, A. Oliver, A.R. Gómez Cano, S. Gamboa, P. López-Guerrero y D. Sanz-Pérez

Geólogas en Red....409
M. Chamizo Borreguero, D. Sanz Pérez, I. Pérez Cáceres, C. Fernández Leyva, A. Ruíz Constán, B. Martínez García y M.C. Feria

Implementación de un Comité de igualdad en un centro de investigación de Geociencias (GEO3BCN-CSIC) /Implementation of an Equality Committee in an Earth Sciences Research Institute (GEO3BCN-CSIC) 410
D. Cruset, A. Geyer, C. Ayala, J. Alcalde, J. Álvarez-Marrón, L. Expósito, J. Ibáñez-Insa, M. López-Saavedra, E. Montoya, G. Monzón

Nuevas caras de viejos problemas: visibilizando la mujer en Geología a través de cómics.....411
E. Díaz-Losada, R. Martín-Banda, A. Lucía-Vela, A. Ruiz-Constán, C. Ayala, D. Ponce de León y J. Rodríguez

Presencia y evolución de geocientíficas en el área de Exploración y Producción de Repsol.....412
I. García Saiz, V. Olgado Azpiazu

Redibujando la historia: mujeres y geología en Latinoamérica.....413
G. Olivenza, D. Ponce de León, F. Galea, M. Manrique, M. Vargas, M. Etcheverría, N. Pezzutti, M. Pita y N. Roitberg

¿Existe paridad en la participación y organización de actividades de divulgación geológica en España?.....414
A. Ruiz-Constán, B. Martínez-García, A. Calonge, M. Chamizo-Borreguero, I. Pérez-Cáceres

"Mujeres con los pies en la Tierra", un espacio para científicas. 415
D. Sanz-Pérez, P. M. Carro-Rodríguez, A. Oliver, I. Menéndez, E. Cuesta, S. Gamboa, A. R. Gómez Cano, P. López-Guerrero

Salidas de campo en Geología y la menstruación. ¿Cómo afecta al estudiantado? 416
D. Sanz-Pérez, A. Oliver, S. Gamboa, I. Menéndez, A.R. Gómez Cano, P.M. Carro-Rodríguez

Representación de las geólogas y paleontólogas en los libros de divulgación.....417
D. Sanz-Pérez y A. M. Valenzuela-Toro

Implicaciones de la brecha entre investigación y educación Secundaria. Perspectiva de género en los Proyectos de Excelencia 418
S. Torres-López

Integración de la perspectiva de género en investigación: implicaciones y retos futuros 419
S. Torres-López, A. Serrano Mamolar y S. Rodríguez Arribas

El debate y el estudio de casos como detectores de sesgos de género en el aula. Un caso práctico en Geología.....420
S. Torres-López, L. Trigos Luque

Geoarqueología

Primeros resultados del estudio estratigráfico-sedimentológico de la transición Pleistoceno tardío-Holoceno en la Laguna de TaguaTagua, Chile.....421
G. Aliaga-Aliaga, M. Frugone-Alvarez, T. Villaseñor-Jorquera, B. Valero-Garces.

Nuevas evidencias de minería aurífera antigua en la sierra de la Culebra (Zamora) 422
R. Andrés-Bercianos y J. Fernández-Lozano

Origen de las placas de arenisca en las ocupaciones magdalenienses en la cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias, España).....423
I. Armenteros, P. Barba, S. Delgado-Raack, M. Cueto, J. Tapia, R. Cerezo-Fernández, A. Martínez-Villa, E. Alvarez-Fernández

Explotación histórica del hierro en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel (España 424
D. Ballesteros, M. Fuertes-Fuente, A. Cepedal, R. Vila, X.C. Barros, I. Pérez-Cáceres y M. Alemparte

Cartografía y estratigrafía de la mina romana de As Borreas de Caldesiños (Ourense). 425
V. Barrientos Rodríguez, R. Matías Rodríguez y E. J. González Clavijo

La geología como elemento condicionante e integrador en un yacimiento arqueológico visigodo: 'Los Hitos' (Arisgotas, Toledo, España) 426
C. Camuñas, M.A. Perucha, M.A. Rodríguez-Pascua, I.M. Sánchez Ramos y A. Díez-Herrero

Dinámica geoarqueológica en las vertientes de recintos amurallados: caso de estudio en el yacimiento arqueológico de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España).....430
M.T. de Tena, C. Pro, V. Mayoral y J.M. Terrón

De (geo)arqueología y (arqueo)magnetismo. Una propuesta para la estandarización del trabajo conjunto. 434
J. del Río

Materias primas de las industrias líticas en la ocupación mesolítica del Abric del Xicotó (Alòs de Balaguer, Lleida). 435
C. Emens, M. Sánchez de la Torre, X. Mangado, C.B. González-Olivares y G. Alías

EvulcaRED: Estudio de vulnerabilidad y riesgos geológicos aplicados a la red hidráulica de Las Médulas (León, España) 439
J. Fernández-Lozano, R. M. Carrasco, J. Pedraza, E. Sanz-Ablanedo y J. R. Rodríguez-Pérez

Biogeoquímica de la transición Pleistoceno-Holoceno del registro TaguaTagua 3, Chile central (~34ºS).....440
M. Frugone-Álvarez, R. Labarca, S. Contreras, C. Godoy, N. Viña, E. Tejos, C. Tornero, E. González-Guarda, T. Viñaseñor, G. Aliaga, J. Blanco, P. Soto, A. Delgado-Huertas y B. Valero-Garcés

Métodos de estudio para la identificación, puesta en valor y recuperación de las Minas de Agua Romanas. Carmona, Torreperogil y Huelva, como ejemplos prácticos de patrimonio histórico-geológico. 441
A. González-Cantero, R. Vidal-Garduño

Análisis Preliminares de Isótopos de Estroncio en Esmalte Dental y Hueso de Equus de la Cueva Fantasma, Atapuerca (Burgos, España): Implicaciones sobre Patrones de Movilidad Local 444
A. Hasozbek, F. Jiménez Barredo, A. I. Ortega, M. Terradillo-Bernal, J. Vallverdú, M. Duval, J. M. Parès, A. Pourmand y A. Sharifi

Enfoque multimétodo para datar las secuencias sedimentarias en Cueva del Silo y Cueva Peluda por series de U y ESR (Sierra de Atapuerca, España). 445
I. Hernando-Alonso, M. Richard, D. Moreno, A.I. OrtegaA. Benito-Calvo, E Pons-Branchu, E. Carbonell y J.M. Bermúdez de Castro

Geoarqueología del registro prehistórico kárstico del Pleistoceno superior final y Holoceno inferior del valle del Sella (Asturias, España) 446
J. F. Jordá Pardo, D. Álvarez-Alonso, E. Álvarez-Fernández, M. de Andrés-Herrero, P. Carral, M. Cueto, C. Duarte, A. Maestro, S. Martín-Jarque, A. Martínez-Villa, A. Maximiano Castillejo, J. Molina Salido, Portero, R. y J. Tapia

La Geoarqueología en España desde sus inicios hasta la actualidad 447
J. F. Jordá Pardo y F. Borja Barrera

Cartografía geoarqueológica del complejo minero prehistórico de sílex en la Sierra de Araico - Montes de Cucho (Burgos-Álava) 448
I. Martín-Martín, A. Tarriño, A. Bandrés, J. Junguitu, L. Eguiluz, I. Orue, R. Jiménez-San Pedro, D. Herrero-Alonso, C. López-Tascón, H. H. Hernández, I. Elorrieta y N. Castañeda

Contexto geoarqueológico de los sistemas de molienda del cuarzo aurífero en la minería romana del Noroeste Ibérico....449
R. Matías Rodríguez

La Cultura de las Motillas de la Edad del Bronce de La Mancha y su relación con el evento climático 4.2 ka cal BP 450
M. Mejías, L. Benítez de Lugo Enrich

Nuevas dataciones de las terrazas del Río Arlanzón por RPE usando el centro de Titanio (Cuenca del Duero, España). 451
D. Moreno, I. Hernando-Alonso, A. Benito-Calvo, A.I. Ortega, E. Carbonell, J.M. Bermúdez de Castro

Datación de un testigo de sedimentos lacustres en el Laboratorio de Radiaciones Ionizantes y Datación Universidad de Salamanca....452
A. Parra, D. Ochoa, B. Quintana y J.A. Flores

Evaluación del ciclo minero del oro galaico-romano desde la experiencia de dos siglos de investigación geológica y minera tecno-industrial....453
O. Pazos

Geoarqueología desde el Antropoceno....454
O. Pazos

La procedencia de los sílex de los yacimientos magdalenienses de La Garma (Omoño, Cantabria) 455
A. Tarriño, A. Chauvin y P. Arias

Geología Planetaria

Mapas geológicos de lugares de interés de las misiones MER-A y MARS2020. Cráter Gusev y Cráter Jezero. Marte. 456
R.S. Anangonó-Tutasig, J. Rodríguez Rodríguez, S. Iglesias Álvarez, S. Pérez Fernández, S. d C. Fernández

Evolución del meteorito de Dhofar a partir de imagen por espectroscopía Raman 460
A.I. Casado, V.G. Baonza, M. Taravillo, J. Martínez-Frías y A. Lobato

Análisis geológico y selección global de cuevas en Marte para su futura exploración. 461
A. Crisol y L. M. Parro

Characterizing of K2-OjOS Exoplanets: a comprehensive analysis of size, mass, and volatile retention capacities 462
E. Díez Alonso, J. M. Recio, F. Izquierdo-Ruiz, J. de Cos Juez, A. Castro-González, S.d C. Fernández

Lunar Surface Resources Exploration: Tracing Lithium, 7 Li and Black Ice using Spectral Libraries and Apollo mission's samples. 463
S. d C. Fernández

Búsqueda de estructuras de impacto mediante el análisis de índices espectrales 467
D. García de la Fuente y S. d C. Fernández

Desarrollo de un simulante lunar para la realización de estudios de aprovechamiento de recursos in situ. 471
A.L. Marqués Sierra, R. Vázquez González, M. Favila Fernández, L.M. Rodríguez Terente

Reconstrucción hidrológica de un sistema valle-abanico en Coprates Catena, Marte 472
A. Molina, I. Herreros, M.A. de Pablo, D. Pascual, A. Caramanico, T. Martínez-Pérez, B. Gómez, M. Reboredo Prado, C. Haukes

Características geológicas del sistema binario de asteroides Didymos....476
L. M. Parro, A. Campo Bagatin, N. Trógolo, S. R. Schwartz

Classification, analysis and exploration of planetary caves and pits across the Solar System 477
L. M. Parro, G. López-Martinez M. de Luis y A. Crisol

Texturas y geoquímica de tectitas del límite Cretácico-Paleógeno de la sección de Zumaia (Guipuzkoa). 481
A. Rodríguez Pérez, S. Roces Heres, P. García Monte, G. Bernaola y O. García-Moreno

Metodología para el estudio del subsuelo de estructuras en Zona Circumpolar Norte de Marte con radar SHARAD (Shallow Radar en Mars Reconnaissance Orbiter). 482
M. Sánchez-Bayton, M. Herraiz, B. Sánchez-Cano y P. Martin

Límites de detección de minerales comunes en la superficie de Marte a partir de datos de espectroscopía VNIR-SWIR. 485
A. Santamaría-López, M. Suárez

Divulgación y Enseñanza de las Ciencias de la Tierra

Gamificando el Geolodía de Ávila, experiencias en el campo y en entorno cerrado....489
A.I. Casado, P. Melón, J. Pérez-Tarruella, T. S. Canesin, T.M. Béjard, F. Muñoz, D. Díez-Canseco, J. Cuevas, A. Claro, G. Castilla-Cañamero, A. Cuerva y J. Élez

Enseñando Geología en el programa STEAM de enriquecimiento educativo para alumnado de altas capacidades. 493
M.A. Calonge García, M.D. López Carrillo, G. Ros Magán

Paleontología en el instituto: una experiencia investigadora y didáctica. 497
J. Cortés Sammoudi, J. Mañani Pérez

Visualizando afloramientos con aplicaciones de geolocalización geográfica. 498
C. Giraldo Ceballos

El Hidrogeodía de Madrid (2017-2023): dando a conocer las aguas subterráneas 502
A. De la Losa Román, C. Baquedano Estévez, L. Moreno Merino, R. Morales García, J. Heredia Díaz, F. López Olmedo, E. Díaz-Losada, A. Romero Prados, J.J. Durán Valsero

Implementación de modelos digitales 3D en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra: El proyecto GEODIGIT 506
M. De Matteis, O. Ferrer, E. Roca, O. Gratacós, M. Aulinas, H. Albert, P. Arbués, S. Batenburg, F. Borràs, E. Beamud, P. Cabello, E. Carola, X. Delclòs, D. Garcia-Sellés, A. Geyer, M. Estiarte, O. Gómez, P. Granado, M. Guinau, M. Lopez-Blanco, E. Masana, J. Molins, J.A. Muñoz, M. Ortuño, P. Santolaria, M. Snidero

Proyecto MIVIDE: Minerales en la Vida Cotidiana y el Desarrollo. 507
J. Delgado Rodríguez, C. Barba Brioso, P. Campos Díaz de Mayorga, D. Martín García, M.I. Carretero León

Propuesta didáctica de una charla-taller de bivalvos: experiencia en el Museo de Ciencias Naturales AVAN (Viso del Marqués, Ciudad Real)....511
G. Delvene, S. Menéndez, E. Baeza, S. Laguarta

Conectando Ciencia y Educación: Proyectos Innovadores del Museu de Ciències Naturals de Barcelona. 515
Y. Díaz Acha, V. Vicedo Vicedo

El volcán en la oscuridad, audioguías para adentrarte en una exposición 516
E. Díaz Losada, B. Martínez García, D. Ponce de León, A. Romero Prados

De la Universidad al colegio: un proyecto geológico de aprendizaje-servicio 517
I. Duque, L. Porras, C. Carrascosa, J. Ferrero, N. Naranjo, A. Marina, M. Sanchís, L. González-Acebrón, C. Pérez-Garrido, C.O. Fesharaki y A. García-Frank

Tras la huella Romana 518
J. Fernández-Lozano, A. González-Abajo

Divulgación de la sismotectónica de España en la web del IGN 519
A. Garcia-Hourcade Rodríguez, L. Lozano López de Medrano, J.V. Cantavella Nadal, L.C. Puertas González, J.L. Barrera, L. Cabañas Rodríguez, J. Fernández-Fraile, F. Naveiras García

Implementaciones docentes en Geología con archivos interactivos: El ciclo de Wilson y la plataforma Genially. 520
J.L. Giner Robles, J. Elez, R. Pérez-López, P.G. Silva, M. Gómez-Heras, Y. Sánchez-Sánchez

El proyecto VIGEOCULT: Realidad virtual para la difusión del patrimonio geológico y paleontológico en el Geoparque Orígens 521
O. Gratacós, O. Ferrer, J.A. Muñoz, G. Rivas, P. Santolaria, A. Carola, A. Galobart, A. Sellés, X. Mir-Pellicer, G. Puras, J.A. Muñiz

Conociendo el Mar: Diseño y aplicación de una herramienta piloto de evaluación sobre cultura oceánica 522
L. Martín-García, A.M. Ballegeer, D. Ochoa, A. S. Rigual Hernández, M. A. Bárcena Pernía

Una propuesta para la educación en ODS mediante Casos Simulados CTS, aplicada a la formación inicial del profesorado de Secundaria. 525
M. Martín Gordillo, M. Herrero Vázquez y M. A. Fernández González

¿Te unes a "Aina y la Comunidad del Martillo" para salvar la geodiversidad del Planeta? 526
R. Martín-Banda, B. Martínez-García, A. Ruíz-Constán, D. Sanz-Pérez, M. Chamizo-Borreguero

Pedaladas geológicas a través de las ondas de radio 527
B. Martínez-García, D. Ampuero, G. Da Cuña y M. Chamizo-Borreguero

La Geología en la cultura popular, una nueva herramienta de divulgación 528
B. Martínez-García, E. Díaz-Losada, D. Ponce de León-Gil y A. Romero-Prados

Acepta el "Desafío en el Trans-Iberiano" para aprender geología 529
B. Martínez-García y A. Ruiz-Constán

Geocharlas online. Divulgando geología desde YouTube 530
B. Martínez-García, A. Ruiz-Constán, D. Sanz-Pérez, M. Chamizo-Borreguero y R. Martín-Banda

Divulgación y enseñanza en la Litoteca de Sondeos 531
C. Molina, J. González, J.J. Muñoz, A. Martínez y M.T. López

"Presentación de ""Reconstruyendo el Autuniense"", un proyecto para generar recursos didácticos y de divulgación de la Geología para el curso 2024-25" 532
M.B. Muñoz-García, A. García-Frank

Divulgando la problemática del uso de combustibles fósiles mediante un mensaje científico y artístico construido a partir de las Minas de carbón de Villarroya. 533
L. Otaño, C. Laplana, M. A. Galindo-Pellicena, D. Fernández, C. Hierro, C. Ezquerro, P. Vallés, F. Ezquerro, J. Garrido, A. Martínez, C. Martínez, P. Calvo, S. Pérez, A. Muñoz, E. L. Pueyo

Trabajando en geología por un día: un taller del Museo de la Geología - UCM para estudiantes de primaria 537
P. Oviedo, M.B. Muñoz-García, B. Del Moral, C. López Martín, L. González-Acebrón, A. García-Frank

El papel de la Asociación de Amigos del Camino de Santiago de Jaca en la enseñanza de la Geología a los peregrinos 541
A. Pascual

Fotogrametría con drones ligeros: un método asequible para la enseñanza de la geología 545
A. Pertuz Domínguez, S. Campos Soto

Sobre la conceptualización del karst. De disolver materiales a la comprensión 3D de la estructura geológica y las anisotropías de permeabilidad. 549
Ó. Pueyo Anchuela y J. Martín-García

De la sal a la halita, del cristal al mineral y del laboratorio escolar al medio natural. 550
Ó. Pueyo Anchuela, J. Martín García, Z. Salvadó Belart y M.J. Sáez Bondía

Haciendo más lúdico el aprendizaje sobre el uso de minerales 551
M. Regueiro y González-Barros, A. Alonso-Jiménez, K. Mezga, P. Vrhovnik, S. Rosado, L. Gullón Corral

Herramientas digitales para el aprendizaje inclusivo: virtualización de la práctica de campo de la geología. 552
I. Rodríguez Santalla, S. Martín Velázquez, T. Martín Crespo, D. Gómez Ortiz, M. Abad de los Santos, Á.R. Fraguas Herráez, J.M. López Díaz, N. Felgueras Custodio, T. Izquierdo Labraca, A. Jiménez Díaz

"Volcanes y Dinosaurios": un divertido juego para aprender Geología 556
A. Ruiz-Constán, B. Martínez-García, D. Sanz-Pérez, M. Chamizo-Borreguero y R. Martín-Banda

Mi primer Geolodía: el reto de llegar al público de infantil y primaria 557
A. Ruiz-Constán, B. Martínez-García, D. Sanz-Pérez, M. Chamizo-Borreguero, R. Martín-Banda, I. Pérez-Cáceres, R. Soto, A. Lucía y D. Díez-Canseco

GEAS Mujeres que estudian la Tierra 558
A. Ruiz-Constán, R.M. Mateos, B. Martínez-García, R. Martín-Banda, M. González, M. Chamizo Borreguero, D. Ponce de León, H. Aguilera y C. Ayala

"Game of Stones": ¿Quieres descubrir cuánto sabes de Geología? 559
D. Sanz-Pérez, A. Ruiz Constán, B. Martínez García, M. Chamizo Borreguero, R. Martín-Banda

El Corte Geológico de un Valle Fluvial: Secuencia de Procesos Cuaternaria 560
P.G. Silva, E. Roquero y T. Bardají

Progresión de modelos escolares sobre la teoría de la evolución 562
D. Torromé Sanz, A.L. Luis Cortés Gracia y B. Mazas Gil

El Mapa del mes: una iniciativa para la divulgación de la cartografía geocientífica del IGME 563
L. Vega Martín, T. Orozco Cuenca, Á Prieto Martín

Geofísica

Determinación del basamento mecánico y geológico mediante técnicas de sísmica pasiva en el entorno del Río Guadiamar: Implicaciones tectónicas 565
D. Amador Luna, A. Macau, M. A. Alonso-Landaeta, S. Berman Díaz y F. M. Alonso-Chaves

Caracterización de las Plumas de Canarias y Madeira: Observaciones con Funciones Receptoras 569
L. Bonatto, D. Schlaphorst, G. Silveira, J. Mata, C. Civiero, C. Piromallo, M. Schimmel

Sobre las dependencias funcionales entre la densidad y las velocidades de las ondas P y S para rocas del Pirineo Central 572
C. Cuchet, C. Ayala, J. Alcalde, E. Beamud, P. Clariana, R. Soto, R. Carbonell

Estructura cortical del margen noroeste de la península ibérica: nuevos datos de reflexión sísmica en 2D 573
M.A. de la Fuente-Oliver, A. Muñoz-Martín, J.L. Granja-Bruña, M. Druet, G. de Vicente, A. Maestro, J. Gallastegui, F. Bohoyo, A. Muñoz-Cemillán

Desarrollo de software de inversión conjunta 3D de datos gravimétricos y magnético mediante regularizadores estructurales y su aplicación en campos volcánicos. 574
A. del Razo y V. Yutsis

European Plate Observing System - Nodo Español de EPOS 576
A. Geyer, R. Carbonell, I. Aniel-Quiroga, A. Azor, J. V. Cantavella, J. J. Curto, I. Domínguez-Cerdeña, J. Fernández, J. L. Fernández-Turiel, J. R. Hernández Machado, J. Macías, M. P. Mata, D. Núñez, J. A. Sánchez Sobrino, R. Urgelés

The lithosphere and upper mantle of the Western-Central Mediterranean region from geophysical-geochemical modelling. 577
I. Jiménez-Munt, M. Torne, W. Zhang, A.M. Negredo, J. Vergés, E. Bravo-Gutierrez, D. García-Castellanos

Tomografía eléctrica de la Falla de Alhama de Murcia (SE de España). 582
J.F. Mediato, R. Pérez-López, F. Rubio Sánchez-Aguililla, J. López-Gutiérrez, A. García-García, M. Rodrigo-Viñuela, J.M. Llorente-Delgado, B. del Moral, F.J. Fernández-Naranjo, P. Fernández-Canteli.

Nuevos datos gravimétricos y magnéticos marinos en el Margen Cantábrico occidental 583
A. Muñoz-Martín, J.L. Granja-Bruña, M.A. de la Fuente, J. Fiz, M. Druet, A. Maestro, J. Gallastegui, M. Gómez-Ballesteros, A. Muñoz-Cemillán, M. Catalán y A. Carbó

Inversión gravimétrica 3D en Gran Canaria constreñida por datos de resistividad 584
A. Olaiz, A. García-Craviotto, J.L Huedo, I. García-Saiz, J. Torres-Torremocha, J. Álvarez, J. Diez-Masip, A. Arnáiz y G. Marro

Batimetría de la cuenca Powell (Antártida): resultados de la campaña oceanográfica ElGeoPoweR 588
D. Palomino, M. Gómez-Ballesteros, M. Catalán y equipo ElGeoPoweR

Nuevos datos sobre la extensión en profundidad de la raíz cortical cantábrica: resultados preliminares del proyecto CANALAB 589
D. Pedreira, A. Olivar-Castaño, J. A. Pulgar, A. Díaz, S. Cabezas, J. Gallastegui y J. M. González-Cortina

Identificación de cavidades en la Cueva del Arco (Cieza), aplicación de georradar y modelo 3D con láser escáner. 590
M. Reyes, A. Espín, A. Gil, G. Frías, F. Carreño

Investigación gravimétrica de las pegmatitas de Giraúl (SW de Angola) Gravity study of the Giraúl pegmatites (SW Angola) 594
C. Rey-Moral, F. Rubio, E. Merino-Martínez, J.L. García-Lobón, J.M. Llorente, A. García y P. Spitalny

Determinación de la profundidad de Curie mediante métodos espectrales en La Palma (Islas Canarias) a partir del mapa de anomalías magnéticas 595
M. C. Romero-Toribio, F. Martín-Hernández y J. Ledo.

Distribución de las evaporitas Triásicas en el Saliente Surpirenaico Central a partir del análisis de anomalías gravimétricas.....599
P. Santolaria, C. Ayala, R. Soto, P. Clariana, J.A. Muñoz, F.M., Rubio, J. Martín-León y E.L. Pueyo

Influencia de la zona de falla de Palomares en las cuencas adyacentes mediante prospección gravimétrica.....600
V. Tendero-Salmerón, G. Ercilla, L. González-Castillo, A. Madarieta-Txurruka, F. J. Martínez-Moreno, F. Estrada, J. Galindo-Zaldívar

Hidratos de metano en el margen chileno: aspectos ambientales y energéticos 601
U. Tinivella, M. Giustiniani, I. Vargas-Cordero, L. Villar-Muñoz, J.P. Bento

The Iberian thermal lithosphere and perspectives on deep geothermal studies 602
M. Torne, I. Jiménez-Munt, A. M. Negredo, J. Fullea, J. Vergés, I. Marzán, J. Alcalde, E. Gómez Rivas and C. García de la Noceda

Hidrogeología

Respuesta del acuífero fluviovolcánico de la Garrotxa a la sequía.....606
J. Bach y E. Bassols

Las lagunas volcánicas del Campo de Calatrava. Caracterización hidrológica 607
B.J. Ballesteros Navarro, C. Camuñas Palencia, J. L. Barrera Morate, M. Mejías Moreno, C. Baquedano Estévez, O. García Menéndez y A. Padilla Benítez

Avances en el conocimiento hidrogeológico de la isla de El Hierro (Canarias) mediante la construcción de un modelo geológico 3D 611
C. Baquedano, M.A. Marazuela, J. Martínez-León, N. Cruz-Pérez, L.E. Hernández-Gutiérrez, J.C. Santamarta, A. De la Losa y A. García-Gil

Caracterización hidrogeoquímica preliminar de las aguas subterráneas del Parque Natural de Cabo de Gata – Níjar (Almería) 615
J. Buera Cuerva, M. Mudarra Martínez, B. de la Torre Martínez y B. Andreo Navarro

Caracterización hidrogeológica de las aguas minerales y termales de Andalucía. Subdominios hidrominerales. 619
M.M. Corral Lledó, J.M. Fernández Portal, C. Ontiveros Beltranena, M.E. Galindo Rodríguez, B. Martínez Plédel y J.A. Díaz Muñoz

Investigación de sistemas ancestrales de Siembra de Agua, como ejemplo de Solución Basada en la Naturaleza para la recarga de acuíferos. Las zayas de La Valduerna (León).....620
A. de la Losa Román, J.A. Ventura González, C. Marín Lechado, Carolina Guardiola Albert, Giuseppe Massone y Sergio Martos-Rosillo

Análisis preliminar de la relación río-acuífero en la cuenca alta del río Palancia (Castellón-España) y consideraciones para el establecimiento de caudales ecológicos 624
J.A. Domínguez Sánchez, J. Grima Olmedo, A. Fidalgo Pelarda, N. Mondéjar Martín, A. Nieto Arias, S. Rosado Piqueras, C. Baquedano Estévez y B.J. Ballesteros Navarro

Aplicación de métodos geofísicos para la localización de acuíferos y estructuras hidráulicas subterráneas.....629
A. González-Cantero y C. Gata-Maya

Instrumentación de acequias y cauces en la Garganta de San Gregorio (Aldeanueva de la Vera, Cáceres) para el análisis de la infiltración y circulación del agua subterránea en acuíferos de ladera.....630
A. González-Ramón, A. Fernández-Ayuso, H. Aguilera, C. Marín, A. De la Losa y S. Martos-Rosillo

Evolución hidroquímica de las aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. 631
J. Grima Olmedo, B.J. Ballesteros Navarro, J.A. Domínguez Sánchez

El modelo de flujo del Sistema Acuífero Multicapa Profundo de Úbeda. La evolución de una herramienta de planificación hídrica 635
J. Heredia Díaz, A. González-Ramón y V. Cifuentes

Dinámica del flujo subterráneo en el túnel de Talave (cuenca del Segura, SE de España).....636
J. Hornero y M. Manzano

Salinización de cultivos por riegos con aguas subterráneas en zonas de descarga de flujos regionales.....637
P. Huerta, E. Rodríguez-Jiménez, L. Llera, P. Carrasco, C. Recio, J. Carrasco

Modelización de la altura de la lámina de agua y aplicación de escenarios de cambio climático en la laguna de Santa Olalla (Parque Nacional de Doñana) 638
A. Jiménez-Bonilla, J. L. Yanes, M. Rodríguez-Rodríguez, F. Moral

Midiendo la conductividad eléctrica con resolución diaria en goteos de cuevas con volúmenes de agua limitados 639
K. Krklec, K. Matan, Ž. Zgorelec y D. Domínguez-Villar

Recursos de agua subterránea dulce retenidos por diques en acuíferos volcánicos costeros e insulares: Aprendiendo de la Isla de El Hierro (España) 640
M. A. Marazuela, C. Baquedano, N. Cruz-Pérez, J. Martínez-Pérez, C. Laspidou, J. Jiménez, J.C. Santamarta, A. García-Gil

Clasificación de aguas minerales mediante técnicas de machine learning: aplicación a aguas envasadas del noroeste de España 641
A.L. Marqués Sierra

Investigaciones preliminares sobre la posibilidad de abastecimiento a la ciudad romana de Acinipo (Ronda, Málaga) mediante aguas subterráneas. 644
C. Martín Montañés, J.M. Castaño Aguilar, P. Corrales Aguilar, M. Moreno Alcaide, C. Husillos Rodríguez y L. Hueso Quesada

Actualización de la evolución piezométrica y la recarga natural del acuífero "Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana" de la MASb 052.800 "Montes Orientales. Sector Norte". 648
C. Martín Montañés, C. Husillos Rodríquez, V. Cifuentes Sánchez, J. Jiménez Sánchez, L. Hueso Quesada, D. González Rojas y J.P. Martín Ponce

Soluciones basadas en la naturaleza para la resiliencia de las Islas Canarias ante el cambio climático: el proyecto NATALIE 652
J. Martínez León, C. Baquedano, M.Á. Marazuela, J. Jimenez, S. Gasco Cervero, J. Rodríguez-Martín, J.C. Santamarta y A. García-Gil

Los pozos de la catedral de Ávila, España 653
R. Morales García

Resultados preliminares sobre la relación hidrogeológica entre acuíferos mediante el análisis de los isótopos estables δ18O y δ2H. Sistemas jurásicos y cretácicos de la Sierra de Segura. SE de España. 657
A.L. Morales-González, J. Jódar-Bermúdez, A. González-Ramón, F. Moral-Martos, R. Jiménez-Espinosa y F. Gázquez

Modelización numérica de la intrusión marina bajo escenarios de cambio climático. Caso de estudio: el acuífero de la Plana de Castellón (España) 658
A. Renau-Pruñonosa, B. R. Almazán, M.V. Esteller

Caracterización hidrogeoquímica preliminar del agua subterránea en el entorno de la laguna de Zóñar (Aguilar de la Frontera, Córdoba 659
A. Palomino Gómez, M. Mudarra Martínez, J.M. Gil Márquez y B. Andreo Navarro

Uso de imágenes termográficas obtenidas mediante dron en la caracterización de la dinámica del aire en sistemas kársticos. 663
J. L. Yanes, F. Moral, M. Vélez-Nicolás, S. García-López, L. Barbero

Mineralogía y Recursos Minerales

Caracterización mineral de los residuos mineros de la presa San Quintín Oeste (Puertollano, Ciudad Real) 664
P. Adánez, J. A. Arranz-González, V. Rodríguez-Gómez y F. J. Fernández-Naranjo

Contribución del IGME a la cartografía paneuropea de los recursos minerales críticos: el proyecto GSEU. 665
P. Adánez, E. Boixereu, C. Fernández-Leyva, F.J. González, E. Marino, I. Martín-Méndez, V. Rodríguez-Gómez, S. M. Timón-Sánchez y GSEU Mineral Resources team

Prospección Geoquímica, experiencia metodológica en el muestreo de sedimentos fluviales activos en Ecuador 666
F. Andrade y P. Cobacango

La consideración del riesgo para fijar prioridades de cara a la recuperación de recursos secundarios en instalaciones abandonadas de residuos mineros 669
J. C. Arranz-González, A. Rosario-Beltré, V. Rodríguez-Gómez, F. J. Fernández-Naranjo, P. Adánez-Sanjuán

Recuperación sostenible de metales en sedimentos contaminados mediante separación magnética 673
D. Baragaño, B. Astray, E. Berrezueta, V. Chrastný y M. Komárek

Implicaciones mineralógicas durante la remediación de un suelo contaminado con enmiendas 674
D. Baragaño, M. A. López-Antón y G. Ratié

Mapa Geoquímico de América Latina y el Caribe 675
M.J. Batista, A. Turel, I. Martín-Méndez, J. Larizzati, G. Prieto y Grupo de Expertos en Geoquímica de ASGMI

Mineralizaciones y plegamiento: depósitos de scheelita asociados a la cizalla extensional de Martinamor (Salamanca, España) 676
D. Bermejo, J. Gómez-Barreiro, L. Ortega, S. Barrios, P. Castiñeiras y E. Crespo

Transformación de pasivos mineros en activos energéticos. El caso del proyecto START 679
E. Boixereu, C. Fernández-Leyva, R. Jiménez-Martínez, P. Adánez, D. Gómez-Limón, M. Garcia y J. Reyes

Cristalización no clásica en Carbonatos de la Cueva de Nerja, España 683
S. Bonilla-Correa, M. P. Asta, E. Ruiz-Agudo, C. Jiménez de Cisneros y C. Liñán-Baena

Variaciones geoquímicas en cristales maclados de aragonito 684
I. Cantarero, C. Fàbrega, M. Śliwiński, A. Travé y D. Parcerisa

Deciphering the age of the Hematite Ores of the Iberian Range (Spain): A paleomagnetic approach 685
P. Calvín, V. Suárez, I. Domper y F.J. Pérez-Rivarés

Maghemita, el mineral de mena olvidado de las lateritas niquelíferas 689
D. Domínguez-Carretero, J.A. Proenza, C. Villanova-de-Benavent y S. Galí

Aplicación de las imágenes hiperespectrales en la testificación geológica. 690
A. Espín de Gea, G. Frías, M. Reyes, A. Gil y M.F. Carreño

El depósito de Fe-Mn-Pb-Cu (± Au) de Boumaadine: geología, alteración hidrotermal y hallazgos geoquímicos en Jbel Skindis, Alto Atlas oriental, Marruecos 691
M. Essalhi, A. Tobi, L. Barbanson, A. Zouggarh y L. Ben Aissi

Recuperación medioambiental de zonas degradadas por la actividad extractiva de áridos mediante la implantación del cultivo de arándano rojo (Vaccinium macrocarpon Ait.) 692
A. Fernández-Fernández, S. M. Timón-Sánchez y M. C. Moro-Benito

El potencial de los Tecnosuelos como solución sostenible para la revegetación de áreas mineras 693
S. Fernández-Landero, J.C. Fernández-Caliani, M.I. Giráldez, E. Morales y P.J. Hidalgo

Mineralización hidrotermal de sulfuros de Co-Ni-Cu en metabasitas de la Cordillera Bética. 694
A. R. Ferreira, J. M. González-Jiménez, I. F. Blanco-Quintero, L. Yesares, R. Piña, L. Ortega, I. Fanlo, F. Gervilla

Inferencias petrogenéticas sobre la pegmatita litinífera de Gonçalo (Portugal) basadas en la química del cuarzo 695
I. Garate-Olave, E. Roda-Robles, J. Errandonea-Martin, A. Lima y A. Müller

Monacita nodular (‘gris’) en placeres (Matamulas, Ciudad Real): edad y composición química. 696
S. García de Madinabeitia, A. Beranoaguirre, P. Martínez Salas, E. Burkhalter Thiebaut y J.I. Gil Ibarguchi

Suelos con horizonte argílico desarrollados sobre materiales calizos en zonas interiores al norte de la provincia de Alicante 697
L. García-España, V. Pons y M.D. Soriano

Suelos desarrollados sobre sedimentos aluviales en la zona de Benisa (Alicante) 701
L. García-España, V. Pons y M.D. Soriano

Cartografía mineral de formas del relieve con imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner): un ejemplo en la cuenca del Tajo (Centro de España) 704
E. García-Meléndez, M. Ferrer-Julià, J.A. Cruz, J. García-Rivas, M. Suárez, P. Valenzuela1, E. García-Romero, E. Colmenero-Hidalgo e I. Pereira

Disorder in kaolinite: XRD-IR systematics 705
A. García-Vicente, E. Siranidi, E. García-Romero, M. Suárez, G.D. Chryssikos

Cristalización fraccionada de copiapita-halotriquita en el norte de Chile. 709
J. Gerding, J. Morales y A. Novoloselov

Nanometalogenia de metales críticos. 710
J.M. González Jiménez, A.R. Ferreira, I. González-Pérez, E. Schettino, L. Yesares, C. Marchesi, F. Gervilla

El litio como trazador de los procesos de contaminación cortical del manto litosférico subcontinental 711
I. González-Pérez, J.M. González-Jiménez, S.A.S. Dare, E. Schettino, R. Piña, C. Marchesi, L. Yesares, F. Gervilla

Innovative Magnetotelluric Technology Solutions for Mine Planning and Risk Mitigation and Near Mine Exploration 712
R. L. Gordon y L. Ramayo

Evaluación de la aplicación de la tecnología Sustrato Alcalino Disperso para el tratamiento pasivo de lixiviados ácidos. 716
R. León, F. Macías, R. Millán-Becerro, C.R. Cánovas, J. Romero-Matos, L. Sánchez, R. Pérez-López y J.M. Nieto

Determinación geoquímica de niveles de fondo y concentraciones de metales pesados en el paraje de la Peña del Seo (Corullón, León) 717
A. López Mederos, J. Fernández Lozano, A. Hurtado Benzos, S. Eguilior Díaz, I. González Pérez y J.R. Rodríguez Pérez

Variaciones composicionales de elementos mayores debidas al proceso de caolinización en el granito de metales raros de Golpejas (España).....718
F.J. López-Moro, A. Díez-Montes, S.M. Timón-Sánchez, T. Llorens González y T. Sánchez-García

Los recursos de Tierras Raras en Fuerteventura: evaluación geoquímica y mineralógica.....719
J. Mangas, M. Campeny, I. Menéndez, L. Quevedo, J. Yepes, R. Casillas, A. Ahijado, J. Méndez-Ramos

Exploración geoquímica en Ossa Morena occidental (Huelva y Sevilla).....720
I. Martín-Méndez y R. Andrés-Bercianos

Mineralogía Automatizada: mirando hacia el futuro en un mundo de minerales críticos y una economía verde 724
A. H. Menzies, R. Tagle y N. M. Kelly

La roca estéril del yacimiento de cobre de Touro en Galicia, España: retos para su caracterización ambiental 725
T. Meuzelaar, P. Núñez-Fernández, A. Martín-Izard, D. Arias-Prieto y F. Díaz-Riopa

Remediación de aguas ricas en elementos de las tierras raras (REEs) mediante estrategias de precipitación de fases minerales.....726
R. Millán-Becerro, E. Ruiz-Agudo y M.P. Asta

Li-rich claystone in the Central Depression of Northern Chile: a new lithium source 727
D. Morata, S. Maza, I. Abad, A. Harwood, M. Cerda, R. Mardel, M. Vergara

Investigaciones de placeres marinos ricos en materias primas críticas en España 730
W. Ng-Cutipa, A. Lobato, F. J. González, E. Marino, B. Rincón-Tomás, E. Santofimia, T. Medialdea, L. Somoza, E. Boixereu, R. Piña y R. Lunar

Mapas de potencialidad minera mediante SIG de depósitos de litio en la provincia de Cáceres (España) 734
P. C. Ocaña-Cerdido, S. M. Timón-Sánchez, A. Díez-Montes, T. Llorens-González, I. Martín-Méndez, J. García-Crespo y T. Sánchez-García

Desarrollo de geoestándares de carbonatos para análisis de isótopos estables (δ13C, δ18O) mediante SIMS 735
D. Parcerisa, I. Cantarero, C. Fàbrega, M. G. Śliwiński, A. Hertwig, J. T. Śliwiński, A. Travé

Asociaciones mineralógicas en los depósitos de bentonita sódica de la Formación Allen (Cretácico Superior) en la Cuenca Neuquina (Argentina). Implicaciones genéticas.....736
G. Pettinari, T. Musso, M. Pozo y A. Martínez

Overview of the Santa Comba W-Sn rich zoned polyphase intrusion, Galicia NW Spain 737
C. Pita, I. Borrajo, F. Tornos, y E. Crespo

Caracterización mineralógica del skarn de scheelita de Monleón (Salamanca, NO España).....741
J. Posado-De Castro, S.M. Timón-Sánchez y A. Fernández-Fernández

Los depósitos de bauxitas kársticas de la Sierra de Bahoruco, República Dominicana: Una fuente no convencional de REY 742
J.A. Proenza, C. Villanova-de-Benavent, D. Domínguez-Carretero, L. Torró, N. Pujol-Solà, T. Aiglsperger, X. Llovet, A. Ramírez y J. Rodríguez

El nodo sur de España del Esquema Regional de Innovación del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología en Materias Primas.....743
M. Regueiro y González-Barros

INTERNSHIP. Un nuevo programa de becas del esquema regional de innovación del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología en Materias Primas.....744
M. Regueiro y González-Barros

Estudio mineralógico y geoquímico de las fases metálicas acumuladas en una planta de tratamiento pasivo para drenaje ácido de mina.....745
A. Rodrigo, R. León, J.M. Nieto, F. Macías

Evaluación del potencial de recuperación de Sb en una presa de residuos mineros del Distrito Minero Linares-La Carolina (Jaén).....746
V. Rodríguez-Gómez, J.A. Arranz-González, P. Adánez, F. J. Fernández-Naranjo y A. Rosario-Beltré

Monitoreo y evaluación de la contaminación por drenaje ácido de mina: el futuro de la presa de Alcolea (Huelva). 751
J. Romero-Matos, C. R. Cánovas, F. Macías, L. Sánchez-López, R. León, R. Millán-Becerro, J. M. Nieto, R. Pérez-López

Caracterización de las mineralizaciones de Sn, Nb y Ta en la mina de Golpejas, Salamanca: del yacimiento primario a los residuos mineros. ...752
A. San Cipriano-Mata, T. Llorens-González, A. Fernández-Fernández, S.M. Timón-Sánchez, A. Díez-Montes, F.J. López-Moro y T. Sánchez-García

Evolución hidroquímica en el estuario del río Tinto (Huelva, SO España) durante un evento de precipitación. 753
L. Sánchez-López, J. Romero-Matos, R. León, R. Huertas, J. L. Guerrero, F. Macías, C. R. Cánovas y R. Pérez-López.

Spectral signature (VNIR-SWIR) of the outcropping rocks of the Sierra del Aramo, Asturias. A preliminar study. 754
A. Santamaría-López, J. Morales, J.D. Ramírez, M. Suárez

Geoquímica y mineralogía del Sc en las lateritas de Ni-Co de Bahía de Moa (Cuba). 758
C. Villanova-de-Benavent, D. Domínguez-Carretero, T. Aiglsperger, X. Llovet, J.A. Proenza

El depósito de Cu-(Co) sedimentario Cabezo de La Mina (Santomera, Murcia)....759
L. Yesares, J. M. González-Jiménez, I. F. Blanco-Quintero, P. Marín-Troya,
A. R. Ferreira, R. Piña, L. Ortega, I. Fanlo y F. Gervilla

Nuevos recursos de metales críticos y de alto valor tecnológico en minerales metálicos de la Faja Pirítica Ibérica 763
L. Yesares, J.M. González-Jiménez, R. Piña, R. Sáez, G. Almodóvar, J.M. Pons y S. Tenorio

Evaluación preliminar de residuos mineros abandonados para la recuperación de materias primas críticas: el ejemplo de la mina de Golpejas, Salamanca. 764
J. Ysla-Salinas, T. Llorens-González, S.M. Timón-Sánchez, A. Díez-Montes, T. Sánchez-García, J. García-Crespo, F.J. López-Moro

El potencial Minero de Camerún: Explotación Sostenible o Depredación. Caso de la Región Oriental....765
L. Zang, P. Higueras Higueras y E. Garcia

Tectónica activa y Geología de Terremotos

Propuesta de parametrización de la medida “distancia a la falla” para la aplicación práctica del proyecto de norma de construcción sismorresistente NCSR-23....766
J. A. Álvarez-Gómez, P. Herrero-Barbero, H. Perea, O. Gómez-Novel, R. Martín-Banda, J. García-Mayordomo, J. Gaspar-Escribano, Á. González, G. Khazaradze

Análisis morfométrico cuantitativo de alta resolución del fondo marino para caracterizar el crecimiento de un sistema de fallas transtensional: Las fallas Norte-Sur (Mar de Alborán). 769
A. Canari, H. Perea, S. Martínez-Loriente y J. Llopart

Aplicación de Redes Neuronales Convolucionales para mejorar el conocimiento morfotectónico de las fallas marinas: caso de estudio de las fallas Norte-Sur en el Mar de Alborán. 770
A. Canari, L. Pousse-Beltran, S. Giffard-Roisin, H. Perea y S. Martínez-Loriente

Implicaciones del uso de travertinos como indicadores de paleoterremotos en la Falla de Alhama de Murcia, España. 771
C. Canora, J.J. Martínez-Díaz, J.M. Insua-Arévalo, O. Gómez-Novell, E. Rodriguez-Escudero y J.A. Álvarez-Gómez

Paleosismología de la Falla de Karioi. Implicaciones sobre las interacciones volcanotectónicas en la terminación sur del Taupo Rift, Aotearoa Nueva Zelanda....772
C. Canora, P. Villamor, K. Berryman, B. Alloway, R. Basili, R. Langridge, J.J. Martínez-Díaz, M. Martínez-Martos y C. Prentice

Campos de intensidad y determinación de fuentes sísmicas: un nuevo enfoque metodológico para terremotos históricos 773
Y. de Pro-Díaz, J. J. Martínez-Díaz y C. Canora Catalán

Tectónica activa en la región fronteriza Alt Urgell-Andorra y su relación con la serie sísmica de Os de Civís. 774
A. Echeverria, J. Martín Castells, M. Ortuño, T. Frontera Genovard y A. Margalef Porcar

Entendiendo los registros de terremotos devastadores históricos en la Bahía de Azua, centro-sur de la Isla Española 775
FJ. Fernández, J. Escuder-Viruete y F. Pérez-Valera

Cartografía apoyada en drones con sensores térmicos y fotogrametría para la identificación de actividad neotectónica en el noroeste peninsular: La mina romana de Las Médulas (León) como laboratorio natural 776
J. Fernández-Lozano, J. Babault, A. Rodríguez García, A. Suárez Rodríguez, P.P. Hernaiz-Huerta e I. González-Pérez

Origen de la serie sísmica de 2021 a la actualidad en el monte submarino Ras Tarf (Mar de Alborán) 779
J. Galindo-Zaldívar, J.A. Peláez, J. Henares, O. Azzouz, M. Benmakhlouf, M. Chourak, E. d’Acremont, F. Estrada, M.C. Fernández-Puga, L. González-Castillo, A. Madarieta-Txurruka, S. Martínez-Loriente, Y.M. Martos, D. Palomino, V. Tendero-Salmerón, J.T. Vázquez y G. Ercilla

Mejoramiento del análisis paleosismológico de eventos de terremotos antiguos mediante el uso de datos hiperespectrales....780
J. Gallego-Montoya, M. Ortuño, L. Benedetti, M. Kirsch, M. Riesner, and D. Garcia-Sellés

Paleosismología del Sistema de Fallas de Sabanalarga, Noroccidente de Colombia 781
J. Gallego-Montoya, H. Perea, A. Rendón, P. Valla y F. Anselmetti

Explorando las incertidumbres de los parámetros de falla en el Mar de Alborán a partir del modelado de tasas de sismicidad 782
O. Gómez-Novell, H. Perea, M.J. Jiménez, M. García, L. Lozano, J. García-Mayordomo, J.L. Sánchez-Roldán, A. Canari, S. Martínez-Loriente

Un nuevo método para clasificar el rendimiento de simulaciones de terremotos basadas en la física 783
O. Gómez-Novell, F. Visini, B. Pace, J.A. Álvarez-Gómez, P. Herrero-Barbero

Resultados de una nueva cartografía geológica de la falla de La Vall d´Uixó (Sierra del Espadán, Cordillera Ibérica). 784
P. P. Hernaiz Huerta, M. Ollé López, E. Masana Closa, H. Perea Manera

Análisis determinista de la respuesta sísmica en las Béticas Orientales (SE Iberia) a partir de la simulación de sismicidad sintética 788
P. Herrero-Barbero, J. A. Álvarez-Gómez, M. Tsige, J. J. Martínez Díaz

Tasas de deformación y cinemática de fallas en la Cordillera Bética Oriental (Murcia-Alicante, SE España) basadas en datos GNSS 789
N. Jacobo-Quiñones, G. Khazaradze, P. Alfaro, A. Gil-Cruz, I. Martin-Rojas, A. Staller

Estudio morfotectónico de la isla de Cefalonia (mar Iónico, Grecia) para identificar fallas activas capaces de generar grandes terremotos. 793
P. León, H. Perea, J. Molins-Vigatà y A. Canari

Formación experimental a velocidades sísmicas de espejos de falla en cataclasitas dolomíticas de la base del manto de Somiedo (Zona Cantábrica) 794
S. Llana Fúnez, N. De Paola, G. Pozzi, M.I. de Paz Álvarez y J.L. Alonso

Acortamiento activo simultáneo a un fallamiento normal: la Falla de Ventas de Zafarraya. 795
A. Madarieta-Txurruka, L. González-Castillo, J.A. Peláez, J. Galindo-Zaldívar, M. J. Borque, M.C. Lacy, A.M. Ruiz-Armenteros, J. Henares, P. Ruano, A. Sánchez-Alzola, M. Avilés, G. RodríguezCaderot, F.J. Martínez-Moreno, V. Tendero-Salmerón, R. Vinardell-Peña, A.J. Gil

Hacia la creación de un catálogo de fallas potencialmente activas para la aplicación práctica de la nueva normativa sismorresistente española (NCSR-23 / Eurocódigo-8) 796
R. Martín-Banda, A. Madarieta-Txurruka, V. Tendero-Salmerón, L. González-Castillo, J. Galindo-Zaldívar, O. Gómez-Novell, J. Molins-Vigatà, M. Ollé-López, M. Ortuño, J.J. Martínez-Díaz, I. Martín-Rojas, A. Echeverria, Á. González, J.L. Simón, J.T. Vázquez, F. Martín-González y J. García-Mayordomo

Estudio sismotectónico de la sismicidad de Laza (Ourense) y su relación con las estructuras sismogénicas 798
F. Martín-González, C. Crespo-Martín, P. Farias, R. Martín-Banda, N. Heredia

Evidencias cartográficas y de campo del inicio del régimen transpresivo en el sector Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia 799
J.J. Martínez Díaz, J. Alonso-Henar, J. A. Álvarez-Gómez, C. Canora, P. Herrero-Barbero, J.M. Insua-Arévalo, R. Pérez-López, E. Rodríguez-Escudero, J.L. Sánchez-Roldán y M. Tsige

Estudio preliminar de la prolongación de la Falla de Alhama de Murcia al NE del Valle del Río Segura como fuente sismogenética 800
J. J. Martínez Díaz, J. A. Álvarez-Gómez, P. Herrero-Barbero, O. Gómez-Novell, A. Staller y J. Portela

Estudio paleosismológico integral mar-tierra de la Falla de Carboneras (Mar de Alborán). 801
S. Martínez-Loriente, H. Perea, A. Canari, O. Gómez, X. Moreno, R. Pallàs, R. Bartolome, M. Ortuño, G. Khazaradze, J. Escartín, E. Masana, y E. Gràcia

Análisis de la influencia de los parámetros de falla en la modelización de tsunamis para fallas direccionales en la costa SO de Iberia. 802
S. Martínez-Loriente, M. Prada, J. Macías, C. Sánchez-Linares, B. Gaite, L.C. Puertas, I. Diéguez, y H. Perea

Caracterización de las fallas del Golfo de Valencia a partir de perfiles sísmicos 803
I. Martin-Rojas, E. Santamaría-Pérez, A. Ramos, M. De Ruig, I. Medina-Cascales, P. Alfaro

Evidencias de dislocación Holocena en la traza sur de la falla de Carboneras en La Serrata (Zona de Cizalla de las Béticas Orientales) 804
E. Masana, M. Ortuño, O. Gómez-Novell, R. López, S. Baize, T.K. Rockwell, J.M. Insua-Arévalo, G. Khazaradze, J. García-Mayordomo, R. Pallàs

Venturas y desventuras de la datación por luminiscencia para el estudio de fallas activas en Nueva Zelanda 805
A. Medialdea, M. Gonzalez-Santos, P. Villamor, K. Clark, D.J. Lowe

Caracterización de la Falla de las Moreras (Cordillera Bética Oriental) 806
I. Medina-Cascales, I. Martín-Rojas, F.J. García-Tortosa, A. Borrego, P. Alfaro

Análisis morfotectónico de la Falla de Palomares sobre modelos digitales de elevación procedentes de fotogrametría aérea histórica 807
J. Molins-Vigatà, X. Blanch, J.M. Insua-Arévalo, R. Martín-Banda, M. Ortuño, J. J. Gallego-Montoya, S. Baize, E. Masana y R. Pallàs

Estudio paleosismológico en la Falla de Palomares (SE península Ibérica): Nuevas evidencias de tectónica activa 808
J. Molins-Vigatà, J.M. Insua-Arévalo, R. Martín-Banda, M. Ortuño, J. J. Gallego-Montoya, S. Baize, E. Masana y R. Pallàs

Análisis de ruido sísmico para el despliegue de estaciones de la Red Sísmica de la Comunidad Valenciana 809
B.Y. Nassim-Benabdeloued, J.A. Jornet-Monteverde, J.J. Galiana-Merino, J. Delgado-Marchal, S. Molina-Palacios, J.L. Soler-Llorens

Actualización del estado de esfuerzos y de la deformación en Iberia....810
A. Olaiz, J.A. Álvarez-Gómez, G. de Vicente, A. Muñoz-Martín, J.V. Cantavella, S. Custódio, D. Vales y O. Heidbach

Caracterización de nuevos escarpes tectónicos en el margen occidental del Surco de Valencia 811
M. Ollé-López, J. García-Mayordomo y E. Masana

Edades de exposición del escarpe de la falla de Coronas (Pirineo Central) e implicaciones en su actividad reciente 812
M. Ortuño, T. Briceño-Sarmiento, M. Tompkins, A. Rodés, P. Figueiredo, M., Monterrubio-Velasco, P. Lacan, M. Guinau, R. Pallàs y E. Masana

Modelo de zonas sismogénicas para cálculos de peligrosidad sísmica en el Mar de Alborán: Una modificación del modelo ZESIS-2015. 813
H. Perea, J. García Mayordomo, M.J. Jiménez, M. García-Fernández, S. Martínez Loriente y A. Canari

Modelización cinemática de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales a partir de datos GNSS 814
J. Portela, A. Staller, M. Béjar-Pizarro, J.J. Martínez-Díaz, J.A. Álvarez-Gómez y G. Khazaradze

Análisis de la influencia del manto serpentinizado en la dinámica de terremotos de fallas inversas en el SO de Iberia....815
M. Prada, S. Martínez-Loriente, J.B. Ruh, V. Sallarès

Modelización de la posible ruptura de la Falla del Henares y escenarios sísmicos resultantes para el Terremoto de Complutum, s. IV CE (Madrid, España)....816
M.A. Rodríguez-Pascua, J. Elez, P. G. Silva, M.A. Perucha, J. L. Giner-Robles, E. Roquero, T. Bardaji, R. Pérez-López

Evidencias de un posible nuevo paleoterremoto en la ciudad de Cástulo (Alto Guadalquivir) en época tardorromana....820
M. Sánchez-Gómez, y J. Donaire-Ávila

Obtención de catálogos de terremotos mediante “machine learning” y aplicación al estudio de series sísmicas....821
J.L. Sánchez Roldán, J.A. Álvarez-Gómez y J.J. Martínez-Díaz

La falla de Alcoy: caracterización estructural y actividad reciente 822
E. Santamaría-Pérez, I. Medina-Cascales, P. Alfaro, M. De Ruig, I. Martin-Rojas

Análisis Arqueosismológico del Yacimiento Fenicio (Siglo VIII BCE) del Cabezo Pequeño del Estaño en Guardamar del Segura (Alicante, SE España). 823
P.G. Silva y F. Prados Martínez

Evidencias de reactivación de grandes paleo-deslizamientos co-sísmicos en El Salvador. 827
M. Tsige, J. Garzón, M. Rodríguez-Peces, V. Jiménez, J.J. Martínez-Díaz, I. García- Flores

Evidencias paleosísmicas de clustering entre rupturas de falla y erupciones volcánicas en el rift de Taupō, Nueva Zelanda, e implicaciones para la evaluación de la peligrosidad sísmica y volcánica. 828
P. Villamor, K. Berryman, N. Litchfield, D. Gomez-Ortiz, F. Martin-González, B. Alloway, K. Clark

Interacción entre las fallas de las Béticas Orientales a partir del modelado de transferencia de esfuerzos de terremotos históricos 829
P. Yazdi, J. García-Mayordomo

Peligros Geológicos y Procesos Geológicos Activos

Ejemplo actual de formación de un cañón en roca (La Cazuela de Ricobayo, NW de España) 830
L. Antón

Herramientas para analizar e interpretar de forma automática los productos del European Ground Motion Service: nueva versión mejorada de las ADATools....831
A. Barra, M. Cuevas-González, J. Navarro, P. Ezquerro, R. Palamà, M. Béjar Pizarro, R.M. Mateos, J. López-Vinielles, J. Rivera-Rivera, F. de-Urmeneta, C. Guardiola-Albert, O. Monserrat

Caracterización de procesos geológicos activos mediante datos InSAR, utilidad del servicio EGMS de Copernicus....835
M. Béjar-Pizarro, J. Rivera-Rivera, P. Ezquerro, G. Bru, D. Alfonso, J. López-Vinielles, C. Guardiola-Albert, H. Aguilera, R.M. Mateos, J.C. García-Davalillo, R. Sarro, M. Martínez-Corbella, O. Monserrat, A. Barra, M. Cuevas-González, J. Portela, A. Staller

Clasificación regional de acantilados costeros de Cantabria, España. 836
V. Bruschi, A. Rueda y A. Costales Llata

Detección de productos de la meteorización de la pirita mediante imágenes hiperespespectrales PRISMA en el río Odiel (Faja Pirítica Ibérica, España). 837
J. Buzzi Marcos, E. García-Meléndez, A. Riaza

Estimación de la peligrosidad a movimientos de ladera en la red de viaria de la provincia de Jaén 838
R. Carpena, I. Mellado, J. Calero, M. Sánchez Gómez, J. Tovar, T. Fernández

Optimización de las técnicas A-DInSAR para el análisis de procesos de gravedad en una zona costera sin reflectores naturales 839
J. Carrillo, M.J. Domínguez-Cuesta, F. Mateos, J. Cuervas-Mons, P. González-Pumariega, L. Rodríguez-Rodríguez, P. Valenzuela, D. Ballesteros, C. López-Fernández, L. Pando, A. Barra y M. Jiménez-SánchezJiménez-Sánchez, Montserrat.

Percepción del riesgo volcánico en comunidades cercanas a un campo volcánico monogenético: el caso de Olot (Campo Volcánico de la Garrotxa, Cataluña) 840
D. Cerda, A. Geyer, X. Bolós, D. Pedrazzi y J. Morin

Potencial y limitaciones del nuevo European Ground Motion Service (EGMS) en el análisis de inestabilidades a escala local 841
J. Cuervas-Mons, M. J. Domínguez-Cuesta y M. Jiménez-Sánchez

Caracterización geoambiental de suelos y sedimentos fluviales en el distrito minero abandonado de Hiendelaencina (Guadalajara). 842
C. de Ignacio-San José, S. Martín-Velázquez, T. Martín-Crespo, D. Gomez-Ortiz, I. Rodríguez-Santalla

El deslizamiento del Faro de Tazones (Costa Cantábrica, N España): seis años de monitorización 846
M.J. Domínguez-Cuesta, P. González-Pumariega, J. Cuervas-Mons, J. Carrillo, C. López-Fernández, P. Valenzuela, L. Rodríguez-Rodríguez, D. Ballesteros y M. Jiménez-Sánchez

Monitorización de los impactos sobre la gea de algunas carreras de montaña de los circuitos pedestre y ciclista 2023 en España 847
M. Faucha, A. Díez-Herrero, P. Tejedo, L. Carcavilla, K.P. Sandoval-Rincón, L. Navalón, D. Vázquez-Tarrío, J.A. Ballesteros-Cánovas y J. Benayas

Análisis de estabilidad de la ladera "el Feixolín" (Villablino, León) 851
J.A. Fernández-Merodo, J. López-Vinielles, J.C. García López-Davalillo, M. Hernández Ruiz, M. Martínez-Corbella, M. Ferrer Gijón, J. Mulas de la Peña

Evaluación de los peligros geológicos en la franja litoral catalana como herramienta para la prevención del riesgo 852
M. González, J. Pinyol, R. Carles, M.J. Micheo

Registro sísmico durante un año en el río Nalón (Asturias): > caudal, sedimento, viento y actividad antrópica 853
G. González-Rodríguez, D. Vázquez-Tarrío, E. Fernández-Iglesias, M. Fernández-García, L. Incera, R. Menéndez-Duarte, J.A. Pulgar, J.M. González, D. Pedreira

Importancia y significado petrológico y ambiental de las emisiones de SO2 durante una erupción basáltica en Centroamérica: el caso de la erupción del 29 de diciembre del 2013 del volcán San Miguel, El Salvador. 854
A. Hernández De la Cruz, D. Gimeno Torrente, V. Conde Jacobo, R. Olmos Guevara, F. Barahona Escoto y M. Hernández Martínez

Análisis de peligrosidad por flujos aluvionales del sitio geopatrimonial del pueblo minero de Puquios (desierto de Atacama, Chile) 858
T. Izquierdo, M. Cáceres, M. Soto y M. Abad

El riesgo de tsunamis en España, una aproximación pseudo-probabilista de impacto directo en el seguro consorciado. 862
M. Llorente Isidro, J. Macías, A. González, C. Paredes, M. Fernández-Hernández y J. García-Mayordomo

Resultado preliminar sobre la presencia de fluidos profundos en el sondeo Torr-1, asociados a una zona de falla activa. Falla de Alhama de Murcia (FAM) 863
J. López-Gutiérrez, JF. Mediato Arribas, JF. Fernández-Naranjo, P. Fernández-Canteli y R. Pérez-López

Acumulación de metales en niveles superficiales de suelo a partir de residuos de tostación de piritas (La Almozara, Zaragoza) 864
P.L. López Julián, Ó. Pueyo Anchuela, J. Martín-García, C. Revuelto Gimeno, J. Gracia Abadía, J. Ramajo Cordero, G. Jiménez, J. Sánchez, E. Mihi

Hidroquímica de las aguas subterráneas en el barrio de La Almozara (Zaragoza) 865
P.L. López Julián, Ó. Pueyo Anchuela, J. Martín-García, C. Revuelto Gimeno, J. Gracia Abadía, J. Ramajo Cordero, G. Jiménez, J. Sánchez y E. Mihi

Reclutamiento y transporte de material leñoso en una avenida súbita severa en el SW de la Comunidad de Madrid en septiembre de 2023 866
A. Lucía, K.P. Sandoval-Rincón, D. Vázquez-Tarrío, J. Garrote, M. Hernández-Ruiz, M.A. Perucha, A. Romero-Prados y A. Díez-Herrero

El papel del material leñoso en los Planes de Gestión de Riesgo de Inundación en España 867
A. Lucía, K.P. Sandoval-Rincón, D. Vázquez-Tarrío, J. Garrote, M.A. Perucha, M. Hernández-Ruiz, A. Romero-Prados, S. Cervel de Arcos y A. Díez-Herrero

Nueva caracterización del debris avalanche de Tenteniguada (Gran Canaria, España) a partir del análisis sedimentológico y estructural: mecanismos de propagación y emplazamiento. 868
S. Makris, M. Roverato, A. Lomoschitz, P. Cole, I. Manzella

"Modelización numérica del deslizamiento ""El Arrecife"" (Granada)" 872
M. Miangolarra, P. Mira y J.A. Fernández-Merodo

Modelo de Machine Learning para la elaboración de mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera en el Valle alpino de Pellice (Piamonte, Italia). 873
P.V. Miranda-García, J. Clemente y R. Sarro

Ciencia ciudadana en el análisis de peligros geológicos en el Área Atlántica 877
I. Montoya-Montes, I. Galindo, N. Sánchez, M. Jaud, N. Le Dantec, C. Pinto, M. A. Ferreira, K. Parker, K. Lemon, D. Rodrigues, F. P. Gouveia, L. Quental, E. Ramalho, P. Gonçalves, N. Cruz-Pérez, A. Ortega, E. Holohan, V. Correia, F. T. Jeremias y R. Carrilho Gomes

Análisis del Riesgo por Inundaciones Costeras ante la Subida del Nivel del Mar en la Ría de Arosa (Pontevedra, Spain) 878
C.E, Nieto, A. M. Martínez-Graña y B. Encinas

Volcanes monogenéticos del Campo Volcánico de la Garrotxa, Península Ibérica: análisis morfométrico, procesos eruptivos y peligros asociados 882
D. Pedrazzi, G. Kereszturi, A. Geyer, X. Bolós, J. Granell, L. Planagumà, J. Martí y D. Cerda

Detección de rayos cósmicos (muones) en cuevas con actividad tectónica. 883
R. Pérez-López, F.J. Fernández-Naranjo, A.L. Moreno-Castro, F. Gamero-Gómez, J. López-Gutiérrez, . García-Jaén, P. Fernández-Canteli, S. Martín-Velázquez y J.F. Mediato-Arribas

Deformaciones gravitacionales profundas de ladera en Sierra Nevada, Sur de España: nueva cartografía mediante integración de datos InSAR e índices geomorfológicos 887
C. Reyes-Carmona, J.P. Galve, J.V. Pérez-Peña, M. Moreno-Sánchez, D. Alfonso-Jorde, D. Ballesteros, D. Torre, J.M. Azañón y R.M. Mateos

Mapa Simplificado de Litologías Orientado a Procesos Geológicos de España. Escala 1:50.000. 888
J. Rivera-Rivera, M. Béjar-Pizarro, R.M. Mateos, P. Ezquerro, R. Sarro, M. Martínez-Corbella, H. Aguilera, C. Guardiola-Albert

Estudio forense de las inundaciones catastróficas ocurridas en el SW de la Comunidad de Madrid durante la DANA de septiembre de 2023: reconstrucción morfosedimentaria e hidrodinámica 889
K.P. Sandoval-Rincón, J. Garrote, D. Vázquez-Tarrío, A. Lucía, M. Hernández-Ruiz, M.A. Perucha, A. Romero, J.A. Ortega-Becerril y A. Díez-Herrero

Detección automática y caracterización de desprendimientos usando datos sísmicos continuos de una única estación. Validación conjunta con LiDAR y fotogrametría. 893
M. Tapia, M. Guinau, B. Telletxea, J. Martin, F. Meneses, M. Royán, X. Blanch, A. Abellán, D. Garcia-Sellés, G. Khazaradze, E. Suriñach y J.M. Vilaplana

Mapas de imagen en relieve rojo-azul y su aplicación a la cartografía de peligros geológicos. 894
G. Tomás, H. Perea y A. Canari

La lluvia como desencadenante de inestabilidades de ladera en el NO de la Península Ibérica ¿Qué sabemos? 895
P. Valenzuela, J. Remondo, M.J. Domínguez-Cuesta, S. Pereira, T. Vaz, T. Bornaetxea, V. Rivas, A. González-Díez, J. Bonachea, J.L. Zezêre, C. Bateira, J. Sánchez-Espeso, E. San Millán y L. Francos

Modelización morfodinámica y de transporte de material leñoso durante la avenida del 2019 en el río Francolí (Tarragona). 896
LL. Valera-Prieto, M. Sanz-Ramos, V. Ruiz-Villanueva

Paleontología y Patrimonio Paleontológico

Los icnofósiles de la mezquita-catedral de Córdoba: una herramienta excepcional para el conocimiento del Tortoniense de la franja Cuenca del Guadalquivir-Ossa Morena (España). 897
J. Aguilar de Dios, J. A. Gámez Vintaned, E. Liñán, M. G. Dies Álvarez y E. Mayoral

Un yacimiento de preservación excepcional: El Cerro de los Batallones 901
P.M. Carro-Rodríguez, M.S. Domingo, J. Abella, Ó. Caballero-Chordá, J.L. Cantalapiedra, L. Domingo, S. Fraile, B.A. García Yelo, A.R. Gómez Cano, E. Galli, V. Hernández-Ballarín, D. Hontecillas, R. López-Antoñanzas, P. López-Guerrero, D.M. Martín-Perea, I. Menéndez, A. Oliver, A. Quesada, M. Ríos, Ó. Sanisidro, D. Sanz-Pérez, L.R. Sualdea, A. Valenciano, E. Cantero, M. Hernández Fernández, M.Á. Álvarez-Sierra, P. Peláez-Campomanes, J. Morales

Paleodiversidad y bioestratigrafía de trilobites del Marianiense (Serie 2 del Cámbrico) de la Zona de Ossa-Morena, SO de Iberia 902
L. Collantes

Aplicación de métodos geoquímicos para reconstruir la evolución paleoambiental del yacimiento de La Pedrera de Meià (Montsec) 903
A. Gil-Delgado, D. Cruset, O. Oms, E. Botero, J. Ibáñez-Insa, X. Delclòs, A. Sellés, À. Galobart y R. Mercedes-Martín

Registro paleontológico de las facies lacustres-palustres de la sección de Cucho, Mioceno (Cucho-Trebiño, Cuenca Miranda-Trebiño) 904
Z. Larena, J. Sanjuan, A. Pascual, M. Larraz, A. Valenzuela, C. Arenas, X. Murelaga y J.I. Baceta

Nanofósiles calcáreos del Eoceno de la Formación Arenisca de Sabiñánigo en la Cuenca de Jaca (Cuenca Surpirenaica central) 908
E. R. Lasluisa, O. Oms, E. Remacha, A. González-Lanchas, H. Blanchar-Roca, M. Alonso Garcia y J. Abel Flores

Conservación excepcional de las conchas cretácicas de bivalvos de agua dulce de Ariño (Teruel) 909
R. P. Lozano, G. Delvene, M. Munt, E. Espílez and L. Mampel

Sesgo tafonómico en la silicificación selectiva registrada en lumaquelas cámbricas de las Cadenas Ibéricas, NE España 910
B. Martínez-Benítez, J. Esteve y J. J. Álvaro

New human footprints in the Middle Pleistocene of Doñana (Huelva, Spain) 911
E. Mayoral, J. Duveau, I, Díaz Martínez, A. Rodríguez Ramírez, J. A. Morales, R. Díaz Delgado, A. Gómez Olivencia y A. Santos

El legado micropaleontológico del Dr. Ramírez del Pozo en el Museo Geominero (CN IGME-CSIC) 915
S. Menéndez, C. Herrero e I. Díaz

Descubrimiento del primer trilobites en el Ordovícico de Andorra. 916
S. Pereira, J. Colmenar y G. Silvério

La fauna de gasterópodos del Devónico inferior de la costa asturiana (Zona Cantábrica). Resultados preliminares 917
M. Ramos Sarralde, A. Santos

Bioestratigrafía del Luteciense – Bartoniense (SBZ 16 – 17) en el flanco oeste del anticlinal de Boltaña (cuenca de Jaca-Pamplona, Zona Surpirenaica) 921
R. Silva-Casal, P. Arbués, A. Vinyoles, M. López-Blanco, M. Garcés, L. Valero, E. Beamud, P. Santolaria

Micro-fluorescencia de rayos X y su incorporación a estudios paleontológicos 922
R. A. Tagle, y A. H. Menzies

Nuevas Perspectivas y Hallazgos en Macroforaminíferos Hialinos del Cretácico Superior a través del Proyecto IBERINSULA y ForamLab 925
V. Vicedo y R. Robles-Salcedo

X CONGRESO GEOLÓGICO DE ESPAÑA. SIMPOSIOS

La Cartografía Geológica como base para la investigación básica y aplicada a Ciencas de la Tierra

Actualización del mapa geológico de Cataluña: Estrategia, metodología y resultados preliminares 926
J. Belenguer, R. Pi, G. Subiela, M. Vilà

Identificación de estructuras mayores usando la cartografía geológica: ejemplos de los orógenos cadomiense, varisco y alpino de Iberia 927
R. Díez-Fernández

La cartografía geológica: ¿una herramienta oxidada o con futuro? 928
P. Farias

La importancia de revisar, aumentar la escala y actualizar cartografías geológicas y geomorfológicas para la diagnosis de inestabilidades del terreno 929
J.P. Galve, D. Torre, C. Reyes-Carmona, D. Alfonso-Jorde, D. Ballesteros, M. Menichetti, D. Piacentini, F. Troiani, J.M. Azañón

Cartografía de fracturas superpuestas en un contexto poliorogénico. Fallas variscas y alpinas en el valle del Duje (Picos de Europa, Cordillera Cantábrica, NO de España) 930
B. Gonzalo-Guerra, N. Heredia, P. Farias, J. García-Sansegundo, F. Martín-González

La integración del IGME en el CSIC: Incertidumbres sobre el futuro del Servicio Geológico Nacional y la gestión de la Cartografía Geológica 931
P. P. Hernaiz Huerta

Nuevo mapa geológico de las rocas prevariscas de Andorra, Pirineos Centrales 935
A. Margalef, P. Clariana, J.M. Casas, J. García-Sansegundo

Análisis Cartográfico-Ambiental del Paisaje en el Parque Natural Arribes del Duero (España) 936
L. Merchán, M. Criado, A. Martínez-Graña y C. Nieto

Cartografía sistemática de unidades estratigráficas en las cuencas cenozoicas continentales españolas. Propuesta de nomenclatura para los nuevos mapas geológicos escala 1:200.000 de Madrid (45) y Segovia (38) 940
M. Montes, J. Luengo, y F. López Olmedo

Materiales geológicos y retención de humedad en suelos, influencia de la cubierta vegetal. Valoración utilizando drones y geotécnicas 944
C. Orts, J. Llinares, A. Marqués, L. García-España y MD. Soriano

El nuevo Mapa Tectónico de la Península Ibérica y cordilleras adyacentes: cuencas mesozoicas y cadenas alpinas 948
A. Pedrera, J. García-Senz, S. Mink, M. Druet, L.R. Rodríguez Fernández

El nuevo Mapa Tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes: El basamento de los macizos variscos. 956
F.J. Rubio Pascual, L.R. Rodríguez Fernández, L.M. Martín Parra, L. González Menéndez, G. Gallastegui, A.R. Solá, J.M. Romão, J. Matas, S. Mink, P. González Cuadra y R. Díez Fernández

Propuesta de un mapa de formaciones superficiales de España 960
A. Salazar, J.A. Díaz de Neira y J.A. Rodríguez

Ofiolitas de Iberoamérica

Ediacaran ophiolites from the SW Iberian Massif 961
R. Arenas, R. Díez Fernández, I. Novo-Fernández, R. Albert, E. Rojo-Pérez, S. Sánchez Martínez, N. Pujol-Solà, J.M. Fuenlabrada, C. Vérard, A. Gerdes, A. Garcia-Casco

El volcanismo del Plateau Oceánico Caribeño-Colombiano (CLIP) y su impacto paleoambiental durante los eventos OAE3 (Coniaciense-Santoniense): correlación directa mediante biocronología de radiolarios 965
P. O. Baumgartner, J. Escuder-Viruete, G. Andjić, C. Baumgartner-Mora

Clinopiroxeno neoformado en bloques de serpentinitas de canal de subducción, mélange de La Corea (Cuba oriental) 969
I.F. Blanco-Quintero, J.A. Proenza, J. Cárdenas-Párraga, A. García-Casco

Composición de la Cr-espinela en las peridotitas del macizo ofiolítico Mayarí-Cristal: implicaciones petrogenéticas 970
M. Castillo-Oliver, J. A. Proenza, C. Marchesi, N. Pujol-Solà, Y. Gréau, F. Gervilla, J. C. Melgarejo, A. García-Casco

Implicaciones tectónicas del complejo ultramáfico-máfico San Juan de Otates, Guanajuato (México) 971
V. Colás, N.A. Pineda-Rodríguez, J.M. González-Jiménez, C. Marchesi, J.A. Proenza

Registro de la evolución del antearco del Caribe (Cuba oriental y central) en cromititas ofiolíticas 972
D. Domínguez-Carretero, J.A. Proenza, F. Gervilla, V. Colás, C. Villanova-de-Benavent, N. Pujol-Solà, A. Garcia-Casco

Modelo geodinámico de la colisión arco-continente y de la inversión en la polaridad de subducción para el segmento de La Española de la Placa de Caribe septentrional 973
J. Escuder-Viruete, F.J. Fernández, F. Pérez Valera, M. Castillo-Carrión, P. Valverde-Vaquero, Y. Pérez, M.B. Roque

Evolución magmática de las rocas máficas en la ofiolita de la Península del Vizcaíno, Baja California Sur, NW de México: Un enfoque geoquímico y microestructural 977
L.J. Gutiérrez-Trejo, V. Colás, S. Piazolo, E. Fitz-Díaz, A. Ramírez-Salazar y E. Centeno-García

Geoquímica de la sección mantélica de la Ofiolita de Careón (NW del Macizo Ibérico): Procesos de fusión, metasomatismo e hidratación de una litosfera en evolución e implicaciones geodinámicas. 978
G. Iglesias, R. Arenas, I. Novo-Fernández, S. Sánchez Martínez y A. García-Casco

Evolución de la Ofiolita de Calzadilla (SO del Macizo Ibérico) desde su formación hasta su colisión 979
I. Novo-Fernández, A. Garcia-Casco, R. Arenas, E. Rojo-Pérez, N. Pujol-Solà, J.A. Proenza, R. Díez Fernández, A. Cambeses, S. Sánchez Martínez, G. Iglesias

Petrogénesis de las peridotitas mantélicas de las ofiolitas de Camagüey, Cuba 980
N. Pujol-Solà, M. Castillo-Oliver, J.A. Proenza, I. Novo-Fernández, D. Domínguez-Carretero, C. Villanova-de-Benavent, K. Núñez-Cambra, E. Piñero-Pérez, y A. Garcia-Casco

Cromititas en la base de la corteza oceánica, Camagüey, Cuba 981
C. Villanova-de-Benavent, D. Domínguez-Carretero, J.A. Proenza, C.F. Hernández-Fernández, N. Pujol-Solà, K. Núñez-Cambra, E. Piñero-Pérez, A. Garcia-Casco

Complejo máfico-ultramáfico Zumba (Ecuador), características, correlaciones e implicaciones geodinámicas 982
F. Villares, A. Nuñez y D. Narváez

Contribución de la Geología al estudio de la erupción de La Palma 2021

Los ojos de la erupción volcánica de La Palma....983
C. Camuñas, C. Lorenzo, J.C. García López-Davalillo, M. Hernández-Ruiz, A. Cabrera, E. Díaz-Losada, G. Lozano y A. Romero

Pronóstico de la duración de una erupción: La Palma 2021 987
M. Charco, P. J. González, J.L.G. Pallero, L. García-Cañada and C. del Fresno

Caracterización morfodinámica de las removilizaciones de tefra por flujos hídricos no newtonianos post-eruptivos en el Volcán de Tajogaite....988
A. Díez-Herrero, M. Hernández Ruiz, J. López Gutiérrez, J. Martínez-Martínez, J.F. Mediato, M.A. Perucha, J. Garrote, N. Sánchez, I. Galindo y J.H. Lorenzo

Monitorización continua de temperaturas en las coladas del Volcán de Tajogaite, Febrero 2023 - Diciembre 2023. 989
J.C. García-Davalillo, C. Camuñas, A. Castro, M. Hernández-Ruíz, D. Sanz-Mangas, J. López-Gutiérrez, I. Galindo y N. Sánchez

Cartografía prospectiva de temperaturas subsuperficiales del campo de lavas del Volcán de Tajogaite. 990
J.C. García-Davalillo, C. Lorenzo, J.A. Fernández-Merodo, A. Cabrera, C. Camuñas, M. Hernández-Ruíz, D. Sanz-Mangas, I. Galindo

Evaluación del impacto de la erupción volcánica de La Palma en 2021 en la calidad del agua subterránea: Parte I - Análisis hidráulico....991
A. García Gil, J. Jimenez, M.Á Marazuela, C. Baquedano, J. Martínez-León, S. Gasco Cavero, N. Cruz-Pérez, C. Laspidou, J.C. Santamarta

Evaluación del impacto de la Erupción Volcánica de La Palma en 2021 en la calidad del Agua Subterránea: Parte II - Análisis Hidroquímico....992
A. García Gil, J. Jimenez, S. Gasco Cavero, M.Á. Marazuela, C. Baquedano, J. Martínez-León, N. Cruz-Pérez, C. Laspidou, J.C. Santamarta

Monitorización petrológica de la erupción del Volcán de Tajogaite en 2021 (La Palma, Islas Canarias) 993
R. Herrera, A. Márquez, J. J. Coello-Bravo, T. Ubide, M.J. Huertas D. Sanz-Mangas, I. Galindo y E. Ancochea

Macrocristales de plagioclasa en la erupción de 2021 en La Palma: evidencias de incorporación sin-eruptiva de un mush evolucionado. 994
Y. Jegal, T. Ubide, M. J. Huertas, R. Herrera, E. Ancochea, J. J. Coello-Bravo, Á. Márquez

Impactos de la erupción volcánica de La Palma en 2021 sobre los recursos de agua subterránea. (Parte III): modelización geoquímica....995
J. Jimenez, A. García-Gil, S. Gasco Cavero, C. Baquedano, M.Á. Marazuela, J. Martínez-León, N. Cruz-Pérez, C. Laspidou, J.C. Santamarta

Propiedades magnéticas de los depósitos piroclásticos del volcán Tajogaite (La Palma, Islas Canarias) y su aportación al conocimiento sobre la evolución de la erupción de 2021....996
J. C. Larrasoaña, M. P. Mata†, J. I. Pérez-Landazabal, C. Gómez-Polo, E. Garayo, J. I. Espeso, A. López-Ortega, M. A. Rodríguez-Pascua, M. A. Perucha, J. Martínez-Martínez, R. Pérez-López, J. López-Gutiérrez, J. F. Mediato, J. Vegas, I. Galindo, N. Sánchez

Sedimentos detríticos de la plataforma insular en el oeste de La Palma (Tazacorte) asociados a la erupción volcánica de Tajogaite en 2021. 997
M.A. López-Rodríguez, I. Menéndez y J. Mangas

Evaluación del impacto en las aguas subterráneas del dióxido de carbono emitido en la erupción del Volcán de Tajogaite (La Palma) 998
R. Marrero, M. Mejías, J. Jiménez, T. Peinado, M.A. Fernández, M. Meléndez, C. Camuñas y F. Lorenzo

Mediciones de concentración de CO2 en el suelo, relación isotópica y reflujo para la exploración geotérmica en La Palma, Islas Canarias. 1002
A. Martín Lorenzo, K. Copete-Murillo, A. Reyes, A. Gironés, G.V. Melián, M. Asensio-Ramos, F. Rodríguez, E. Padrón, G.D. Padilla, P. A. Hernández y N. M. Pérez

Modelización termo-reológica de coladas de lava: erupción de La Palma 2021 (Islas Canarias). 1003
S. Martín-Velázquez, L. Antón y N. Sánchez

Aproximación preliminar a la biorreceptividad de lavas mediante parámetros petrofísicos en el contexto del volcán Tajogaite (La Palma, Islas Canarias). 1007
J. Martínez-Martínez, J. Vegas, E. Fernández de Arévalo, S. Gutiérrez-Patricio, B. Cubero-García, N. Jiménez-Morillo, J. López-Gámez, B. Martínez-Haya, A. Z. Miller

Primeros avances sobre la posible afección, tras la erupción del año 2021 en la zona de Cumbre Vieja, al agua subterránea de la isla de La Palma 1009
M. Meléndez Asensio, J. Jiménez Sánchez, T. Peinado Parra, F. Lorenzo García, R. Marrero Díaz, M.A. Fernández Jurado, C. Camuñas Palencia y M. Mejías Moreno

¿Podemos calibrar los modelos de flujos de lava más rápido que en tiempo real para facilitar la primera respuesta a una emergencia volcánica? 1014
C. Paredes, M. Marquez y M. Llorente Isidro

Primeros avances en el estudio de los isótopos estables de δ18O Y δ2H, sobre la posible afección, tras la erupción del año 2021 en la zona de Cumbre Vieja, al agua subterránea de la isla de La Palma. 1015
T. Peinado Parra, R. Marrero Díaz, J. Jiménez Sánchez, M.A. Fernández Jurado, M.L. Meléndez Asensio, C. Camuñas Palencia, F. Lorenzo García, M. Mejías Moreno

Emisión de radón durante la erupción de Cumbre Vieja (2021) medido en los tubos volcánicos de San Juan. 1019
R. Pérez-López, O. Fernández-Lorenzo, D. Sanz-Mangas, S. Palanco, I. Galindo, J. López-Gutiérrez, A. Bernal, B. del Moral, J. F. Mediato, E. Bellido, N. Sánchez, S. Sánchez-Moral, A.Z. Miller, Á. Fernández-Cortés

Estudio preliminar de la mineralogía y geoquímica de s-estalactitas de azufre post-eruptivas en el Volcán de Tajogaite (La Palma) 1020
R. Pérez-López, F.J. González, B. Ordóñez, B. Rincon-Tomás, E. Bellido, B. del Moral y E. Santofimia

Evolución morfométrica del cono monogenético de Tajogaite durante la erupción de La Palma (2021). 1024
R. Pérez-López, P.G. Silva, D. Sanz-Mangas, P. Ezquerro, G. Bru, M.A. Rodríguez-Pascua, J. Elez, J.L. Giner-Robles e I. Galindo

Evolución de las emisiones de SO2 en la erupción de La Palma (2021), una visión desde la teledetección por satélite (Sentinel 5-P). 1025
T. Pozo Mángas, J. Elez, Y. Sánchez-Sanchez, R. Pérez-López, M.A. Rodríguez-Pascua y J.L. Giner-Robles

Deformación dúctil-frágil superficial de la Falla de Mazo durante la erupción del Tajogaite 2021 (La Palma, Islas Canarias, España) 1026
M.A. Rodríguez-Pascua, R. Pérez-López, J.F. Mediato, J. Martínez-Martínez, M.A. Perucha, N. Sánchez, Y. Sánchez-Sánchez, J. López-Gutiérrez, I. Galindo, J. Elez

Las fallas activas responsables de la erupción del Tajogaite 2021 (La Palma, Islas Canarias, España) 1027
M.Á. Rodríguez-Pascua, R. Perez-Lopez, M.Á. Perucha, N. Sánchez, J. López-Gutierrez, J.F. Mediato, D. Sanz-Mangas, G. Lozano, I. Galindo, J.C. García López-Davalillo, C. Lorenzo Carnicero, M. Béjar

Movimiento de creep de las fallas activas de La Palma y su afección a las construcciones (Islas Canarias, España) 1028
M.A. Rodríguez-Pascua, M.A. Perucha, N. Sánchez, J. López-Gutiérrez, R. Pérez-López, I. Galindo, M.T. Pedrosa-González

Las coladas de lava de los centros eruptivos periféricos de la erupción de 2021 de La Palma (Islas Canarias): vulcanología y petrología. 1029
M. Ruiz de Galarreta, A. Márquez, M.J. Huertas, M. Diez, E. Ancochea, J.J. Coello-Bravo, R. Herrera y T. Ubide.

Evolución de los deltas de lava durante la actividad volcánica de 2021 en La Palma (Islas Canarias). 1030
L. Sáez-Gabarrón, I. Galindo, D. Sanz-Mangas, J. Vegas, J.C. García-Davalillo, M. Hernández, R. Pérez-López, C. Camuñas, C. Lorenzo Carnicero, M.A. Rodríguez-Pascua, M.A. Perucha, J. López Gutiérrez, G. Lozano, N. Sánchez

Composición modal de las lavas de la erupción del Volcán de Tajogaite (La Palma 2021) 1031
D. Sanz-Mangas, E. Ancochea, M.J. Huertas, R. Herrera, A. Márquez, J.J. Coello-Bravo y T. Ubide

Análisis de las estructuras de inflación-deflación asociadas a tubos lávicos de la erupción del Volcán de Tajogaite (La Palma, 2021). 1036
D. Sanz-Mangas, I. Galindo, O. Fernández Lorenzo, J. Vegas, R. Pérez-López, J.C. García-Davalillo, M. Hernández, C. Camuñas, J. López-Gutiérrez, Lorenzo. C, N. Sánchez.

Apertura de centros emisores fisurales secundarios en la erupción de La Palma en 2021 1037
D. Sanz-Mangas, I. Galindo, R. Pérez-López, M.A. Rodríguez-Pascua, J. Vegas, M.A. Perucha, J.C. García-Davalillo, M. Hernández, C. Camuñas, C. Lorenzo, J. López-Gutiérrez, J. Mediato, R. Marrero y N. Sánchez

Cartografía geológica del campo de lavas del Volcán de Tajogaite (2021), La Palma 1038
D. Sanz-Mangas, G. Lozano, I. Galindo, J. Vegas, R. Pérez-López, J. López-Gutiérrez, J.C. García-Davalillo, M. Hernández, C. Camuñas, C. Lorenzo, M.A. Rodríguez-Pascua, M.A. Perucha, L. Sáez-Gabarrón y N. Sánchez.

Evolución submarina de los deltas de lava durante la erupción del año 2021 de la isla de La Palma 1039
J.T. Vázquez, M. Gómez-Ballesteros, O. Sánchez-Guillamón, J.A. Lozano-Rodríguez, R. Casillas, A. Brenes, M.J. Sánchez-García, M. García, D. Palomino, A. González-Vega, J.P. Martín-Díaz, C. Presas-Navarro, N. Sánchez, I. Galindo y E. Fraile-Nuez

Primera acción de geoturismo en el Volcán de Tajogaite. El sendero de Cabeza de Vaca, La Palma 1040
J. Vegas, I. Galindo y N. Sánchez

Migración, acumulación y expulsión de fluidos fríos (Cold Seeps) desde el subsuelo marino: registros, modelos e implicaciones

Interacción entre fallas, fluidos e hidratos de gas en el Margen Pacífico de la Península Antártica 1041
R. Arasanz, R. Urgeles, R. Bartolomé, L.F. Pérez, R. León

Modelización 3D de la distribución de hidratos de gas en el South Hydrate Ridge (prisma de acreción de Cascadia, costa afuera de Oregón) 1042
P. Cabello, M. Marin, T. Cassola, O. Falivene, M. Gil-Ortiz, L.M. Yeste, A. Agustí, R. Uranga, C. Berndt

Exploring the efficiency of anaerobic oxidation of methane as sink to hydrate-sourced methane.....1046
M. de La Fuente, S. Arndt, H. Marín-Moreno, T.A. Minshull y J. Vaunat

Sensibilidad de las Variables Oceanográficas en la Estabilidad de los Hidratos de Gas Marinos. Caso de estudio en los Márgenes Continentales de Europa 1047
R. León, L.F. Pérez, C. Guardiola-Albert y E. Nuñez-Varela

Evidencias geofísicas de un campo de volcanes de fango identificado recientemente en el sur del mar de Alborán (Mediterráneo occidental) 1048
L. Martí, W. Menapace, G. Lastras, H. Perea y los participantes en la campaña STRENGTH

Actividad episódica y estructura interna del volcán de lodo Ginsburg reveladas a través de un enfoque multidisciplinario 1049
W. Menapace, S. Xu, A. González-Lanchas, A. Asioli, R. Urgeles, H. Perea, A. Kopf

Nuevas evidencias geológicas y bentónicas ligadas a la actividad de expulsión de fluidos del volcán de fango Anastasya en el campo somero de expulsión de fluidos del golfo de Cádiz 1050
D. Palomino, A. Mateo-Ramírez, M. Gallardo-Núñez, I. Villar, M. García, J. Urra, O. Utrilla, C. Farias, A. Rodríguez-Rua, J.L. Rueda

Geomorfología y señales acústicas en el sistema hidrotermal del montículo Calent al sur de las islas Columbretes (Mar Mediterráneo occidental) 1054
D. Palomino, J.T. Vázquez, I. Baena, E. Fraile-Nuez, I.P. Díez-García, N. R. de la Ballina, A. González-Vega, M.P. Mata, S. Mallol, J.P. Martín-Díaz y D. Díaz

Primeras evidencias de escape de fluidos en la plataforma continental del golfo de Cádiz. 1058
M. Sayago, R. Jiménez-Romero, S. Román, A. Rodriguez-Rúa, I. Muñoz, C. Farias, E. González, J. Gil y L.M. Fernández-Salas

Hidratos de gas al norte de las Islas Shetland del Sur: ¿en estado transitorio o de equilibrio? 1062
R. Urgeles, R. León, R. Arasanz, L.F. Pérez, R. Bartolomé, J. García-Crespo, M.C. Fernández-Puga, T. Ortega, M. Giustiniani, U. Tinivella

Flujo de fluidos y lateral spreading, modelo acoplado morfo-geotécnico. 1063
M. Yenes, J. Nespereira, D. Casas

Antropoceno y actividad humana en el registro geológico

Señales Distintivas del Antropoceno en Sedimentos Costeros de la Ría de Muros (Noroeste de la Península Ibérica).....1064
M.A. Álvarez-Vázquez, R. Prego

Aportaciones al debate sobre el Antropoceno desde lo rural: Impacto de la agricultura en Las Tablas de Daimiel 1065
A. Celis, R. Mediavilla, J.I. Santisteban

Actuaciones desarrolladas en el Proyecto LIFE IP Duero para la recuperación de la MASb de Medina del Campo 1066
A. De la Hera-Portillo, R. Mediavilla, J. Heredia-Díaz, L. Moreno-Merino, H. Aguilera, M. Llorente-Isidro, C. Marcos, M. Gómez-Gamero, M.A. Sánchez, F.M. Rubio Sánchez-Aguililla, M. Rodrigo, A. García, B. Benjumea, A. González, J.M. Llorente, A. Romero

Historia de un colapso ecológico: las huellas isotópicas de la evolución reciente del Mar Menor (Murcia, SE España). 1067
M.S. Galofré Penacho, A. Delgado Huertas, A. Moreno Caballud, J. Pey Betrán, B.L. Valero Garcés

Análisis de los microplásticos de gran tamaño (>1 mm) en sedimentos recientes el estuario del Nalón (Asturias, N España) 1068
J. Gardoki, F. Bessa, A. Cearreta, A. García-Artola, J. Gómez-Arozamena, V. Villasante-Marcos

Desarrollo metodológico para la caracterización del régimen hídrico en humedales secos. Primeros resultados en la cuenca del Duero.....1069
J. Heredia-Díaz, A. Romero-Prados, L. Moreno-Merino, H. Aguilera, R. Mediavilla, M. Llorente-Isidro, A. De la Hera-Portillo

Las acequias de careo y su registro sedimentario. Un ejemplo de actividad humana en Sierra Nevada (España).....1070
R.M. Mediavilla, A. Ruiz Constán, A. González Ramón, C. Marín Lechado, J. Jódar, S. Martos Rosillo

Deposición de polvo sahariano en España: observaciones de la red DONAIRE-POSAHPI entre 2016 y 2023.....1071
J. Pey, B. Valero Garcés, I. de la Parra, D. Elustondo, N. Pérez, S. Castillo, J. Causapé, J.C. Larrasoaña, M.P. Mata Campo

Estructuras de adaptación al cambio climático: variabilidad espacial.....1072
J.I. Santisteban, R.M. Mediavilla, S. Martos Rosillo, A. González Ramón, A. Celis

Variabilidad de la composición isotópica (d13C y d15N) de la materia orgánica en lagos de altura en el Pirineo durante el último milenio.....1073
B. Valero Garcés, M. Galofré Penacho, M.P. Mata Campo, A. Vicente de Vera García

Evolución tectonotermal del Macizo Ibérico

U-Pb dating of garnet (LA-ICP-MS), reveals the oldest tectonothermal event in the Iberian Massif.....1074
R. Arenas, R. Albert, A. Gerdes, I. Novo-Fernández, E. Rojo-Pérez, S. Sánchez Martínez, A. Garcia-Casco, D. Moreno-Martín, R., Díez Fernández

El papel de las fallas tardías en la exhumación de rocas de alta presión Variscas (SO del Macizo Ibérico).....1078
R. Díez Fernández, I. Novo-Fernández, D. Moreno-Martín, R. Arenas, E. Rojo-Pérez, L. M. Martín Parra, J. Matas

Nd model ages of Iberian Cadomian sediments: a discriminator between two sedimentary basins in peri-Gondwana.....1079
J.M. Fuenlabrada, R. Arenas, M.F. Pereira, E. Rojo-Pérez, S. Sánchez Martínez, R. Díez Fernández

Desentrañando el estado térmico temprano de la zona de subducción Varisca: Unidades HP-HT de los complejos alóctonos del NO de Iberia.....1083
A. Garcia-Casco, I. Novo-Fernández, N. Pujol-Solà, S. Sánchez Martínez, G. Iglesias-Ruiz, R. Albert, A. Beranoaguirre, J.A. Proenza, I. Gil-Ibarguchi, R. Arenas

Nuevas evidencias de metamorfismo de alta presión en el Alóctono Inferior de Trás-os-Montes (N Portugal).....1084
J.I. Gil Ibarguchi, S. García de Madinabeitia, P. Puelles, M.L. Ribeiro

Condiciones de fusión parcial en gneises migmatíticos de la Unidad de Campo Maior (Arronches, Portugal).....1085
L. González-Menéndez, R. Díez Fernández, G. Gallastegui, D. Moreno Martín, M.F. Pereira

Reconstrucción de la historia del arco peri-Gondwánico cadomiense a partir de la deformación en el SW del Macizo Ibérico.....1086
D. Moreno-Martín, R. Díez Fernández, R. Arenas, E. Rojo-Pérez, I. Novo-Fernández, S. Sánchez Martínez

La zona de cizalla del Cañamares: interpretación cinemática de la fase D3 varisca en el extremo oriental del Sistema Central español (Zona Centroibérica).....1087
D. Moreno-Martín, C. Fernández, R. Díez Fernández y G. de Vicente

Evolución tectonotermal de la lámina de eclogitas del Devónico Inferior del Complejo de Cabo Ortegal (NO Macizo Ibérico).....1091
I. Novo-Fernández, R. Arenas, J.I. Gil Ibarguchi, R. Albert, A. Gerdes, S. Sánchez Martínez, R. Díez Fernández, A. Beranoaguirre, A. Garcia-Casco

Implicaciones de la discordancia Cadomiense en la estratigrafía del Supergrupo Beiras ("Dominio Esquisto-Grauváquico", Portugal).....1092
C.A.P. Meireles, P.F. Castro, N. Vaz, C. Ângelo, N. Ferreira, A.J.D. Sequeira, A.A. Sá

Homenaje a Juan Carlos Balanyá Roure: 40 años avanzando en el conocimiento de la geología del Arco de Gibraltar

Descompensación entre relieve y espesor cortical en las Béticas.....1093
J. M. Azañón, J.V. Pérez-Peña, G. Booth, J.P. Galve, J. Morales, D. Stich, F. L. Mancilla

U-Pb detrital zircon geochronological record of the Jubrique unit and the Maláguide complex (western Betics).....1094
A. Azor, A. Acosta-Vigil, C. Accotto, y N.J. Evans

La cara visible de los Arcos.....1098
J.C. Balanyá, I. Expósito, M. Díaz-Azpiroz, A. Jiménez-Bonilla

Tectónica extensional del Mioceno Superior en la costa norte de la provincia de Alicante (Cordillera Bética oriental).....1099
O. Bedmar, I. Medina-Cascales, M. De Ruig, A. Estévez, I. Martín-Rojas y P. Alfaro

Metamorfismo colisional en unidades nominalmente pertenecientes al Alpujárride inferior (Cordilleras Béticas).....1100
I.F. Blanco-Quintero, A. Martín-Algarra, J.M. González-Jiménez, A. Sánchez-Navas, D. Benavente, J.C. Cañaveras, A. García-Casco

Desde eclogitas a arañas: cómo la biogeodinámica desvela la paleogeografía del Mediterráneo occidental.....1101
G. Booth Rea, P. Mas-Peinado, J.P. Galve, O. Jiménez-Robles, J.M. Azañón y C.J. Garrido

Evolución térmica acoplada de la corteza inferior y el manto superior relacionada con extensión continental drástica durante el Pérmico (Cordillera Bética Occidental, S. España).....1102
J. Díaz-Alvarado, L. González-Menéndez, K. Hidas, A. Azor y A. Pedrera

Transpresión inclinada durante el emplazamiento mioceno de la Lámina Cabalgante de Alborán (Arco de Gibraltar occidental).....1103
M. Díaz-Azpiroz, J.C. Balanyá, M. Sánchez-Gómez, I. Expósito y A. Jiménez-Bonilla

Terminación oriental del escalón topográfico de Sierra Morena: reactivación tectónica y segmentación del relieve en el forebulge bético.....1104
I. Expósito, A. Jiménez-Bonilla, L. Granados, M. Díaz-Azpiroz, M. Delchiaro, J.L. Yanes, F. Moral, M. Della Seta y J.C. Balanyá

Evolución de la Cresta de Alborán y Cuenca Meridional de Alborán: implicaciones sobre la tectónica de indentación en el Mediterráneo Occidental.....1105
J. Galindo-Zaldívar, M. Sequeira, F. Estrada y G. Ercilla

Efecto de los procesos de captura fluvial en el relieve de Sierra Nevada.....1106
J.P. Galve, M. Viaplana-Muzas, C. Reyes-Carmona, J.V. Pérez-Peña, M. Ortuño, G. Booth-Rea, J.M. Azañón

Anomalías magnéticas y estructura cortical del límite meridional de la Cordillera Bética Central.....1107
L. González-Castillo, A.M. Blanco Coronas, J.A. Villada Palomo y J. Galindo-Zaldívar

Reactivación transpresiva de la falla de transferencia de Antequera.....1108
P.P. Hernaiz Huerta, J. García Senz, A. Pedrera

Dataciones U-Pb en circones de rocas metadetríticas y metaígneas de la sucesión superior del Complejo Nevado-Filábride (Cadena Bética, SE España).....1109
A. Jabaloy-Sánchez, C. Talavera, V. López-Sánchez-Vizcaíno, M.T. Gómez-Pugnaire, A. Martín-Algarra, J.M. Fernández-Soler, N. Joyce Evans

Geomorfología submarina de las plataformas adyacentes al Umbral de Camarinal (Estrecho de Gibraltar, sur de Iberia).....1110
M. Luján, P. Daguinos, F.J. Lobo, P. Le Roy, M. Achab y equipo científico de MORFEO

Geometría a gran escala del adelgazamiento dúctil del complejo Nevado-Filábride durante la tectónica extensional de las Cordilleras Béticas en el Mioceno medio y superior.....1111
J.M. Martínez Martínez

Subducción de segmentos oceánicos e inversión de sus márgenes conjugados en la Cordillera Bética.....1112
A. Pedrera, J. García-Senz, B. López-Mir, A. Ruiz-Constán, C. Marín-Lechado, A. Azor, J. Díaz-Alvarado, P.P Hernaiz Huerta, L. González-Menéndez, A. Ramos, C. Ayala, K. Hidas

El arco que quedó atrás.....1113
M. Sánchez-Gómez, L.A. Pérez-Valera,, J.J. Villalaín y F. Pérez-Valera

Paleomagnetismo, remagnetizaciones y rotaciones de eje vertical en la rama norte del Arco de Gibraltar. Nuevos enfoques y nuevos datos.....1114
J.J. Villalaín, P. Calvín, L.A. Pérez-Valera, V.C. Ruiz, A. Casas, T. Román, A. Crespo-Blanc y M.L. Osete

2º Simposio de Cuaternario Ibérico

Evidencias de un campo de bloques generado por tsunami en terrazas marinas del MIS 3 de la costa del Desierto de Atacama (norte de Chile).....1115
M. Abad, T. Izquierdo, N. Pereira, F. Ruiz, J. Rodríguez-Vidal

Características y procesos generales en cuevas con arte rupestre en el cantábrico: los casos de Lumentxa, Santimamiñe y Altxerri.....1116
M. Arriolabengoa, I. Intxaurbe, C. Pérez-Mejías, H. Cheng y D. Garate

Microsedimentología del Pleistoceno Superior en el abrigo de la Malia (Guadalajara, Iberia central).....1117
M. Arriolabengoa, N. Sala, A. Corral y A. Pablos

Middle Pleistocene hippopotamuses in the Guadalquivir River (southern Iberia).....1118
R. Baena, I.C. Guerrero, J.J. Fernández, C. López, P.G. Silva, J.C. Posada, F. Durán

Subsidencia tectónica cuaternaria de la costa de Granada (sur de España) mediante el estudio de cuevas kársticas 1125
D. Ballesteros, C. Pérez-Mejías, D. Moreno, M. Moreno-Sánchez, C. Reyes-Carmona, D. Alfonso-Jorde, J.M. Azañón, G. Booth-Rea, D. Torre, P.S. Jerez-Longres, J.V. Pérez-Peña, A. González-Ramón, H. Cheng, J.P. Galve y P. Ruano

Registro de los cambios del nivel del mar de los últimos 450ka en el litoral mediterráneo peninsular (España). The record of sea-level changes during the last 450ka in the Mediterranean peninsular coasts of Spain. 1126
T. Bardají, C. Zazo, J.L. Goy, J.L. Dabrio, J. Cristino, J. Lario

Registro de las inundaciones de los últimos 19.000 años a partir de espelotemas (Navarra). 1127
M. Bartolomé, J.L. Bernal-Wormull, M. Arriolabengoa, R. Giménez, J.M. Iturralde, R.L. Edwards, H. Cheng, M. Luetscher, H. Stoll, A. Moreno y G. Benito

Primeros datos de inclusiones fluidas de espeleotemas en cuevas del Pirineo Occidental: reconstrucción de temperatura desde la última deglaciación. 1128
J.L. Bernal-Wormull, A. Moreno, Y. Dublyansky, C. Spötl, R. Giménez, C. Pérez-Mejías, M. Bartolomé, M. Arriolabengoa, E. Iriarte, I. Cacho, L. R. Edwards y H. Cheng

Registro de un evento de alta energía en la planicie costera de Guardamar de Segura (Alicante, SE España). 1132
D. Bonomo, J. E. Tent-Manclús, J. Alcántara-Carrió, R. Portantiolo Manzolli, J. Jordá Guijarro, C. Arteaga Cardineau, J. Navarro Pedreño, M. Jordan, C.R. Narváez

Mejora de la gestión de un ecosistema agrícola semiárido mediante el mapeo digital de las propiedades del suelo: el caso de Salamanca (España) 1136
M. Criado, L. Merchán y A. Martínez-Graña

Datación mediante OSL de depósitos marinos Cuaternarios emergidos en la costa Cantábrica oriental. 1140
M. del Val, P. Bilbao-Lasa, M. Arriolabengoa, I. Álvarez, E. Iriarte y A. Aranburu

Variación de la tasa de incisión fluvial en la sub-cuenca central del Nalón, vertiente septentrional de la Cordillera Cantábrica 1141
FJ. Fernández, R. Menéndez-Duarte, D. Vázquez-Tarrío y A. Medialdea

Monitorización morfoestructural y térmica del hidrolacolito de Las Calderuelas (Parque Nacional de Guadarrama, Sistema Central) 1142
J. Fernández-Lozano, M. A. de Pablo-Hernández, R. M. Carrasco, V. Turú, R. L. Soteres, T. Karampaglidis, X. Ros, J.L. Granja-Bruña, F.J. Martínez-Moreno, A. Muñoz-Martín y J. Pedraza

Cambios ambientales e impacto humano durante el Holoceno Superior en el Malpaís de la Rasca, Tenerife (Islas Canarias): integrando registros sedimentarios arqueológicos y naturales. 1143
E. Fernández-Palacios, N. Égüez, R. Casillas-Ruiz, B. Valero-Garcés, P. Cruzado-Caballero, I. Armenteros-Armenteros, M.C. Martín-Luis, A.V. Herrera-Herrera, C. M. Hernández, C. Mallol, y M. Jambrina-Enríquez

La falla activa de la Solana del Zamborino (Cuenca de Guadix-Baza, S España) 1144
F.J. García-Tortosa, I. Medina-Cascales, I. Martin –Rojas I., P. Alfaro, J. Ronda-Palacio, C. Duross

Reconstruyendo los cambios recientes submareales en la zona interior de la Ría de Vigo (NO España) mediante foraminíferos bentónicos y geoquímica orgánica 1145
J. Gardoki, A. Cearreta, A. García-Artola, J. Gómez-Arozamena y V. Villasante-Marcos

Posible Licuefacción inducida por actividad explosiva freatomagmática en el Valle del Júcar (Cofrentes, Valencia) 1146
J.L. Giner Robles, J. Elez, P.G. Silva, R. Pérez-López, M.A. Rodríguez-Pascua, F. Tapias, E. Roquero, Y. Sánchez-Sánchez

Geomorfología Tectónica de la Falla de Lobios-Gerês (Ourense, NW España) 1147
Y. González-Conde, P.G. Silva, J. Elez

La cueva de Ostolo (Navarra): 19.000 años de historia climática 1151
J. M. Iturralde, J. L. Bernal-Wormull, A. Moreno, M. Arriolabengoa, C. Spötl, E. Iriarte, B. Oliva-Urcia, H. Cheng, R.L Edwards y M. Bartolomé

El registro lacustre Holoceno en La Vega Lagunera (Tenerife, Islas Canarias). 1152
M. Jambrina-Enríquez, I. Armenteros-Armenteros, M.C. Martín-Luis, R. Casillas Ruiz y B. Valero-Garces

El registro lacustre Holoceno en la Playa de Taburiente (P.N. Caldera de Taburiente, La Palma, Islas Canarias). 1153
M. Jambrina-Enríquez, J. Vegas, R. Casillas Ruiz, A. Diez-Herrero, M.C. Martín-Luis, A. Herrera-Herrera, N. Egüez, B. Valero-Garces

El yacimiento paleolítico del Pleistoceno superior de la sala de la Natividad de la cueva de El Cierro (Fresnu, Ribadesella, Asturias): primeros datos 1154
J. F. Jordá Pardo, E. Álvarez-Fernández, L. Cabello, P. Carral, M. Cubas5, F. Cuartero, C. Díez, M. García-Capín, C. López-Tascón, A. Marchán, A. Martínez-Villa, C. Martínez-Varea, A. Maximiano, J. Molina, R. Obeso, J. Santa Eugenia, S. Vallejo y J.M. Vázquez-Rodríguez

Relación entre el CO2 del aire del suelo y de la cueva en la Cueva del Águila, España. 1155
K. Krklec, D. Domínguez-Villar

Evolución de la red fluvial en la Llanada Alavesa (Norte de la Península Ibérica, España)....1156
I. Martín-Martín, P. G. Silva, A. Tarriño, y F. Sarrionandia

Bailando en la oscuridad: la interpretación de las dataciones por OSL en sistemas kársticos 1160
A. Medialdea, J.M. Verges, M. del Val y M. González-Santos

Cambios hidroclimáticos del Holoceno en el Pirineo a partir de espeleotemas de cuevas....1161
A. Moreno, M. Bartolomél I. Cacho, H. Stoll, R.L. Edwards y H. Cheng

La "Superficie Pisoteada de Matalascañas". Un yacimiento icnológico excepcional del Pleistoceno Medio (Huelva, SO de España)....1162
F. Muñiz, C. Neto, L.M. Cáceres, M. Abad, T. Izquierdo, B. Joao, J.M. Galán, A. Toscano, P. Gómez, Z. Belaústegui, F. Ruiz, S. Ramírez-Cruzado, G. Finlayson, S. Finlayson, C. Finlayson, F. Giles, J. Rodríguez-Vidal y A. Medialdea

How sensitive is the microbial signature in environmental DNA (eDNA) to discriminate paleotsunamis on the Atacama Desert coast? 1163
R. Oses, P. Lavin, T. Izquierdo, M. Forch y M. Abad

Modelización 3D de los efectos arqueosismológicos registrados en el acueducto de romano de Baelo Claudia, siglo IV CE, Cádiz, España. 1170
Y. Sánchez-Sánchez, J. Elez, P.G. Silva, I. García-Jiménez, M. A. Rodríguez-Pascua y J. Giner-Robles

Caracterización multitécnica de alta resolución del primer registro sedimentario continúo obtenido en el yacimiento arqueo-paleontológico del Pleistoceno inferior de Barranco León (cuenca de Guadix-Baza, Granada 1174
A. Santamaría Barragán, J.M. Parés, S. Colino García, A. Churruca Clemente, T. Fujioka, A. Serrano Ramos, A. Álvaro Gallo, M. del Val, J. Iglesias, J. Jáimez, L. Miguens, S. Pla Pueyo, J. Revilla, C. Saiz, M. Toffolo, J.M. Jiménez y M. Duval

Evaluación de la dieta de Toxodon (Mammalia, Notoungulata) en el Pleistoceno de Argentina 1175
D. Sanz-Pérez, R. L. Tomassini, C. I. Montalvo, A. E. Zurita, M. Hernández Fernández, L. Domingo

Caracterización y procedencia del sílex del yacimiento arqueológico de Los Aljezares, Pleistoceno Superior (SE España) 1176
S. Savall, N. Méndez, J. Cuevas-González, D. Díez-Canseco y A. Eixea

Tectónica Cuaternaria en el Valle del Tajuña (Cuenca de Madrid, España): Aspectos Geológicos y Geomorfológicos. 1177
P.G. Silva, M.A. Rodríguez-Pascua, M.A. Perucha, A. Medialdea, Y. Sánchez-Sánchez, J. Elez, M.J. Muñoz Hernández, E. Roquero

Estructura tumular de La Llana de Hereña (Álava, País Vasco): ¿Antrópica o natural? 1181
A. Tarriño, I. Martín-Martín, L. Eguíluz, A. Bandrés, A. Lopetegi, A. Casas-Sainz, O. Pueyo, J.A. Mujika, J.J. Esteban, R. Jiménez-San Pedro y A. Pocoví

El sondeo de La Vega Lagunera (Tenerife, Islas Canarias): un nuevo registro paleoambiental y paleoclimático de > 400 ka.....1182
B. Valero-Garces, I. Armenteros-Armenteros, M.C. Martín-Luis, R. Casillas Ruiz y M. Jambrina-Enríquez

Polvo sahariano durante el Holoceno en los Pirineos occidentales y centrales: los registros de la turbera de Arxuri y el ibón de Marboré.....1183
B. Valero-Garces, J.P. Corella, D. Elustondo, M.P. Mata Campo, J. Santos-González, B. González-Gutiérrez, M. Galofré, B. Oliva y J. Pey

Cambios ambientales durante los últimos 40.000 años en el Mar de Alborán: magnetismo de rocas 1184
V. Villasante-Marcos, S. Beltrán de Heredia, F. Martínez-Ruiz, S. Casanova-Arenillas y F.J. Rodríguez-Tovar

Microesférulas de origen industrial en los sedimentos recientes de la Ría de Bilbao: caracterización magnética y microscopía SEM.....1185
V. Villasante-Marcos, M.J. Irabien, A. Cearreta y S. Beltrán de Heredia

Piedra Natural y Patrimonio Monumental

Deterioro y Preservación: Estudio de la Puerta de las Granadas. 1186
L. Alonso-Castillo, F. Prieto Ruiz, J. Pedregosa Pérez, A. Alonso-Jiménez y E. Álvarez Areces

Pizarras de La Baña (León), trascendiendo sus raíces tradicionales a su desarrollo comercial en la construcción 1187
A. Alonso-Jiménez, E. Álvarez Areces, Daniel León-González, M. Regueiro González-Barros y R. C. P. Santos

De la cantera a la obra: estrategias para la divulgación geológica y las rocas del patrimonio arquitectónico en el Camino de Santiago.....1188
E. Álvarez Areces y R. Jiménez Martínez

Explotación histórica de la piedra de Boñar (León). 1189
E. Álvarez Areces, M.A. Utrero Agudo, A. Alonso Jiménez, R.C.P. Santos, R. Andrés Bercianos

La piedra de Losacio y su utilización en el patrimonio arquitectónico de la provincia de Zamora....1190
R. Andrés-Bercianos y E. Álvarez-Areces

Las canteras históricas de piedra arenisca de Cartagena (Murcia). Un recurso patrimonial por descubrir 1191
J. A. Antolinos y B. Soler Huertas

La Geología. Una herramienta imprescindible en los trabajos de recuperación de los "paisajes de guerra". 1195
J.M. Baltuille Martín, P. Schnell Quiertant, F.J. Rubio Pascual, E. Álvarez Areces y J. Fernández Suárez

La técnica del análisis de cuencas visuales como complemento de los estudios de integración del patrimonio y la geología.
Un caso concreto: los observatorios del sector Peguerinos-Robledo de Chavela (1936-1939)....1199
J.M. Baltuille Martín, P. Schnell Quiertant, F.J. Rubio Pascual, J.R. Hernández Manchado, E. Álvarez Areces y J. Fernández Suárez

Caracterización de revestimientos cerámicos del patrimonio histórico: Plaza de España (Sevilla) 1203
C. Barba-Brioso, L. Toro, P. Campos, D. Martín, J. Delgado, A. Romero-Baena, A. Miras, P. Ortiz y I. González.

Cruces de piedra en la Galicia medieval 1204
S. Brangi

Patrimonio pétreo de la ciudad de Oviedo, Asturias 1208
V. Cárdenes, R. Navarro y F.J. Mateos

Evaluación de la variación composicional de rocas carbonáticas de uso ornamental mediante el empleo de técnicas espectroscópicas....1209
J. A. Cruz, I. Coronado Vila, M. Ferrer-Julià, A. Espín de Gea, E. Colmenero-Hidalgo, I. Pereira y E. García-Meléndez

La roca local y la singularidad del paisaje urbano: calizas de Bizkaia 1210
L. Damas Mollá, A. Aranburu, A. Bodego, M. Ladron de Guevara, J. Arbulu, A. Franco, A. Epelde, I. Antiguedad y J.A. Uriarte

El desaparecido monumento a Sorolla (Cabanyal, València) y su relación con la fachada de la Fábrica de Platería Martínez (Madrid)....1211
V. Escrivà, C. Marín y P. Pascual

Base de Datos del Inventario Nacional de Canteras Históricas asociadas al Patrimonio Arquitectónico de España. 1215
J. Fernández, E. Álvarez, J.M. Baltuille, J. Martínez y F.J. López.

Canteras históricas, petrografía, gliptografía y deterioro de los sillares en dos iglesias románicas de la Euroregión Galicia-Norte
de Portugal....1216
D.M. Freire-Lista, A. Ramil, A.J. López

La piedra de la muralla del castro de Monte Cildá: Investigación sobre su procedencia....1220
J.I. García de los Ríos Cobo

La influencia de la insolación en la distribución anisótropa del deterioro por cristalización de sales del patrimonio arquitectónico 1224
M. Gomez-Heras, L. López-González, M. T. Gil-Muñoz, D. Benavente y J. Martínez-Martínez

Granitoides utilizados en la ciudad de Salamanca: contraste geológico y papel desempeñado en su historia constructiva 1225
M. González Sánchez, F.J. López-Moro, M. López-Plaza, A. C. Íñigo Íñigo y J.I. García de los Ríos Cobo

Rocas vaugneríticas utilizadas en el Renacimiento y Barroco de la ciudad de Salamanca: singularidad geológica y patrimonial 1226
M. González Sánchez, F.J. López-Moro, M. López-Plaza, A.C. Íñigo Íñigo y J.I. García de los Ríos Cobo

Cambiando paradigmas en el NW peninsular: geología, arqueología y arqueometría del mármol de Gondrame....1227
A. Gutiérrez García-M., M.C. Savin, S. González Soutelo, I. Pianet, M. Brilli y M.P. Lapuente Mercadal

El "lapidario" del Camino de Santiago en el CN IGME-CSIC: un muestrario petrológico del Camino Francés. 1228
R. Jiménez Martínez, E. Álvarez Areces y R. González Laguna

Los recursos geológicos de la ciudad romana de Segobriga: Las canteras urbanas y las canteras de Diana....1229
R. Jiménez Martínez, J. Luengo, J. Martínez-Martínez y R. Cebrián

Caracterización geológica de los granitos de Cardeñosa utilizados en los monumentos de Ávila: elemento clave para geoturismo....1230
F.J. López-Moro, M. López-Plaza y J.I. García de los Ríos Cobo

Las canteras históricas de granito de la zona de Cardeñosa (Ávila): tipos, distribución, técnicas de corte y potencial geoturístico....1231
F.J. López-Moro, M. López-Plaza y J.I. García de los Ríos Cobo

Localización y contextualización de las canteras históricas de las calizas coloreadas de Espejón (Soria) 1232
J. Martínez-Martínez, J.F. Mediato y V. García-Entero

Recursos geológicos a lo largo del tiempo para construir una villa: el ejemplo de la villa romana de Noheda (Cuenca).....1233
J. Martínez-Martínez, D. Sanz, N. Valverde y M.A. Valero

Guía de rocas -petrología y cromática- 1234
R. Meseguer Mayoral y E. Álvarez Areces

Enfoque interdisciplinar de los factores de deterioro y condiciones microclimáticas de la Catedral de Cádiz.....1238
E. Molina-Piernas, M.J. Pacheco-Orellana, A. Sánchez-Bellón, F. Ladrón de Guevara, V. González Pérez, A. Sánchez Casas, J. Martínez-López, y S. Domínguez-Bella

La caliza de Sierra Elvira en la arquitectura de Granada (siglos XVI-XIX): significado histórico y potencial geoturístico.....1239
M. Naranjo-Marrero, R. Navarro-Domínguez y G. García-Contreras Ruiz

Análisis preliminar de los litotipos y la calidad del yeso sacaroideo/alabastrino como roca ornamental en Los Gallardos (Almería) 1243
R. Navarro Domínguez y J. Gisbert Aguilar

Las calizas de Rodadero de Lobos (Córdoba, España). Análisis de los frentes de cantera y caracterización arqueométrica de las rocas localizadas en el Cortijo Piquín 1247
E. Ontiveros Ortega, M.L. Loza Azuaga, J. Beltrán Fortes, J.C. Moreno Escribano, A. Monterroso Checa y D. Becerra

Explotación potencial de las proximidades de la cantera histórica de Sierra Elvira (Granada) para recuperar la fabricación local de conglomerantes hidráulicos naturales.....1248
C. Parra Fernández, J. Porta Igual, S. Morales Ruano, G. Cultrone y A. Arizzi

Interaction between cultural heritage and the surrounding natural environment: Analysis with 3D models and software tools.....1249
R. Rocca

Ruta del "mármol" de Monreal: un viaje desde un fondo marino con esponjas del Cámbrico a un cancel visigodo en Salamanca 1253
M. Rodríguez-Martínez, I. Moreno González, S. Menéndez, R. Pérez Martín, A.P. Pieren Pidal, V. Corzo Varillas, E. Moreno-Eiris y A. Perejón

Interrelación de la Geología y el Paisaje con las construcciones defensivas del Frente de Madrid (1936-1939) en el Subsector Peguerinos-Robledo de Chavela (Sistema Central Español). 1257
F.J. Rubio Pascual, J.M. Baltuille Martín, P. Schnell Quiertant, E. Álvarez Areces y J. Fernández Suárez

Ciudad de Ouro Preto, Brasil: un patrimonio geológico, histórico y arquitectónico 1261
C. Santos, M.E.S. Souza, R.A. Marques, R.C.P. Santos, G.H.C. Melo y E.A. Areces

La piedra de las ruinas de la ermita de San Isidoro y San Pelayo (El Retiro, Madrid) 1262
D. Sanz-Arauz, S. López-Andrés, B. del Río-Calleja y M. Rodríguez-Escalante

La fachada de la Catedral de Murcia y sus canteras de extracción.....1266
Y. Spairani-Berrio, M. Galiana Agulló, J. Martínez Martínez, J.C. Cañaveras Jiménez, B. Soler Huertas, J.A. Huesca-Tortosa y J. Granados González

Estudio de los procesos de cristalización de sales en el Arco de Jamete de la Catedral de Santa María de Cuenca (España). 1267
E. Torrero, D. Sanz, F. Castilla y J. Martínez-Martínez

La Pedra Cabaleira: caracterización de una piedra de construcción vernácula en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel 1268
L. Trigos, M. Gomez-Heras, D. Ballesteros, y R. Vila

Geoenergía

Temperatura subterránea de la ciudad de Murcia. Usos potenciales para climatización con bomba de calor.....1269
M. Alcaraz, J. Hornero, F.J. Soto, T. Fernández y J. Suardiaz

Estimación del potencial geotérmico del Acuífero Terciario de la Cuenca de Madrid mediante modelado geológico 3D.....1270
J. Álvarez, V. Olgado y A. Arnáiz

Creación de valor en proyectos geoenergéticos mediante la digitalización, procesado e interpretación de datos históricos de sísmica de reflexión: Ejemplos en la Cuenca de Madrid.....1274
J. Álvarez, V. Olgado, C. Lupascu, O. Clauss y A. Arnáiz

Almacenamiento geológico de hidrógeno y aire comprimido: un recurso clave para la transición energética en España 1278
P. Banda y L. Valle

Evaluación integral del impacto de las heterogeneidades sedimentarias en yacimientos para un almacenamiento sostenible de gas: un enfoque de modelado numérico utilizando análogos aflorantes 1279
A. Blanco Pericana, P. Cabello, L.M. Yeste, Niklas Heinemann, R. Palomino, M.F. León, A. Martín-Monge, P. Olivier y C. Viseras

Atlas Europeo de Potencial de Geoenergías Sostenibles: una prioridad del Servicio Geológico para Europa (GSEU) 1280
P. Canteli, I. Herms, E. C. Ramalho, J. Carvalho, G. Arnó, N. Caldera, J. García-Crespo, E. Carrión

Almacenamiento subterráneo de H2 verde en yacimientos depletados de la Cuenca del Guadalquivir: Metodología de laboratorio. 1281
D. Chinchilla-Benavides, N. García-Mancha, S. Ledesma-Mateo, E. Berrezueta, JF. Mediato-Arribas, C. Yuste-Fernández, P. Mata-Campo

Mapa de conductividades térmicas a escala regional para geotermia somera considerando litología y profundidad del nivel freático. Estudio de la Comunidad Valenciana. 1282
C. de Santiago, A. Ramos, H. Van den Berg, T. Magraner y B. Badenes

Impacto de las características geológicas y de inyección en la evaluación de riesgos del almacenamiento geológico de CO2 en el acuífero salino de Lopín, España. 1286
S. Eguilior, A. Hurtado y F. Recreo

Nuevo modelo 3D de resistividades MT de la isla de Gran Canaria. Implicaciones respecto a su potencial geotérmico. 1287
A. García-Craviotto, J. L. Huedo, J. Torres, I. García, A. Olaiz, A. Ambrogio, G. Marro, A. Arnáiz

Modelización petrofísica 3D de las facies Buntsandstein de la Cuenca del Ebro para un proyecto CAC en Lopín (Zaragoza) 1291
J. García Crespo, I. Moreno González, J. F. Mediato Arribas, J. Martínez-Martínez, D. M. García Fernández-Valderrama, P. Fernández-Canteli Álvarez

Geotermia somera para las Islas Canarias: Proyecto SAGE4CAN - Electrificación Eficiente del Sector Térmico con Bombas de Calor Geotérmicas 1292
A. García Gil, J. Jimenez, M.A. Marazuela, C. Baquedano, J. Martínez-León, S. Gasco Cavero, N. Cruz-Pérez, E. Garrido Schneider, T. Alonso Sánchez, M.A. Rey Ronco, J.A. Sánchez-Navarro, A. Andreu Gallego, J.M. Tiscar Cervero, J.C. Santamarta

Análisis estructural de lineamientos en terrenos volcánicos mediante el uso de la técnica LiDAR aplicada a la exploración geotérmica 1293
P. Hernández, J. Álvarez, A. García, J.L. Huedo, J. Torres, A. Arnáiz

Interpretación geológica, geofísica y geoquímica en la cuenca de El Camp (Tarragona) para la evaluación del potencial geotérmico 1297
J. L. Huedo, A. García, M.V. Olgado, J. Torres, A. Oláiz, A. Arnáiz

Aplicación de Redes Bayesianas a la evaluación de riesgos del emplazamiento geológico de CO2 en Lopín, España. 1300
A. Hurtado, S. Eguilior y F. Recreo

Desarrollo de soluciones para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno en cavernas de sal (proyecto H2SALT). 1301
E. Larrondo, I. Santamaría, J.F. Mediato, E. R. Berrezueta, I. Velasco

Evaluación del potencial de almacenamiento geológico subterráneo de CO2 y energía en las plataformas continentales mediterránea y cantábrica: Proyecto SEASTORAGE 1302
A. Maestro, F. Bohoyo, M.G. García Rodríguez, B. Benjumea, M. Druet, P. Fernández-Canteli, J. García Crespo, J. García Mayordomo, E. Llave, C. Marín Lechado, R. Martín Banda, J. Martín León, J. Mediato, C. Rey Moral, A. Robador, M. Rodrigo, F.M. Rubio, A. Franco, J. García Portero, L. Cortés, S. Ledesma, F. Pángaro y I. Cameselle

Almacenamiento energético en acuíferos mediante sistemas de bombeo-inyección: aproximación al estudio del potencial en el norte de España. 1306
A. L. Marqués Sierra, P. Cienfuegos Suárez y I. Jares Salguero

Almacenamiento geológico de la energía: revisión de oportunidades. 1307
A. L. Marqués Sierra, P. Cienfuegos Suárez y I. Jares Salguero

Evaluación del sello del almacenamiento geológico de carbono de TarraCO2 en la parte sumergida del delta del Ebro 1312
A. Martín-Monge, Á. Carrasco Castro, M. Mañas Fernández, P. Lukito, M. Ron Martín, D. García Fernández-Valderrama y F. Pángaro

Caracterización de análogos de campo de la formación Arenas del Guadalquivir (Mioceno medio-superior) para almacenamiento geológico de H2 verde 1313
J. F. Mediato, S Ledesma, D. Chinchilla, F.J. Sierro, D. Fernández-Toledano, E. Berrezueta, C. Yuste, M.P. Mata

Cuantificación de porosidad de rocas mediante ADI y análisis del potencial como almacén de CO2 1314
S. Roces, M.J. Domínguez-Cuesta y E. Berrezueta

Evaluación geológica regional para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno en cavernas salinas 1315
S. Subías, A. Herra, J.L. Trigo, R. Pérez, A.M. García

¿Tiene la Sedimentología un papel en la transición energética? Una propuesta 1316
C. Viseras, P. Cabello, L. M. Yeste, J. Alcalde, M. López-Blanco, J. L. Cuevas, M. Gil-Ortiz, L. Caracciolo, F. De Mesquita Veloso, N. Heinemann, O. Falivene, A. N. Varela, E. Rua-Alkain, A. Blanco y J. Jaímez

Simposio PLANAGEO - Angola

Los estromatolitos paleoproterozoicos de la Formación Leba, Angola: un caso excepcional de conservación de la textura deposicional 1317
A.M. Alonso-Zarza, R. Martín-García, J. Fernández-Suarez, E. Merino-Martínez, J.L. García-Lobón, A. Rodríguez-Berriguete y A. Martín-Pérez

Mapas de potencial mineral en el sur de Angola: el primer enfoque de un mapa de prospectividad basado en datos y conocimiento adquirido en la región de Au-Fe del sur de Angola. 1318
M.J. Batista, I. Martín-Méndez, E. Merino-Martínez, C. Prazeres, I. Cuervo, J. Manuel, D. de Oliveira, J. F. Rodrigues y J.L. García-Lobón

Marco tectono-estratigráfico de las cuencas sedimentarias de Benguela y Namibe (SO Angola). 1319
M. Chamizo Borreguero, L. Pereira, J. Escuder Viruete, J. Da Cruz Correia, M. Gutiérrez-Medina, J. Buzzi Marcos, A.M.L. Victorino y J. Manuel

Magmatismo carbonatítico de Catanda (Angola): nueva edad mediante Ar-Ar y las implicaciones sobre su origen 1320
D. Chinchilla-Benavides, E. Merino-Martínez, M. Chamizo-Borreguero, P. Valverde-Vaquero, A. Beranoaguirre, J. Gabites y J. Manuel

Litoestratigrafía, estructura y geocronología U-Pb SHRIMP en zircón de las rocas metamórficas de la región de Namibe (suroeste de Angola): un fragmento del Escudo del Congo Suroccidental deformado durante la orogenia Eburneana 1321
J. Escuder-Viruete, L. Quintana, A. Beranoaguirre, P. Montero, J. Gabites, P. Valverde-Vaquero y A.M.L. Victorino

Petrología, fábrica estructural y geocronología U-Pb TIMS en zircón de las suites de granitoides de la región de Namibe (suroeste de Angola): registro de la evolución tectonomagmática Eburneana en el Escudo del Congo Suroccidental 1325
J. Escuder-Viruete, P. Valverde-Vaquero, A. Beranoaguirre, P. Montero y J. Manuel

Serie cartográfica de Rocas y Minerales Industriales de Angola. Resultados del proyecto CARMINA 1329
J. Fernández, J.V. Lisboa, M. Iglesias-Martínez, J.C. Gumiel, M.C. Feria, A. Francés, E. Merino-Martínez, J. Manuel y J.L. García

Evolución cortical del suroeste del Escudo de Angola: perspectivas de isotopos de U-Pb y Lu-Hf en circones de secuencias mesoproterozoicas 1333
E. Ferreira, J. Lehmann, J.F. Rodrigues, B. Hayes, E. Merino-Martínez, L. Milani, G. Bybee, T.M. Owen Smith, J.L. García Lobón, C. Tassinari, H. Ueckermann, K. Sato, P.B. Silva, J. Correia, J. Labaredas, L. Duarte, M.A. Molekwa, J. Manuel y A.M.L. Victorino

El Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO) 1334
J.L. García-Lobón, E. Merino-Martínez, J.F. Rodrigues, J. Fernández, J. Escuder-Viruete, E. Pereira, J. Carvalho, M.J. Batista, J.V. Lisboa, R. Martín-Banda, A. Frances, E. Ramalho, E. Ferreira, I. Martín-Méndez, C. Rey-Moral, M.C. Feria, T. Mochales, I. Cuervo, A.M.L. Victorino y J. Manuel

Teledetección aplicada a la cartografía litoestructural y de regolito del SO de Angola 1335
J.C. Gumiel, T. López-Bahut, R. Martín-Banda, L. Quental, I. Granado, J.F. Rodrigues, V. Figueiredo, A. Oliveira, J. Labaredas, J. Correia, L. Duarte y A. Francés

Construction aggregates potentiality in Humpata (Lubango region, Angola). 1336
J. V. Lisboa, A. Oliveira, J. Fernández, J. F. Rodrigues y J. Manuel

Posibles aplicaciones industriales de las arenas del Kalahari. 1337
J.V. Lisboa, A. Oliveira, J.F. Rodrigues, J. Fernández y J. Manuel

Preliminary study of quartz gravel and veins occurring in the Equimina region, Benguela (Angola): potential uses in industry. 1338
J.V. Lisboa, L. F. Pereira, A. Osório, J. F. Rodrigues, J. Fernandez, A. Oliveira y J. Manuel

Cartografía de la cuenca del Kalahari en el sur de Angola mediante métodos geofísicos aerotransportados y teledetección 1342
R. Martín-Banda, J.C. Gumiel, M.C. Feria, C. Rey-Moral, M.T. López-Bahut y A. Victorino

Exploración de recursos minerales en el Proyecto PLANAGEO (Angola) 1343
I. Martín-Méndez, E. Merino-Martínez, M.J. Batista, D. de Oliveira, C. Prazeres, M.C. Feria, J.L. García-Lobón y J. Manuel

Exploración regional con analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X (FRXp) de la región de Giraúl (Namibe, SW Angola). 1344
I. Martín-Méndez, E. Merino-Martínez, M.J. Batista, M.C. Feria, C. Prazeres, J.C. Gumiel, M. Iglesias-Martinez, J. Fernández, D. Chinchilla-Benavides, M. Gutiérrez-Medina, J. Buzzi-Marcos y J. Manuel

El Mapa Metalogenético preliminar del Sur de Angola a escala 1:1.000.000 1345
E. Merino-Martínez, M.J. Batista, I. Martín-Méndez, D. de Oliveira, M.C. Feria, C. Fortes, C. Prazeres, J. Buzzi-Marcos, D. Chinchilla-Benavides, J.L. García-Lobón y J. Manuel

Edades U-Pb en el sur del Escudo de Angola e implicaciones en la evolución del Complejo de Cunene durante el Mesoproterozoico 1349
E. Merino-Martínez, E. Ferreira, P. Valverde-Vaquero, J.F. Rodrigues, J. Escuder-Viruete, J.L. García-Lobón, A. Beranoaguirre, M.C. Feria, C. Rey-Moral, P.B. Silva, P. González-Cuadra, J.C. Sousa, J. Potti, J. Máximo, M. Gutiérrez-Medina, J.C. Gumiel, G. Galán, T. Mochales, J. Manuel, D. Cordeiro, C. Tassinari, P. Montero, K. Sato, J.M. Fuenlabrada y C. Galindo

Cartografía Geológica del Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO) 1350
E. Merino-Martínez, J.F. Rodrigues, J. Escuder-Viruete, R. Martín-Banda, A. Frances, M.C. Feria, M.T. López-Bahut, E. Ferreira, J.L. García-Lobón, J.C. Gumiel, I. Cuervo, A.M.L. Victorino y J. Manuel

Modelización magnética del Complejo de Cunene (SW Angola) 1354
T. Mochales, E. Merino-Martínez, C. Rey-Moral, A. Machadinho, J. Carvalho, P. Represas, J.L. García-Lobón, M.C. Feria, R. Martín-Banda, M.T. López-Bahut, D. Alves, E.C. Ramalho, J. Manuel y D. Cordeiro

El Complejo Calco-Alcalino de la Serra da Neve (SW Angola) – trabajos en curso....1355
C. Prazeres, M.J. Batista, R. Lopes, B. Barros, P. Ferreira da Costa, J. Labaredas, F. Guimarães, J.F. Rodrigues y D. Cordeiro

Investigación hidrogeológica en la provincia de Cunene en el contexto del proyecto PLANAGEO....1356
E.C. Ramalho, A. Francés, R. Martín-Banda, J.M. Llorente, T. Mateus, F. Monteiro Santos, I. Cuervo, J.L. García Lobón, V. Dala, M. Ditutala, A. Famorosa y A.M.L. Victorino

Homenaje a Fernando Bea: caracterización y modelización geoquímica de procesos magmáticos

Geoquímica isotópica (Sm-Nd) de pizarras devónicas de Menorca. Implicaciones para el magmatismo de la evolución del Paleo-Tethys 1357
R. Arenas, J.M. Fuenlabrada, C. Timoner, E. Rojo-Pérez

Estudio experimental de la estabilidad de circón supersolidus en sistemas máficos 1358
A. Cambeses, S. Chakraborty, F, Bea, C. Beyer, P. Montero, N. Pujol-Solá, I. Novo-Fernández, M.M. Repczyńska, L. Barcos, A. Garcia-Casco, J.F., Molina

Identificación de diversos protolitos de granitoides de la Zona Centro Ibérica meridional a partir de nuevos datos geoquímicos....1359
J. Errandonea-Martin, F. Sarrionandia, E. Roda-Robles, S. García de Madinabeitia, I. Garate-Olave, A. Alonso-Olazabal, L.A. Ortega, M. Carracedo-Sánchez y J.I. Gil Ibarguchi

Estudio teórico y experimental de la estabilidad subsólida de circón en sistemas ultramáficos 1360
A. Garcia-Casco, N. Pujol-Solá, I. Novo-Fernández, A. Cambeses, J.F., Molina, M.M. Repczyńska, L. Barcos, P. Montero, F. Bea

Identificación del origen del magmatismo post-colisional a través de enclaves microgranulares máficos y experimentos 1361
D. Gómez-Frutos, A. Castro

Isótopos de Hf–Sr–Nd en granitoides variscos postectónicos (Galicia, Noroeste de España). 1362
L. González-Menéndez, G. Gallastegui, A. Cuesta, P. Montero, F. Bea

Modelización geoquímica de procesos de fusión/refertilización en condiciones hidratadas y anhidras en rocas ultramáficas de la Ofiolita de Careón (NW del Macizo Ibérico)....1366
G. Iglesias, A. García-Casco, R. Arenas, I. Novo-Fernández y S. Sánchez Martínez

Interacción fluido-fundido-roca en la corteza profunda: evidencia textural y mineralógica....1367
J. F. Molina, P. Montero, F. Bea, F. Haissen, A. Cambeses, M. M. Repczynska, K. Itano, L. Barcos, I. Novo-Fernández, N. Pujol-Solá y A. García-Casco

Desmezcla de restitas y asimilación de metasedimentos biotíticos en el monzogranito de Navahonda, Batolito de la Sierra Norte de Sevilla 1368
J.A. Moreno, K. Domínguez, A. Castro, J.D. de la Rosa

Petrografía, composición y origen de los granófidos del dique de gabros toleíticos de Messejana-Plasencia....1369
D. Orejana, C. Villaseca, E. Losantos y P. Andonaegui

Granitos y pegmatitas de metales raros: problemas sobre su origen y posibles soluciones 1373
M. Pichavant

Estabilidad de circón en cromititas: un estudio experimental....1374
N. Pujol-Solà, A. Cambeses, A. Garcia-Casco, I. Novo-Fernández, J.F. Molina, M.M. Repczyńska, L. Barcos, P. Montero, F. Bea

Generación de fluidos metamórficos: Perspectivas desde experimentos de fusión por deshidratación e hidrotermales 1375
M.M. Repczyńska, J.F. Molina, A. Cambeses, P. Montero, F. Bea, K. Itano, N. Pujol-Solà, I. Novo-Fernández, L. Barcos, A. García-Casco

Combinación de procesos de fraccionamiento extremo con cristalización en desequilibrio en el sistema granito-pegmatita de Castillejo de Dos Casas (Salamanca).....1376
E. Roda-Robles, I. Garate-Olave, A., Pesquera, P.P. Gil-Crespo y J. Errandonea-Martin

Xenocristales de circón de la Isla de Pascua (Rapa Nui) revelan la actividad del hotspot desde el Jurásico medio. 1377
Y. Rojas-Agramonte, N. Pardo, D.J.J. van Hinsbergen, Ch. Winter, M.P. Marroquín-Gómez, Sh. Liu, A. Gerdes, R. Albert, Sh. Wu, A. García-Casco

Evolución de la sección de arco Ediacárico-Cámbrico preservada en el SW de Iberia (Complejo de Ossa-Morena).....1378
E. Rojo-Pérez, R. Arenas, J.M Fuenlabrada y R. Díez Fernández

Geocronología U-Pb (LA-ICP-MS) en circones del Ortogneis de la Magdalena: Edad de la unidad inferior del basamento Cadomiense en el Macizo de Mérida.....1379
S. Sánchez Martínez, R. Albert, R. Arenas, E. Rojo-Pérez, A. Gerdes, R. Díez Fernández

Características geoquímicas de los eventos volcánicos ácidos Misipienses de la Cuenca de Matachel (Zona de Ossa-Morena). 1380
F. Sarrionandia, J. Errandonea-Martin, E. Larrondo, M. Carracedo-Sánchez, L. Eguiluz y J.I. Gil Ibarguchi

Doble datación de circón, análisis de elementos traza e isótopos de O para descifrar erupciones explosivas-efusivas del Pleistoceno procedentes de un magma zonificado de una isla oceánica, Isla de Ascensión 1381
J.H. Scarrow, A.K. Schmitt, M. Danišík, K.J. Chamberlain, B.V. Davies, J. Rushton, R.J. Brown and J Barclay

Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of magmatism from the Sal-Boavista-Maio ridge (Cape Verde archipelago): temporal evolution of its mantle sources 1382
C. Villaseca, D. Orejana, M.J. Huertas, E. Ancochea, C. de Ignacio, M. García-Rodríguez, J.A. Moreno

Estudios de productividad y corrientes en el Mar interior de Maldivas (Océano Índico) basados en foraminíferos planctónicos.

Productivity and current intensity studies in the Maldives Sea (Indian Ocean) based on planktonic foraminifers.

M. Alonso-García[1,2], A. Cárdaba Bajo[1] M. Díaz Cenalmor[1], M. Herrero Simón[1], T. Rodrigues[2,3] y D. Oliveira[2,3]

1 Universidad de Salamanca, Departmento de Geología- Paleontología, Pza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca. montseag@usal.es
2 Centro de Ciências do Mar (CCMAR), Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal
3 Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Avda Alfredo Magalhães Ramalho 6, 1495-006 Lisboa, Portugal

Palabras clave: Foraminíferos planctónicos, Océano Índico ecuatorial, monzón.

Resumen

El archipiélago de Las Maldivas está compuesto por dos filas de atolones que encierran un mar interior somero (con profundidad máxima de 500 m). Este mar interior nos ofrece un escenario único para obtener sedimentos hemipelágicos con buena preservación y estudiar la influencia de los vientos monzonales en esta región. Los cambios en el monzón repercuten en los vientos, que en el archipiélago de Las Maldivas son más intensos durante el cambio del monzón de verano al de invierno (Octubre-Noviembre), desarrollándose los vientos del Oeste del Océano Índico ecuatorial o Wyrtki jets. Estos vientos producen una intensa corriente hacia el oeste, una mayor mezcla en la columna de agua y, por tanto, una mayor productividad primaria.

En este trabajo se presentan resultados del estudio de las asociaciones de foraminíferos en muestras de sedimento recientes y de interglaciales pasados para entender mejor cómo afecta la dinámica de los monzones al mar interior de Las Maldivas. Las muestras recientes nos indican que las corrientes cerca de los canales entre atolones son muy intensas y modifican las asociaciones de foraminíferos y otros organismos de modo que lo que se obtiene es una información modificada respecto a lo que se registra en el centro del mar interior donde el sedimento no está afectado por las corrientes. El estudio de la evolución de las asociaciones de foraminíferos en los periodos interglaciales de los estadios isotópicos marinos (MIS) 13 y MIS 11 nos muestra cómo evolucionaron las condiciones de estratificación/mezcla de la columna de agua.

Abstract

The Maldives archipelago is composed of two rows of atolls that enclose a shallow inner sea (with a maximum depth of 500 m). This inner sea offers us a unique setting to obtain well-preserved hemipelagic sediments to study the influence of monsoon winds in this region. Changes in the monsoon season imprint a strong impact on the winds, which most intense in the Maldives archipelago during the intermonsoon season (October-November), associated with the development of the equatorial Indian Ocean westerly winds or Wyrtki jets. Those winds produce an intense current towards West, intense mixing in the water column and, thus, enhance primary productivity.

In this work, results from the study of foraminiferal assemblages in recent and past interglacial sediment samples are presented to better understand how monsoon dynamics affect the inner sea of the Maldives. Recent samples indicate that the currents near the channels between atolls are very intense and modify the associations of foraminifera and other organisms, modifying the information obtained with respect to what is recorded in the center of the inner sea where the sediment is not affected by currents. The study of the evolution of foraminiferal assemblages during the interglacial periods of Marine Isotopic Stages (MIS) 13 and MIS 11 indicates the evolution of the stratification/mixing conditions of the water column.

Desarrollo de un USV para trabajos costeros.

USV development for coastal studies.

B. Y. N. Benabdeloued[1], J. L. Ronda[2], J. E. Tent-Manclús[3, 4], D. Bonomo[4] y J. Alcántara-Carrió[4, 5]

1 SISCOVA. Dpto. Física, Ingeniería de sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig (Alicante); nassim@ua.es
2 EXTOPOCIEN, Club de Espeleología, Villarrobledo 16, 02640-Almansa (Albacete); juanleronda@gmail.com
3 SISCOVA. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente y Universidad de Alicante, je.tent@ua.es
4 Instituto Multidisciplinario para el Estudio del Medio "Ramón Margalef", Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig (Alicante). davide.bonomo@ua.es
5 Dpto. Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid. javier.alcantara@uam.es

Palabras clave: USV, prototipo, fases desarrollo.

Resumen

Un USV (Uncrewed Surface Vessel o Unmanned Surface Vehicle) es un vehículo robótico que navega de forma remota desde la costa sin tripulación. El desarrollo y prueba de una plataforma tipo catamarán se describe en el trabajo Ronda et al. (2023a). En una primera fase, la navegación se controla con un telemando gobernando dos propulsores. Se capturan y registran coordenadas y profundidad mediante GPS y ecosonda y, al mismo tiempo, se lanzan los datos por bluetooth a la base de operaciones. Una segunda fase se implementa la representación del curso de la navegación en un ordenador portátil recibiendo las coordenadas por radiofrecuencia (433MHz). Se incorporan luces de navegación y unas rejillas protectoras en los propulsores descrito en Ronda et al. (2023b). En la última fase se instalan placas solares como apoyo energético y poder recuperar el USV, se incorporan una cámara de video frontal y otra subacuática, siendo visualizadas en un monitor, por radiofrecuencia a 5 GHz. Finalmente, el antiguo sonar monohaz Furuno es sustituido por uno más completo, el Lowrance 3 en 1. Tiene WIFI, el cual es utilizado como clonador de su pantalla y manejo remoto, a través de dispositivo Android con su aplicación. Es un prototipo en continua evolución que está sujeto a la incorporación de nuevos sensores.

Abstract

A USV (Uncrewed Surface Vessel or Unmanned Surface Vehicle) is a robotic vehicle that navigates remotely from the coast without a crew. The development and testing of a catamaran-type platform is described in the work Ronda et al. (2023a). In the first phase, navigation is controlled with a remote control controlling two thrusters. Coordinates and depth are captured and recorded, using GPS and echo sounder and, at the same time, the data is released via Bluetooth to the operations base. A second phase implements the representation of the navigation course on a laptop computer receiving the coordinates by radio frequency (433MHz). Navigation lights and protective grilles are incorporated surrounding the thrusters described in Ronda et al. (2023b). In the last phase solar panels are installed as energy support and to be able to recover the USV, a frontal video camera and another underwater one are incorporated, being displayed on a monitor, by radio frequency at 5 GHz. Finally, the old Furuno single-beam sonar is replaced by a more complete Lowrance 3 in 1. It has WIFI, which is used as a screen cloner and remote control, all through an Android device with its application. It is a prototype in continuous evolution that is subject to the incorporation of new sensors.

Agradecimientos: Proyecto: GVA-THINKINAZUL/2021/039

Referencias

Ronda, J. L., Benabdeloued, B. Y. N. y Tent-Manclús, J. E. (2023a). *Geogaceta* 74, 115-118.
Ronda, J. L., Benabdeloued, B. Y. N., Tent-Manclús, J. E. (2023b). *MARTECH 23 10th International workshop on marine Technology*, paper 42.

Introducción a POSIT: una herramienta innovadora para la detección y caracterización integral de *pockmarks* en el fondo marino y otras geomorfologías

Introduction to POSIT: an innovative tool for comprehensive detection and characterization of pockmarks in the seafloor and other geomorphologies.

A. Canari[1,2], S. Martínez-Loriente[1], E. Blázquez-Gómez[3] y J.J. Alonso del Rosario[4]

1 Dpto. Geociencias Marinas, Institut de Ciències del Mar – CSIC, 08003 Barcelona. acanari@icm.csic.es, smartinez@icm.csic.es
2 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. acanari@icm.csic.es
3 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos, 11510 Cádiz. elizabeth.blazquez@gm.uca.es
4 Dpto. de Física Aplicada, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos, 11510 Cádiz. josejuan.alonso@gm.uca.es

Palabras clave: código MATLAB, detección geomorfológica, batimetría de alta-resolución.

Resumen

Detectar y caracterizar con precisión las morfologías del fondo marino es crucial para la investigación marina, el monitoreo medioambiental y las industrias de exploración de recursos. POSIT (*Pockmark Signature Detection*) es una herramienta automatizada basada en MATLAB que utiliza técnicas matemáticas de convolución y correlación para identificar automáticamente una amplia gama de características morfológicas a partir de un elemento estructural predefinido. El programa localiza la morfología, proporcionando las coordenadas del centroide, los parámetros geométricos, y el margen de error. Dispone de dos métodos de búsqueda, el enfoque único o la fuerza bruta, en función de las necesidades del usuario. Hemos probado su eficacia tanto en datos sintéticos como reales, detectando una gran variedad de formas, desde *pockmarks* y pequeños montículos en datos batimétricos de alta resolución hasta cráteres volcánicos en un modelo digital del terreno de resolución moderada y cráteres lunares en una imagen digital. POSIT destaca por su avanzada capacidad para identificar una variedad de formas, incluso aquellas que son incompletas o ambiguas, así como por su habilidad para detectar morfologías no visibles. Además, se distingue por una amplia gama de datos de entrada desde modelos de elevación del terreno hasta imágenes digitales. Estas capacidades inherentes posicionan a POSIT como una herramienta pionera para la detección y análisis completos de formas, marcando un avance significativo en los estudios de morfologías del fondo marino.

Abstract

Accurately detecting and characterizing seafloor morphologies is crucial for marine research, environmental monitoring, and resource exploration industries. POSIT (Pockmark Signature Detection) is an automated MATLAB-based tool that uses mathematical convolution and correlation techniques to automatically identify wide range of morphological features from a predefined structural element. The tool locates the feature, providing the centroid coordinates, geometric parameters, and the working error. It has two search methods, single or brute force approaches, depending on the user's needs. We have tested its effectiveness on both synthetic and real data, detecting a wide variety of shapes, from pockmarks and small mounds in high-resolution bathymetric data to volcanic craters in a moderate-resolution digital terrain model and lunar craters in a digital image. POSIT is distinguished by its advanced ability to identify various shapes, even incomplete or open ones, by detecting non-visible features. In addition, it can analyze a broad range of input data from digital elevation models to digital imagery. These inherent capacities position POSIT as a pioneering tool for complete feature detection and analysis, marking a significant advancement in seafloor morphology studies.

Formación de *cyclic steps* en ambientes confinados y no confinados del Cañón de Carchuna (Mar de Alborán)

Cyclic step formation in confined and unconfined settings of the Carchuna Canyon (Alboran Sea)

J. Cerrillo-Escoriza[1,2], A. Micallef[3], F.J. Lobo[1], Á. Puga-Bernabéu[2], P. Bárcenas[4], I. Schulten[5], R. Durán[6], A. Carrión-Torrente[1,2], A. López-Quirós[2], M. Luján[7], O. Sánchez-Guillamón[4], M.J. Sánchez[8]

1 Department of Marine Geosciences, Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), 18100 Armilla, Granada. javier.cerrillo@csic.es; francisco.lobo@csic.es; alvct@iact.ugr-csic.es
2 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18002 Granada. angelpb@ugr.es; alquiros@ugr.es
3 Monterey Bay Aquarium Research Institute, 95039 California, USA. aaron.micallef@um.edu.mt
4 Centro Oceanográfico de Málaga, Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), 29640 Málaga. patricia.barcenas@ieo.csic.es; olga.sanchez@ieo.csic.es
5 Department of Earth and Environmental Sciences, Dalhousie University, B3H 4R2 Halifax, Nova Scotia, Canada. irena.schulten@dal.ca
6 Institute of Marine Sciences (CSIC), 08003 Barcelona. rduran@icm.csic.es
7 Department of Earth Sciences, CASEM – Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, 11519 Puerto Real. maria.lujan@uca.es
8 Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. mariajose.sanchez@ulpgc.es

Palabras clave: Cañón submarino, *cyclic steps*, saltos hidráulicos, procesos sedimentarios

Resumen

Datos de batimetría multihaz junto con perfiles acústicos, muestras de sedimento y la simulación 3D de flujo han hecho posible la caracterización de *cyclic steps* a lo largo del eje del canal y del lóbulo deposicional del cañón de Carchuna. El eje del canal alberga formas de fondo en media luna con distintas concavidades, asimetrías y longitudes, sugiriendo una variabilidad del flujo inducida por variaciones de la pendiente y/o por la concentración de los flujos sedimentarios. Fuera del canal, se observa una relación espacial entre el desarrollo de ondas de sedimento sobre un depósito de desbordamiento y la disminución de la altura del dique en coincidencia con una curva de dicho canal. La identificación de trenes de socavación indicaría la acción erosiva de flujos turbidíticos de alta energía que podrían exceder la cresta del dique en la curva del canal. Teniendo en cuenta esta arquitectura sedimentaria, pueden ser inferidos dos escenarios de comportamiento de los flujos sedimentarios. Bajo condiciones de corrientes de turbidez de alta densidad, la erosión prevalecería a lo largo del canal con desbordamiento generalizado en ambos diques laterales. Bajo condiciones de baja densidad, las corrientes de turbidez formarían lechos deposicionales en el canal, mientras los procesos de desbordamiento se focalizarían en la curva del canal.

Abstract

Multibeam bathymetry in combination with sub-bottom profiles, sediment samples and a 3D flow simulation enabled the characterization of cyclic steps along the axial channel and the depositional lobe of the Carchuna Canyon. The axial channel hosts crescent-shape bedforms with distinctive crest concavities, asymmetries, and lengths, suggesting flow variability induced by local variations of slope gradient and/or sediment concentrations. Away from the main channel, a spatial relationship is identified between the development of sediment waves over an overbank deposit and the decrease in the height of the levee coinciding with a pronounced curve of said channel owered levee crest heights at a major channel bend. Besides, scour trains developed downslope of the channel bend could be attributed to more energetic downstream turbiditic flows exceeding the levee crest at the channel bend and promoting erosion of the overbank deposit. The overbank deposition exhibits two alternating scenarios of flow behavior. In a high-density turbidity current setting, erosion would prevail along the axial channel with widespread spillover flows in both levees. In contrast, in a low-density setting, turbidity currents flowing along the axial channel would have formed bedforms, while spillover processes would be focused at the channel bend.

Tectónica de los márgenes continentales de la Península Ibérica y de las llanuras abisales adyacentes

Tectonics of the Iberian Peninsula continental margins and adjacent abyssal plains

M. Druet[1], F. Bohoyo[1], A. Maestro[1], S. Mink[1], J. García-Senz[2], A. Pedrera[2], R. Rodríguez-Fernández[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). C/ Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid). m.druet@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Subdelegación de Gobierno, Pza. de España – Torre Norte, 41013 Sevilla

Resumen: Se ha realizado un mapa tectónico a escala 1:1.750.000 que muestra una actualización del estado de conocimiento de las principales estructuras tectónicas y volcánicas a lo largo de los márgenes continentales y las llanuras abisales de Iberia. Las tendencias morfotectónicas registran la superposición de procesos geodinámicos relacionados con la apertura del Océano Atlántico Norte desde el Mesozoico y la evolución del Mediterráneo en el Cenozoico, así como la reactivación de fallas hercínicas y la formación de nuevas estructuras tectónicas durante la orogenia alpina. Este mapa se basa en la interpretación del modelo digital de la batimetría y otros datos geofísicos propios y de otros de diferentes autores. Los rasgos morfotectónicos de cartografiados ofrecen una base para el reconocimiento del control tectónico a escala de placa litosférica y para el establecimiento de zonas de potencial riesgo tectónico y volcánico.

Palabras clave: márgenes continentales ibéricos, llanuras abisales, dominios estructurales, estructuras tectónicas, morfologías volcánicas.

Abstract: *The tectonic map at scale 1:1,750,000 presented in this work shows an update of the existing knowledge of the main tectonic and volcanic structures along the Iberian continental margins and abyssal plains. The morphotectonic trends around Iberia recorded superposed geodynamic processes linked to the opening of the North Atlantic Ocean since the Mesozoic and the evolution of the Mediterranean Sea during the Cenozoic, as well as the reactivation of Hercynian faults and the formation of new tectonic structures during the Alpine orogeny. This map is based on the interpretation of the digital bathymetric model and other geophysical data from our own studies, and those from other authors. The morphotectonic features in this map provides a basis for the recognition of the tectonic control at lithospheric plate scale and the establishment of potential tectonic and volcanic risk zones.*

Key words: *Iberian continental margins, abyssal plains, structural domains, tectonic structures, volcanic morphologies.*

INTRODUCCIÓN

Los márgenes continentales de la Península Ibérica se extienden desde la costa hasta las llanuras abisales adyacentes (Fig. 1): la Liguro-Provenzal hacia el este (fuera de nuestra zona de estudio), la Algero-Balear hacia el sureste, las de Iberia, Tajo, Herradura y Sena hacia el oeste y el suroeste y la de Vizcaya hacia el norte. La morfología de los márgenes continentales ibéricos es resultado de la interacción de procesos tectónicos, sedimentarios y oceanográficos, siendo la principal responsable de su configuración actual la actividad tectónica desarrollada desde el final del Paleozoico (post-hercínico) hasta el Cenozoico, una vez que la orogenia alpina hubo finalizado.

El objetivo de este trabajo es presentar un mapa completo y actualizado de los márgenes continentales de Iberia y las llanuras abisales adyacentes.

DATOS Y METODOLOGÍA

Este mapa tectónico es una compilación, en un proyecto SIG, de rasgos tectónicos publicados previamente por otros autores en revistas, libros y tesis doctorales en diferentes sectores del área de estudio. En el caso de los rasgos tectónicos que tienen un reflejo en la morfológico, la cartografía se ha adecuado a batimetría. Además, se han revisado datos batimétricos, de sísmica de reflexión y de campos potenciales para mejorar la cartografía en aquellas zonas donde se carecía de cartografías previas para mejorar la cobertura de la cartografía tectónica que se presenta en este trabajo.

La base topobatimétrica empleada es la del proyecto EMODnet en las áreas marinas y la misión SRTM en tierra. Los perfiles sísmicos consultados provienen del Sistema de Información Geofísica del CN IGME-CSIC (https://info.igme.es/SIGEOF/) y del proyecto de la Zona Económica Exclusiva Española (ZEE). Los datos

de campos potenciales utilizados provienen del proyecto de la ZEE y el WDMAM (http://wdmam.org/).

Los rasgos tectónicos cartografiados están disponibles para su descarga en formato *shapefile* (http://hdl.handle.net/10261/288043), junto con un listado de referencias empleadas e información adicional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aunque la mayor parte de los rasgos tectónicos representados proceden de trabajos previos, se han revisado para verificar que se adaptan adecuadamente al relieve del fondo marino en el caso de que tengan un reflejo geomorfológico. En algunas regiones no hay trabajos previos de detalle. En esos casos, se ha realizado una interpretación conservadora a partir de la información geofísica disponible (batimetría, sísmica de reflexión y campos potenciales).

Para la delimitación de los diferentes dominios tectónicos descritos (Fig. 1), se han utilizado imágenes de trabajos previos, igualmente georreferenciadas. Se han digitalizado los diferentes dominios cotejando su correlación con los datos de campos potenciales disponibles y, en regiones donde no estaban cartografiados estos dominios, se ha dado continuidad a la cartografía atendiendo a la información batimétrica y de campos potenciales.

El mapa tectónico resultante (Fig. 2) ofrece una base para el reconocimiento de los principales rasgos morfotectónicos a escala de placa litosférica, y puede ser de gran utilidad como base de otros trabajos geológicos y geofísicos.

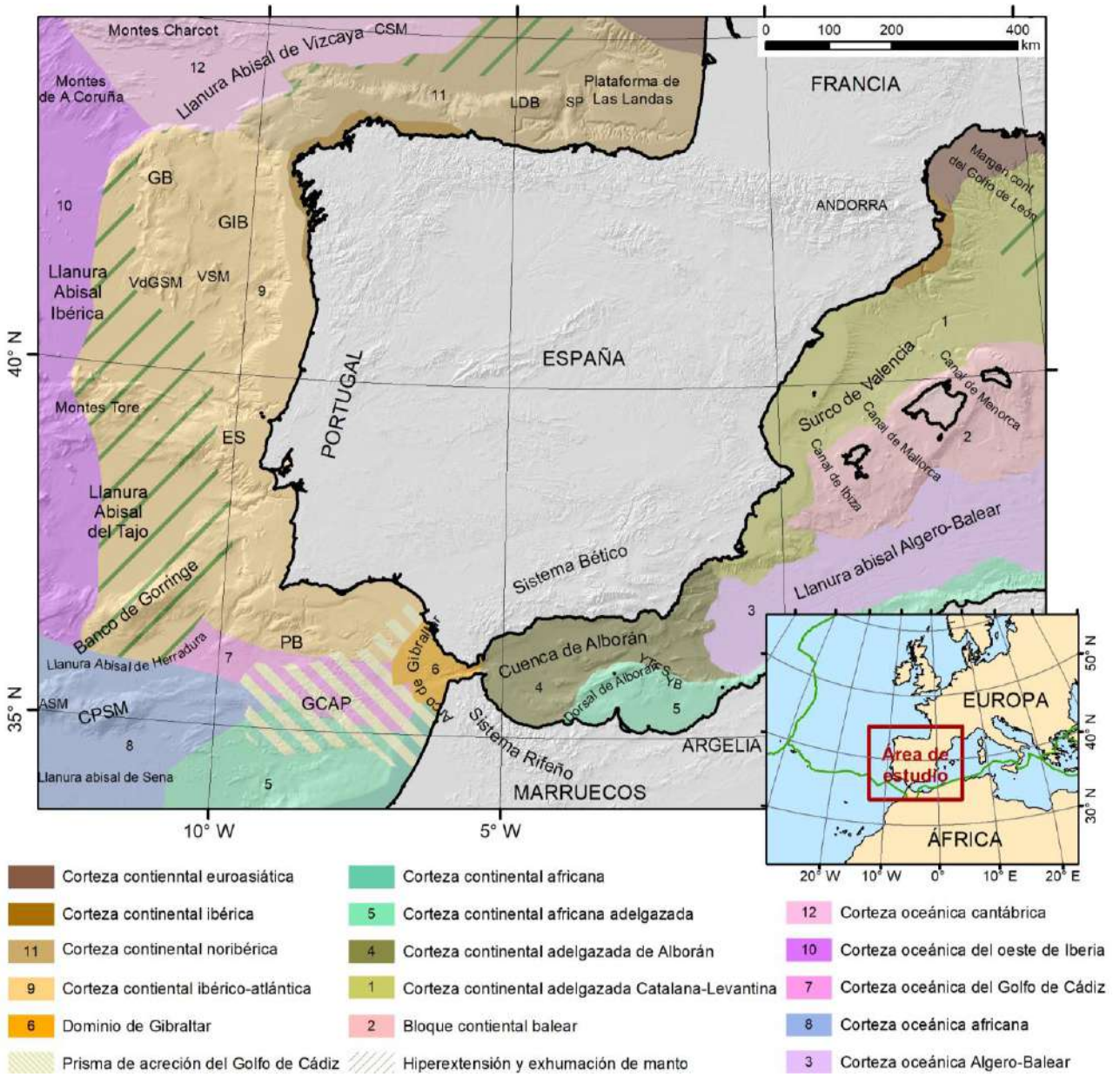


FIGURA 1. *Dominios tectónicos de la zona de estudio (mostrada en el mapa inserto). CSM: Monte submarino de Cantabria; LDB: Banco de Le Danois; SP: Promontorio de Santander; GB: Banco de Galicia; GIB; Cuenca Interior de Galicia; VSM: Monte Submarino de Vigo; VdGSM: Monte submarino de Vasco de Gama; ES; Espolón de Extremadura; PB: Banco de Portimao; ASM; Monte submarino de Ampere; CPSM: Monte submarino de Coral Patch; GCAP; Prisma de acreción del Golfo de Cádiz; YTFS: Sistema de falla transcurrente de Yusuf; YB: Cuenca de Yusuf. Mapa inserto: Localización de la zona de estudio (rectángulo rojo) y límites de placas (líneas verdes). Modificado de Druet et al., 2023.*

Se ha identificado un conjunto de dominios tectónicos alrededor de la Península Ibérica, incluyendo los márgenes continentales y su prolongación hacia las llanuras abisales. Éstos se diferencian por su posición geográfica, naturaleza cortical y estilo de deformación tectónica, relacionado con su evolución geodinámica. Los dominios que se han diferenciado son (Fig. 1):

- *Corteza continental adelgazada Catalana-Levantina:* Su estructura se relaciona con el adelgazamiento debido a la propagación de los sucesivos eventos de *rift* durante la apertura del Mar Mediterráneo noroccidental, que dio lugar al desarrollo de fallas lístricas normales con estructuras de *horst* y *graben*, con dos episodios magmáticos cenozoicos (Martí et al., 1992). Destaca también la tectónica salina en este dominio (Etheve et al., 2018).
- *Bloque continental balear:* Tiene una evolución tectónica compleja por la superposición de episodios de *rift* cenozoicos y estructuras compresivas posteriores (Sàbat et al., 1995).
- *Corteza continental Algero-Balear:* En este sector destaca la presencia de domos y dorsales diapíricas que tienen su origen en la removilización de las series salinas del Messiniense (Camerlenghi et al., 2009).
- *Corteza continental adelgazada de Alborán:* Originado por tectónica extensiva en un contexto de *back-arc* activo durante el Mioceno inferior y medio, se registró una importante actividad volcánica en toda la región y el desarrollo de diapiros.
- *Corteza continental adelgazada africana:* Los rasgos más destacados son la Dorsal de Alborán, debida al régimen compresivo del Tortoniense superior-actualidad (Gómez de la Peña et al., 2018), la Cuenca de Yusuf, de tipo *pull-apart*, producto de la actividad del sistema de falla transcurrente de Yusuf, de dirección NO-SE y movimiento dextral.
- *Dominio de Gibraltar y Prisma de acreción del Golfo de Cádiz:* Localizado entre el límite de placas entre Eurasia y África (sistema de fallas SWIM) y el extremo noroeste de la cadena orogénica Alpina mediterránea, representada por el Arco de Gibraltar. El emplazamiento radial de las unidades alóctonas del Prisma de acreción del Golfo de Cádiz se interpreta como un prisma de acreción (Iribarren et al., 2007). También hay procesos diapíricos en esta unidad, desarrollados desde el Cretácico superior
- *Corteza oceánica del Golfo de Cádiz:* Desarrollada durante el episodio extensivo mesozoico, probablemente en el Jurásico superior, subdujo casi en su totalidad durante la fase orogénica bético-rifeña (Pedrera et al., 2020). Hacia el oeste, limita con la zona de manto exhumado del margen continental oeste de Iberia a través de un sistema de cabalgamientos (Granado et al., 2021). Por el sur, limita con la corteza oceánica africana a través del sistema de fallas SWIM.
- *Corteza oceánica africana:* Incluye las llanuras

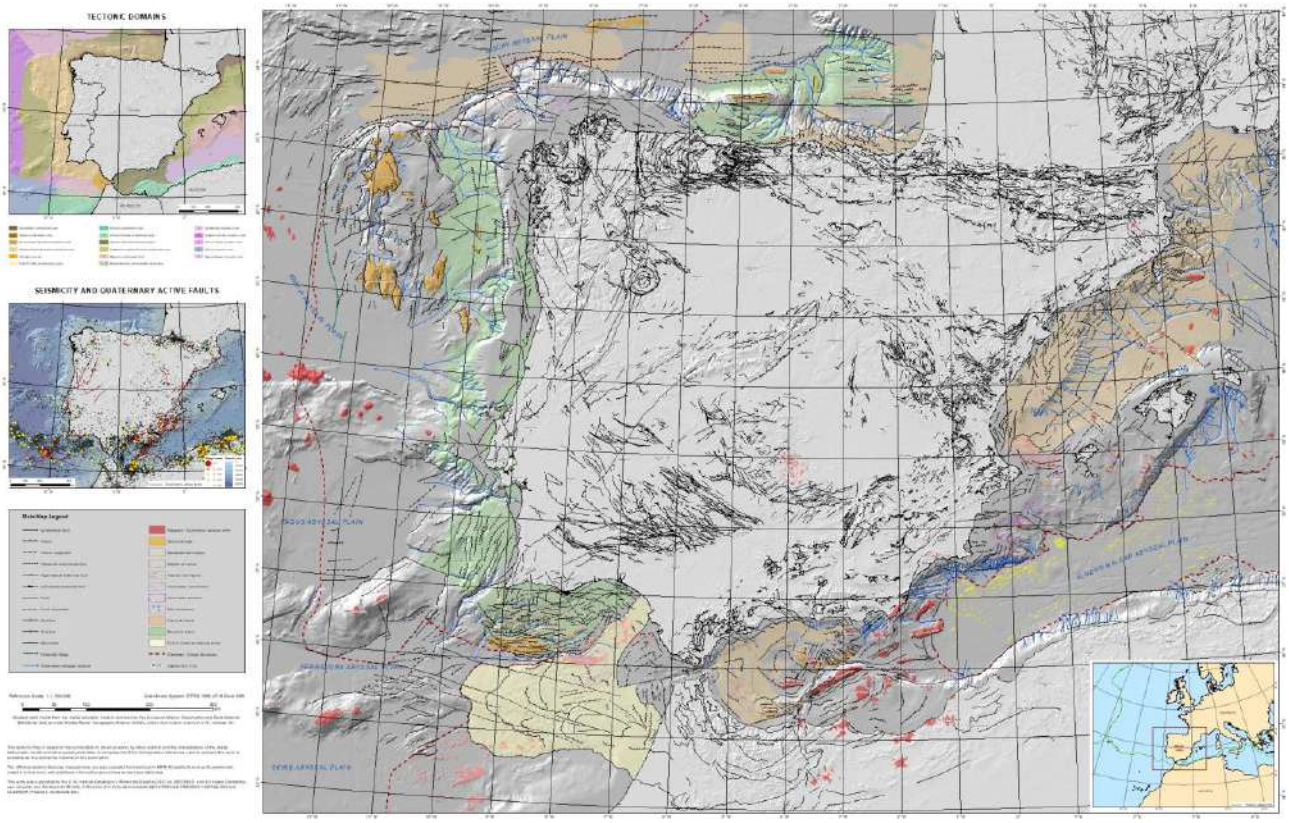


FIGURA 2. *Mapa tectónico de los márgenes continentales de la Península Ibérica y las llanuras abisales adyacentes. Modificado de Druet et al., 2023*

coetáneo con la actividad principal de los sistemas compresivos de las zonas externas de las cordilleras Bética y Rifeña (Pedrera et al., 2020). Al mismo tiempo, abisales de Herradura y Sena, así como los montes submarinos de Ampere y Coral Patch.

- *Corteza continental adelgazada del norte de Iberia:* Es este sector la estructuras del *rift* mesozoico fueron parcialmente invertidas durante la compresión cenozoica, que llevó al cierre parcial del Golfo de Vizcaya con la generación también de grandes cabalgamientos. Este sector está muy segmentado, con plataformas marginales como las de Ortegal, Castro y Pardo Bazán al oeste, y la de las Landas al este, los bancos submarinos de Le Danois y Jovellanos y el promontorio de Santander.
- *Corteza oceánica cantábrica:* Originada por la apertura diacrónica, de oeste a este, del Golfo de Vizcaya, ha sido elevada parcialmente durante la compresión cenozoica, generando los relieves de los montes submarinos de Charcot y Cantabria.
- *Corteza continental adelgazada ibérico-atlántica:* Hay cinco sectores, resultado de diferentes pulsos extensionales durante la apertura de sur a norte del Océano Atlántico: el sector del Golfo de Cádiz, el de la cuenca del Alentejo y el banco de Gorringe, el del sur de la cuenca lusitana y el espolón de Extremadura, el de la parte norte de la cuenca lusitana y la cuenca de Peniche, y el sector de las cuencas de Oporto e interior de Galicia y la región de montes submarinos. La posterior fase compresiva cenozoica, terminó por dar la configuración actual de este dominio.
- *Corteza oceánica del oeste de Iberia:* En la parte noroeste se caracterizada por la presencia de los montes submarinos de Finisterre y Coruña, que presentan evidencias de rejuvenecimiento por la tectónica compresiva cenozoica. En la parte central, destacan los relieves volcánicos de los montes submarinos de Tore, que separan la llanura abisal ibérica de la del Tajo. En el sector sureste, el relieve volcánico que es la prolongación morfológica del banco de Gorringe separa la llanura abisal del Tajo de la de Herradura.

CONCLUSIONES

La evolución compleja de Iberia y sus márgenes continentales da lugar al intrincado esquema estructural que se muestra en este trabajo, donde la herencia tectónica tiene un papel importante en la morfología que se observa en la actualidad.

Se han definido diferentes dominios corticales según su origen, continental u oceánico, y el grado de deformación tectónica que los afecta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos SEGYBAS y 3D Vasco-Cantábrica (ambos del CN IGME-CSIC), SEASTORAGE (TED2021-129816B-I00) y ALGEMAR (PID2021-123825OB-I00).

REFERENCIAS

Camerlenghi, A., Accettella, D., Costa, S., Lastras, G., Acosta, J., Canals, M. and Wardell, N. (2009). Morphogenesis of the SW Balearic continental slope and adjacent abyssal plain, western Mediterranean Sea. *International Journal of Earth Sciences*, 98, 735-750.

Druet, M., Bohoyo, F., Maestro, A., Mink, A. García-Senz, J., Pedrera, A. and Rodríguez Fernández, R. (2003). Tectonics of the Iberian continental margins and abyssal plains. *Journal of Maps*, 19 (1), 2237980.

Etheve, N., Mohn, G., Frizon de Lamotte, D., Roca, E., Tugend, J. and Gómez-Romeu, J. (2018). Extreme Mesozoic Crustal Thinning in the Eastern Iberia Margin: The Example of the Columbrets Basin (Valencia Trough). *Tectonics*, 37.

Gómez de la Peña, L., Ranero, C.R. & Gràcia, E. (2018). The Crustal Domains of the Alboran Basin (Western Mediterranean). *Tectonics*, 37, 3352-3377.

Granado, C., Muñoz-Martín, A., Olaiz, A.J., Fernández, O. and Druet, M. (2021). Crustal-scale structure of the West Iberia margin: a novel approach to integrated structural characterization of passive margins. *Marine Geophysical Research,* 42, 10.

Iribarren, L., Vergés, J., Camurri, F., Fullea, J. and Fernàndez, M. (2007). The structure of the Atlantic-Mediterranean transition zone from the Alboran Sea to the Horseshoe Abyssal Plain (Iberia–Africa plate boundary). *Marine Geology*, 243, 97-119.

Maestro, A., López-Martínez, J., LLave, E., Bohoyo, F., Acosta, J., Hernández-Molina, F.J., Muñoz, A. and Jané, G. (2013). Geomorphology of the Iberian Continental Margin. *Geomorphology*, 196, 13-35.

Martí, J., Mijavila, J., Roca, E. and Aparicio, A. (1992). Cenozoic magmatism of the Valencia Trough (western Mediterranean): relationship between structural evolution and volcanism. *Tectonophysics*, 203, 145-165.

Pedrera, A., Ruiz-Constán, A., García-Senz, J., Azor, A., Marín-Lechado, C., Ayala, C., Díaz de Neira, J.A. and Rodríguez-Fernández, L.R. (2020). Evolution of the South Iberian paleomargin: From hyperextension to continental subduction. *Journal of Structural Geology*, 138, 104122.

Sàbat, F., Roca, E., Muñoz, J.A., Vergés, J., Santanach, P., Sans, M., Masana, E., Estévez, A. and Santisteban, C. (1995). Role of extension and compression in the evolution of the eastern margin of Iberia: the ESCI-Valencia Trough seismic profile. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8, 431-448.

Identificación de potenciales almacenes geológicos en sedimentos marinos profundos: implicaciones en Geociencias de la Energía y en la Transición Energética (Proyecto ALGEMAR)

Decoding potential geological storages in deep-marine sediments: implications in Energy Geosciences and Energy Transition (ALGEMAR Project)

M. Druet[1]*, E. Llave[1], B. Benjumea[1] and ALGEMAR Team (A. Arnáiz[2], L. Azevedo[3], H. Bedle[4], E. Berrezueta[1], F. Bohoyo[1], S. de Castro[5], D. Duarte[6,7], E. Ducassou[8], J. García-Crespo[1], J. García-Senz[1], J. García-Mayordomo[1], P. Fernández-Canteli[1], T. Feyzullayev[1], R. Flecker[9], C. Garrido[10], F. J. Hernández-Molina[7], S. Ledesma[11], P. Llanes[12], D. Lubo-Robles[4], A. Maestro[1], R. Martín-Banda[1], J. Martín-León[1], A.N. Martínez[1], H. Matías[10], J. F. Mediato[1], I. Munteanu[10], L. Ng[13,7], F. Pangaro[2], A. Pedrera[1], P. Pinto[10], A. Ramos[1], M. I. Reguera[1], M. Rodrigo[1], F.J. Rodríguez-Tovar[14], M. Rogerson[15], M. Ron[2], C. Roque[16], J. Tritlla[10], F.J. Sierro[17], A. Viana[18])

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). C/ Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid). m.druet@igme.es
2 REPSOL S.A., 28045 Madrid, Spain
3 CERENA/DECivil, Pavilhão de Minas, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa1049-001 Lisbon, Portugal
4 School of Geosciences, the University of Oklahoma, Norman, OK, USA
5 Arquimea Research Center, 38320 San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, Spain
6 School of Energy, Geoscience, Infrastructure and Society, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK
7 Royal Holloway University of London, Earth Science Department, Egham, UK
8 Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, F-33600 Pessac, France
9 School of Geographical Sciences, University of Bristol, University Road, Bristol BS8 1SS, UK
10 NET4CO2, 4200-355 Porto, Portugal
11 Trinity Capital SL., 28010 Madrid, Spain
12 Dept. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM, 28040 Madrid, Spain
13 School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai, China
14 Dept. Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, 18002 Granada, Spain
15 Department of Geography and Environmental Science, Northumbria University, Newcastle, UK
16 Instituto Dom Luiz, Univ. of Lisbon, Campo Grande, Lisbon, Portugal
17 Dept. Geología, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, Spain
18 PETROBRAS/CENPES-PROFEX, Rio de Janeiro, Brazil

Resumen: El objetivo principal del proyecto ALGEMAR (PID2021-123825OB) es mejorar el conocimiento de los depósitos marinos profundos, concretamente aquellos generados por la interacción de procesos sedimentarios gravitacionales y por corrientes de fondo. El estudio de estos depósitos es un tema de gran actualidad tanto en el mundo académico, ya que su registro sedimentario es una buena fuente de información para reconstrucciones paleoclimáticas y paleoceanográficas, como en la industria, debido a su gran potencial como recursos energéticos y almacenamiento de dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, aún existe un gran desconocimiento sobre cómo se generan y evolucionan, así como sobre sus implicaciones socioeconómicas. Durante el proyecto se realizará una evaluación de las contornitas y depósitos mixtos (turbidíticos-contorníticos) más arenosos, desarrollados durante el Mioceno superior, como potencial almacenamiento geológico. Los depósitos a estudiar se localizan en el margen continental del Golfo de Cádiz y cuencas adyacentes (Guadalquivir y Rharb). Estos estudios están directamente vinculados al proyecto de perforación anfibia IMMAGE (IODP Exp. 401 +ICDP), en el que se contempla estudiar la evolución de la conexión Mediterráneo-Atlántico durante el Mioceno. ALGEMAR es un proyecto multidisciplinar y cuenta con una estrecha colaboración con varias empresas de energía, asegurando la transferencia de los resultados esperados.

Palabras clave Sedimentación marina profunda, Mioceno, Golfo de Cádiz, Cuencas del Guadalquivir y Rharb, almacenes geológicos.

Abstract: *The ALGEMAR project (PID2021-123825OB) aims to enhance our understanding of deep marine deposits, particularly those formed by the interplay of gravitational sedimentary processes and bottom currents. The study of these deposits is currently of great interest both in academia and industry. Their sedimentary record provides valuable information for paleoclimatic and paleoceanographic reconstructions, while they also hold potential as energy resources and for carbon dioxide (CO2) storage. However, there is still much to learn about their generation, evolution, and socio-economic implications. The project will focus on evaluating the potential of Late Miocene sandy contourite and mixed (turbiditic-contouritic) deposits as geological storages. These deposits are located on the continental margin of the Gulf of Cadiz and adjacent basins (Guadalquivir and Rharb). These studies are directly related to the amphibious drilling project IMMAGE (IODP 895 full +ICDP), which aims to study the evolution of the*

Mediterranean-Atlantic connection during the Miocene through onshore and offshore expeditions (Expedition 401). The ALGEMAR is a multidisciplinary project that involves close collaboration with several companies to ensure the transfer of expected results.

Key words: *Deep marine sedimentation, Miocene, Gulf of Cádiz,* Guadalquivir *and Rharb basins, geological storages.*

INTRODUCCIÓN

Las corrientes de fondo y los procesos oceanográficos secundarios interactúan a diferentes escalas para formar depósitos sedimentarios denominados de contorno y mixtos (turbidíticos-contorníticos). Comprender el origen sedimentológico de estos depósitos marinos de aguas profundas es de gran importancia porque: 1) Los sistemas mixtos constituyen importantes yacimientos petrolíferos de aguas profundas (Fonnesu et al., 2020); 2) Pueden almacenar importantes recursos minerales (Rebesco et al., 2014); 3) Intervienen en la determinación legal de los límites exteriores de una plataforma continental (por ejemplo, Mosher y Yanez-Carrizo, 2021); 4) Acumulan microplásticos (Kane et al., 2020); 5) Tienen una estrecha relación con los ecosistemas de aguas profundas (Lozano et al., 2020); 6) Presentan una relación genética con la estabilidad de taludes y otros riesgos geológicos (Miramontes et al., 2018) y recientemente, 7) Muestran un gran potencial para el secuestro y almacenamiento de CO2 (Hernández-Molina et al., 2022). Esta reciente proliferación de investigaciones académicas y/o industriales sobre la sedimentación marina profunda, atestigua los significativos avances que se están produciendo en el conocimiento de estos sistemas. Sin embargo, existen todavía lagunas conceptuales respecto a su formación y evolución a lo largo del tiempo.

Es por ello que el objetivo principal de este proyecto se centra en la identificación e interpretación de depósitos contorníticos y mixtos desarrollados durante el Mioceno superior. Especialmente, se hará hincapié en la caracterización de aquellos depósitos más arenosos, por su gran potencial como almacenes geológicos (Yu et al., 2020; Rodrigues et al., 2022).

Para lograr el objetivo principal propuesto, se consideran los siguientes objetivos parciales: 1) Identificación y diferenciación de los sistemas contorníticos y mixtos (turbidíticos-contorníticos), y de los depósitos de arenas desarrollados y/o retrabajados por las corrientes de fondo durante el Mioceno superior; 2) Determinación de los procesos sedimentarios que los generan; 3) Implicaciones de la evolución Miocena de los pasillos del Guadalquivir y Rifeño en estos depósitos; 4) Modelización y caracterización de la estructura y geometría de estas formaciones, para determinar áreas susceptibles de constituir emplazamientos de almacenamiento de energía.

Estos estudios se van a llevar a cabo, principalmente, a partir de datos sísmicos 2D y 3D y a escala de facies sedimentarias, con el fin de llevar a cabo una discusión sobre sus implicaciones socioeconómicas en el Cambio Climático y la Transición Energética. Las zonas de estudio comprenden el margen continental del Golfo de Cádiz y cuencas adyacentes (Guadalquivir y Rharb) (Fig. 1).

Dicha investigación no sería posible sin el gran número de instituciones y recursos humanos que se han involucrado, suponiendo un esfuerzo muy relevante de integración y colaboración del personal científico y técnico, tanto nacional como extranjero de probada experiencia en Geología Marina, Sedimentología,

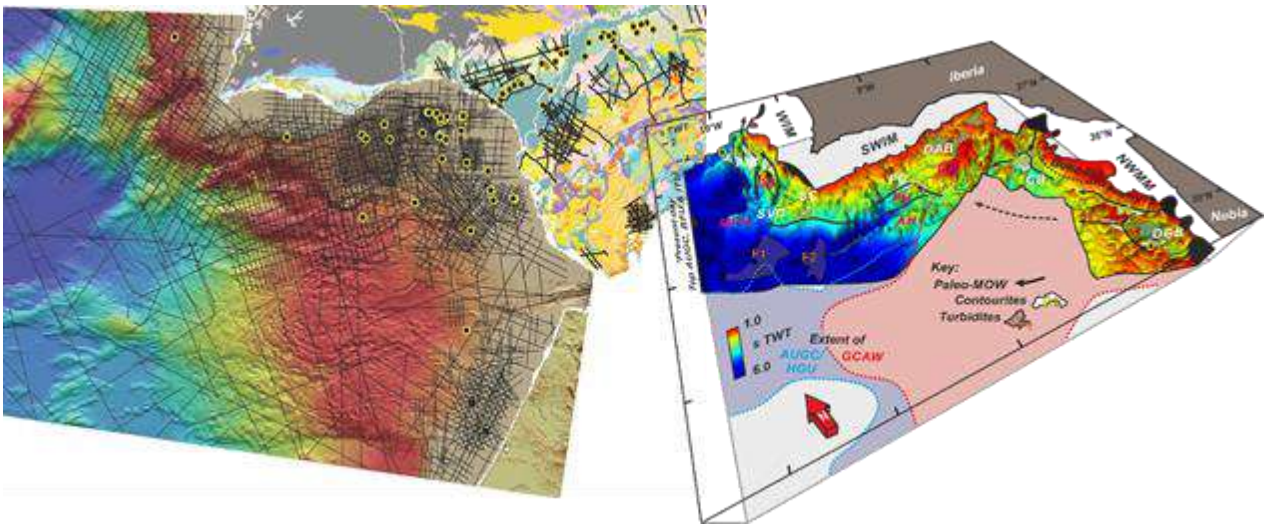


FIGURA 1. *A) Mapa de localización del conjunto de datos (incluyendo prospecciones sísmicas, sondeos y batimetría). B) Modelo esquemático de la relación entre la distribución de los depósitos contorníticos y la potencial trayectoria de la paleocirculación de la Masa de Agua Mediterránea de Salida (MOW) durante el Mioceno superior en el Golfo de Cádiz. NWMM: margen noroccidental marroquí, SWIM: margen suroccidental ibérico, WIM: margen occidental ibérico (de Ng et al., 2021).*

Geofísica, Geología estructural, Peligrosidad Sísmica, Geoquímica y Petrografía, que dotan al proyecto de un fuerte carácter multidisciplinar, así como de una buena internacionalización. Las implicaciones científicas y económicas del Proyecto ALGEMAR hacen que sea novedoso, con esperables resultados de alto impacto científico en la investigación marina y con claras repercusiones en aspectos de interés socio-económico, debido a su relación directa con posibles almacenes energéticos y por su valor como almacén de CO_2 antropogénico. La estrecha colaboración con diversas empresas respalda la aplicabilidad del proyecto y asegura la transferencia de los resultados esperables.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto ALGEMAR (PID2021-123825OB-I00), y el contrato predoctoral (PRE2022-102745) están financiados por el MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/. Además, colabora con el proyecto SEASTORAGE (Ecological Transition and Digital Transition project con referencia TED2021-129816B-I00, y financiado por el MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/PRTR-C21 y la Unión Europea NextGenerationEU). Los trabajos que se realizan en el proyecto ALGEMAR se enmarcan dentro del grupo de Investigación "The Drifters". Esta investigación utiliza datos tomados en el Programa Integrado de Perforación Oceánica (IODP Exp. 339), así como los proporcionados por la Direção Geral de Energia e Geologia, (DGEG, Portugal) con normas de confidencialidad.

REFERENCIAS

Fonnesu, M., Palermo, D., Galbiati, M., Marchesini, M., Bonamini, E. and Bendias, D. (2020): A new world-class deep-water play-type, deposited by the syndepositional interaction of turbidity flows and bottom currents: the giant Eocene Coral Field in northern Mozambique. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 179–201.

Mosher, D.C. and Yanez-Carrizo (2021): The elusive continental rise: Insights from residual bathymetry analysis of the Northwest Atlantic margin. *Earth-Science Reviews*, 217, 103608.

Hernandez-Molina, F.J., de Castro, S., de Weger, W., Duarte, D., Fonnesu, M., Kirby, A., Llave, E., Ng, Z.L, Mantilla Muñoz, O., Rodrigues, S., Rodríguez-Tovar, F.J., Thieblemont, A., Viana, A. and Yin, S. (2022): Chapter 9: Contourites and mixed depositional systems: a paradigm for deep marine sedimentary environments. En: Jon Rotzien, Cindy Yeilding, Richard Sears, F. Javier Hernández-Molina, Octavian Catuneanu (Eds), *Deepwater Sedimentary Systems. Science, Discovery, and Applications.* Elsevier, 301-360.

Kane, I.A., Clare, M.A., Miramontes, E., Wogelius, R., Rothwell, J.J., Garreau, P. and Pohl, F. (2020): Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. Science 368, 1140–1145.

Lozano, P., Fernández-Salas, L.M., Hernández-Molina, F.J., Sánchez Leal, R.F., Sánchez-Guillamón, O., Palomino, D., Farias, C., López-González, N., García, M., Vázquez, J.T., Vila, Y. and Rueda, J.L. (2020): Multiprocesses interaction in shaping the seafloor and controlling substrate types, habitats and benthic communities of the Gulf of Cádiz. *Marine Geology, 423*, 106139.

Miramontes, E., Garziglia, S., Sultan, N., Jouet, G. and Cattaneo, A. (2018): Morphological control of slope instability in contourites: a geotechnical approach. *Landslides*, 15 (6), 1085–1095.

Rebesco, M., Hernández-Molina, F.J., Van Rooij, D. and Wahlin, A. (2014): Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state of the art and future considerations. *Marine Geology*, 352, 111–154.

Rodrigues, S., Hernández-Molina, F.J., Fonnesu, M., Miramontes, E., Rebesco, M. and Campbell, D.C. (2022). A new classification system for mixed (turbidite-contourite) depositional systems: Examples, conceptual models and diagnostic criteria for modern and ancient records. *Earth-Science Reviews*, 230, 104030.

Yu, X., Stow, D.A.V., Smillie, Z., Esentia, I., Brackenridge, R.E., Xie, X., Bankole, S., Ducassou, E. and Llave, E. (2020): Contourite porosity, grain size and reservoir characteristics. *Marine and Petroleum Geology*, 117, 104392.

Los márgenes entre las islas de Tenerife y Gran Canaria integrando observaciones sísmicas y del fondo marino: proyecto Guanche

The margins between the islands of Tenerife and Gran Canaria integrating seismic and seabed observations: Guanche project

F. Estrada[1], R. Bartolomé[1], R. Cabieces[2], D. Casas[1], M. Cubas[1], O. Sánchez-Guillamón[3], H. Latorre[1], A. Neri[1], D. Palomino[3], J.T. Vázquez[3] y A. Villaseñor[1].

1 Institut de Ciències del Mar, CSIC, 08003 Barcelona, España. festrada@icm.csic.es; rafael@icm.csic.es; davidcasas@icm.csic.es; melania@icm.csic.es; hlatorre@icm.csic.es; aneri@icm.csic.es; antonio.villasenor@csic.es.
2 Real Observatorio de la Armada, Cecilio Pujazon s/n, 11100 San Fernando, Spain. rcabdia@roa.es
3 Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, C.O. 29640, Fuengirola, Málaga, España. olga.sanchez@ieo.csic.es; desiree.palomino@ieo.csic.es; juantomas.vazquez@ieo.csic.es

Palabras clave: sismicidad activa, Islas Canarias, tectónica, vulcanismo.

Resumen

El objetivo del proyecto Guanche (PID2020-114682RB-C31) es caracterizar la sismicidad y la estructura del subsuelo en la región comprendida entre Tenerife-Gran Canaria-Fuerteventura. Para ello se realizó una campaña oceanográfica a principios del año 2024 parar registrar terremotos mediante 17 sismógrafos en el fondo oceánico (UTM-CSIC y GEOMAR), complementados con otros desplegados en tierra por el Instituto Geográfico Nacional y con la instalación de dos interrogadores DAS (Distributed Acoustic Sensing) en un cable submarino de telecomunicaciones. Durante la campaña se registró un mosaico batimétrico multihaz de 14.700 km^2, procesado por el Instituto Español de Oceanografía, y 677 km de líneas sísmicas de ultra alta resolución con un perfilador paramétrico de sedimentos (Topas). Los datos preliminares de la zona Tenerife-Gran Canaria indican el desarrollo de un complejo sistema de drenaje formado por cañones y corredores encajados sobre depósitos de debris en avalancha originados en los márgenes de ambas islas donde se observan varias cicatrices fósiles y recientes. Este sistema de drenaje queda dividido en dos vertientes por un umbral topográfico de dirección NE-SO en cuyo vértice se sitúa el volcán submarino de Enmedio, donde se concentra mayoritariamente la sismicidad. Se constata la existencia de fallas recientes orientadas NNE-SSO al norte de Gran Canaria con saltos de orden métrico y se ha caracterizado en detalle la falla de Santa Cruz, de salto en dirección ENE-OSO, en la costa este de Tenerife, cerca de la ciudad del mismo nombre.

Abstract

The primary objective of the Guanche project is to characterize the seismicity and subsurface structure within the Tenerife-Gran Canaria-Fuerteventura region. To achieve this, an oceanographic survey was conducted in early 2024 to acquire passive seismic waves at sea, deploying a temporary network of 17 ocean bottom seismometers provided by UTM-CSIC and GEOMAR (Germany) combined with land seismometers deployed by the National Geographic Institute. Additionally, strain data using an existing submarine telecommunication cable (DAS, Distributed Acoustic Sensing) was collected. During the survey, a 14,700 km2 multibeam bathymetric mosaic was acquired, processed by the Spanish Institute of Oceanography (IEO), and 677 km of ultra-high resolution seismic lines using a parametric sediment profiler (Topas). Preliminary results from the Tenerife-Gran Canaria area indicate the development of a complex drainage system formed by canyons and corridors embedded in avalanche debris deposits formed in the margins of both islands where several fossil and recent scars are observed. This drainage system is divided into two slopes by a topographic threshold in an NE-SW direction, at the apex of which the Enmedio volcano, the largest, is located and most of the seismicity is concentrated. Among all the active structures observed, recent measurements have revealed the presence of NNE-SSW oriented faults in the northern region of Gran Canaria, exhibiting offsets of metric scale. Additionally, a comprehensive analysis has been conducted on the Santa Cruz fault, which extends along the coastline dipping ENE-WSW, offshore of the city bearing the same name.

Estudio del impacto del fondeo de grandes buques en el sedimento y la fauna del fondo marino de la plataforma continental del golfo de Cádiz

Study of the impact of anchoring large vessels on the sediment and fauna of the seabed in the continental shelf of the Gulf of Cadiz

L.M. Fernández-Salas[1], M. García[1], P. Bárcenas[2], N. López-González[2], C. Farias[1], S. Román[1], Y. Vila[1] y R. Jiménez-Romero[1]

1 Centro Oceanográfico de Cádiz (IEO-CSIC). Muelle de Levante, s/n, Puerto Pesquero. C.P. 11006 Cádiz. luismi.fernandez@ieo.csic.es, marga.garcia@ieo.csic.es, carlos.farias@ieo.csic.es, sara.roman@ieo.csic.es, yolanda.vila@ieo.csic.es, raul.jimenez@ieo.csic.es

2 Centro Oceanográfico de Málaga (IEO-CSIC). Puerto Pesquero s/n, C.P. 29640 Fuengirola, Málaga. patricia.barcenas@ieo.csic.es, nieves.lopez@ieo.csic.es

Resumen: La plataforma continental del golfo de Cádiz fue un escenario frecuente de fondeo para buques de gran envergadura, especialmente gaseros, durante la crisis energética de 2022. Este estudio investiga el impacto del anclaje en el sedimento y la fauna marina, utilizando datos de ecosonda multihaz y muestras de sedimento y fauna epibentónica. Los análisis revelan persistentes patrones de rugosidad en el lecho marino, correlacionados con densidades de buques metaneros y eventos de fondeos. Se identificaron fondos montículados y surcos con dimensiones que oscilan entre 100 y 450 m, y profundidades de incisión de hasta 0,5 m en los fondos montículados y de 2 m en los surcos. La complejidad de la interacción entre la actividad de las embarcaciones, las características geomorfológicas y los procesos erosivos subraya las implicaciones ecológicas de los cambios inducidos por la actividad humana en este hábitat marino. La discusión destaca la necesidad de un enfoque integral para abordar estas interacciones para una gestión marina sostenible.

Palabras clave: impacto de fondeos, plataforma continental, golfo de Cádiz, rugosidad del sedimento, biodiversidad.

Abstract: *The continental shelf of the Gulf of Cadiz has become a common anchoring ground for large vessels, especially gas carriers, during the 2022 energy crisis. This study investigates the impact of anchoring on sediment and marine fauna, using multibeam data and sediment/fauna samples. Analyses reveal persistent rugosity patterns on the seabed, correlated with gas tanker densities and anchoring events. Mounded seabed and furrows were identified, ranging in dimensions from 100 to 450 m, with incision depths of up to 0.5 m in the marks and 2 m in the furrows. The complexity of the interaction between vessel activity, geomorphological features, and erosive processes underscores the ecological implications of human-induced changes in this marine habitat. The discussion highlights the need for a comprehensive approach to address these interactions for sustainable marine management.*

Key words: *Anchoring impact, continental shelf, Gulf of Cádiz, sediment rugosity, biodiversity.*

INTRODUCCIÓN

La plataforma continental del golfo de Cádiz se ha convertido en un enclave habitual para el fondeo de barcos de gran porte, principalmente gaseros, frente a las ciudades de Cádiz y Huelva. Esta práctica adquirió una particular relevancia durante la crisis energética de 2022. Durante este periodo crítico, se observó una concentración notable de buques cargados con gas licuado, ubicados a aproximadamente 15 millas de la bahía de Cádiz, aguardando la oportunidad de descargar en las plantas regasificadoras. Las densidades de gaseros fondeados alcanzaron las 65 horas de fondeo por kilómetro cuadrado y por mes en el año 2022, frente a la menor frecuencia de fondeos en los años anteriores (EMODnet, 2024).

Este fenómeno ha suscitado la necesidad imperante de comprender y evaluar el impacto del fondeo de estos grandes buques en el sedimento y la fauna del fondo marino (Tinsley, 2021; Watson et al., 2022). En este contexto, el presente estudio se centra en analizar las huellas dejadas por el anclaje de estos barcos, así como los posibles efectos antropogénicos en la textura del sedimento y la biodiversidad marina en la zona.

El trabajo se ha realizado desde un enfoque metodológico integral proporcionando una visión detallada de la interacción entre el fondeo de anclas y el fondo marino, contribuyendo así a una evaluación precisa de su impacto en la plataforma continental del golfo de Cádiz.

MATERIAL Y MÉTODOS

La evaluación del impacto de las anclas en el fondo marino se basó en el análisis de dos batimetrías obtenidas con un año de diferencia usando la ecosonda multihaz EM710, instalada a bordo del buque oceanográfico Ramón Margalef, durante las campañas ISUNEPCA0522 e ISUNEPCA0623 (Fig. 1). Para el

procesado de los datos batimétricos se empleó el software Caris Hips&Sips.

Se realizaron diversos análisis geomorfológicos usando diferentes herramientas de ArcGIS, incluyendo la rugosidad, la curvatura total, planar y de perfil, así como la pendiente del lecho marino. Estos parámetros derivados de la batimetría proporcionaron información esencial para entender la topografía submarina y los posibles efectos generados por el fondeo de las anclas.

La interpretación de los resultados se realizó con el respaldo de criterios expertos, permitiendo la identificación y eliminación de interpretaciones automáticas erróneas derivadas, fundamentalmente, de los valores de rugosidad.

Para el estudio sedimentológico y de la fauna se han usado datos de dragas box corer de las campañas ARSA1118 e ISUNEPCA0721 y de bou de vara de la campaña ARSA0320 (Fig.1).

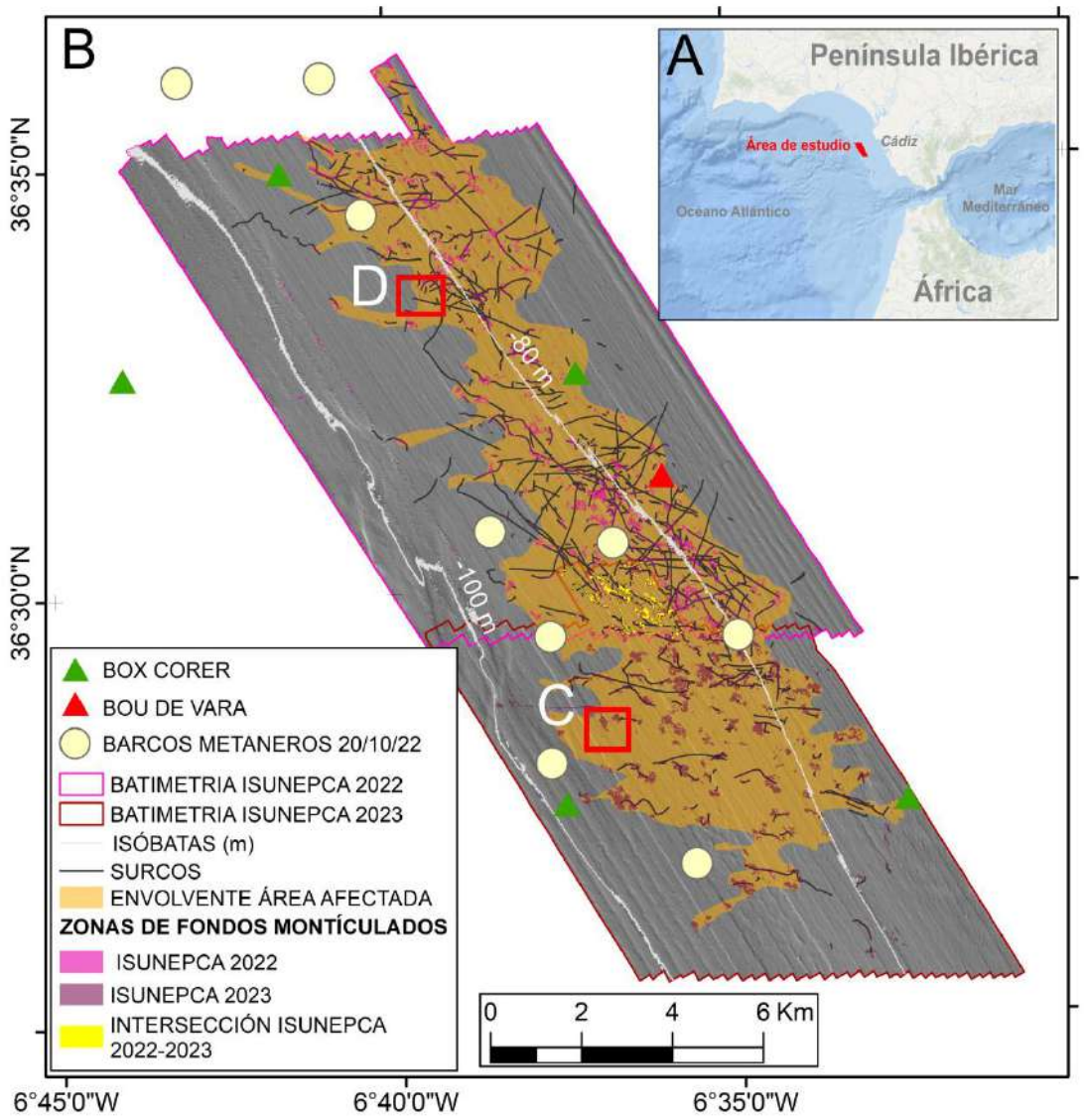


FIGURA 1. *Mapa de la zona de estudio en la plataforma continental del golfo de Cádiz. A) Encuadre geográfico general. B) Mapa de detalle donde se localizan los datos empleados, la posición de buques metaneros, la cartografía de la envolvente de las áreas afectadas y las zonas de fondos monticulados y los surcos de anclajes. Los recuadros C y D marcan la posición de los mapas de detalle mostrados en las figuras 2A y 2C, respectivamente.*

RESULTADOS

Los análisis batimétricos y de sus variables derivadas han permitido identificar dos tipos de morfología en los fondos planos de la plataforma continental del golfo de Cádiz: fondos monticulados irregulares y surcos. Éstas se encuentran en la zona encuadrada entre las profundidades de 69 y 103 m, y las latitudes 36º25'N y 36º35'N (Fig. 1 y 2). El área total ocupada por estas morfologías es de 65 km^2.

Los fondos monticulados irregulares son relieves de poca altura y muy irregulares, de apariencia caótica, con diferentes formas vistos en planta: triangulares, semicirculares y rectangulares, con dimensiones que oscilan entre 100 y 450 m. Aparecen de forma aislada o superpuestas y tienen profundidades de incisión en el sedimento de entre 0,2 y 0,5 m.

Los surcos son valles, generalmente simétricos con perfil en V y dos diques a los lados, que levantan relieves de hasta 0,5 m sobre el fondo adyacente, y una incisión

hasta el fondo del surco de hasta 2 m (Fig. 2). Se han medido 213 km de surcos en el área de estudio. Individualmente, pueden llegar a alcanzar hasta 4,7 km de longitud.

Tanto los surcos como los fondos monticulados se han identificado en las batimetrías de los años 2022 y 2023, de forma que en la zona de solape de ambas batimetrías muchas de estas formas se mantienen en el tiempo y dan idea del grado de estabilidad de estas formaciones submarinas.

La superposición de datos AIS (*Automatic Identification System)* de buques metaneros del 6 de octubre de 2022, obtenidos desde el portal Marine Traffic (Fig. 1) revela una notable coincidencia entre las posiciones de estos buques y las zonas con fondos monticulados irregulares y surcos. Del mismo modo, es altamente coincidente con las zonas de elevada densidad de gaseros del año 2022 (EMODnet, 2024). Asimismo, al superponer el posicionamiento detallado de un buque metanero (Fig. 2A), cuyo nombre se omite por razones de anonimato, durante sus periodos de anclaje, se observa un patrón de movimiento semicircular. El punto central de este movimiento concuerda de manera bastante exacta con una de estas áreas monticuladas irregulares, sugiriendo una correlación directa entre el fondeo de buques y la formación de estas morfologías en el lecho marino.

Del análisis granulométrico de las muestras de sedimento obtenidas con draga box corer se ha establecido que la textura del sedimento en la zona de estudio es fango-arenosa y fangosa.

En la comparación entre el bou de vara ubicado en la zona de estudio y otro cercano pero fuera de ella, que no se muestra en la figura 1 debido a su posición en las coordenadas (36º36,69’N, 6º37,92’W), no se observan diferencias significativas en términos de composición faunística y abundancia. Las pequeñas disparidades identificadas pueden atribuirse a las variaciones en la profundidad de los dos muestreos.

La fauna de la zona se corresponde con la habitual de los fondos fangosos circalitorales poco compactados del golfo de Cádiz. Destaca la presencia de crustáceos decápodos excavadores (como *Alpheus glaber* ó *Goneplax rhomboides*), moluscos bivalvos (como el muy abundante *Venus nux y Nucula sulcata*), el erizo irregular *Brissopsis atlantica*, especialmente dominante en la zona, y las holoturias *Paraleptopentacta tergestina* y *Oestergrenia digitata*.

DISCUSIÓN

La persistencia de los fondos monticulados irregulares y surcos en el fondo marino de la plataforma continental del golfo de Cádiz, identificada a través de batimetrías en los años 2022 y 2023, sugiere la presencia de formaciones geomorfológicas estables en esta región.

La correlación notable entre las posiciones de buques metaneros, particularmente durante periodos de fondeo, y la ubicación de las morfologías identificadas refuerza la hipótesis de que el fondeo de buques puede estar influyendo directamente en la formación y mantenimiento de estas estructuras sedimentarias. El patrón semicircular observado en el movimiento de un buque durante su anclaje sugiere una interacción dinámica entre la actividad humana y la morfología monticuladas irregulares, posiblemente relacionada con el uso de anclas y cadenas, por lo que se interpretan como huellas de anclajes.

La incisión de surcos, con profundidades de hasta 2 m, añade una dimensión adicional a la discusión, indicando procesos erosivos que podrían estar relacionados con la acción repetitiva de las cadenas de anclaje o con arrastre de las anclas (garreos) durante un trayecto considerable. Dicha acción repetitiva podría incrementar la perturbación que ya ocasiona en el lecho marino la pesca de arrastre (elevada en la zona) (Oberle et al, 2016), destruyendo madrigueras y perturbando la estratificación del sedimento, promoviendo así la homogenización de hábitats y la reducción de la biodiversidad.

La coincidencia de estos rasgos con áreas de alta actividad de buques metaneros plantea preguntas sobre las posibles implicaciones ecológicas de estas interacciones. Aunque no se observen diferencias faunísticas en los dos puntos de muestreos de bou de vara comparados, la preservación de estas huellas y surcos en el fondo marino durante un periodo de al menos un año indica una relativa estabilidad, pero la evaluación a largo plazo y el monitoreo continuo son esenciales para comprender completamente los efectos y el alcance de este impacto antropogénico en el hábitat marino.

CONCLUSIONES

Estos resultados subrayan la necesidad de abordar la compleja interacción entre las actividades humanas, como el fondeo de buques, y los procesos geológicos, geomorfológicos y la composición de los hábitats en la plataforma continental del golfo de Cádiz. La comprensión integral de este problema es esencial para informar sobre prácticas de gestión sostenible y minimizar posibles impactos negativos en este entorno marino único.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el trabajo de las tripulaciones del BO Ramón Margalef y al equipo ISUNEPCA y ARSA por su invaluable contribución en la toma de datos. Este trabajo es una contribución al proyecto ISUNEPCA-4 y al proyecto ESMARES (Estrategias marinas españolas)

REFERENCIAS

EMODnet. (2024). EMODnet Human Activities. Tankers Vessel Density. Annual Average 2022. European Marine Observation and Data Network.

Oberle, F. K. J., Storlazzi, C. D., and Hanebuth, T. J. J. (2016). What a drag: quantifying the global impact of chronic bottom trawling on continental shelf sediment. J. Mar. Syst. 159, 109–119. doi: 10.1016/j.jmarsys.2015.12.007.

Tinsley, P., 2021. Impacts of large vessel anchoring on seabed habitats and Marine Protected Areas, s.l.: Dorset Wildlife Trust.

Watson, S.J., Ribó, M., Seabrook, S., Strachan, L.J., Hale, R. y Lamarche, G. (2022). The footprint of ship anchoring on the seafloor. *Sci Rep* 12, 7500. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11627-5

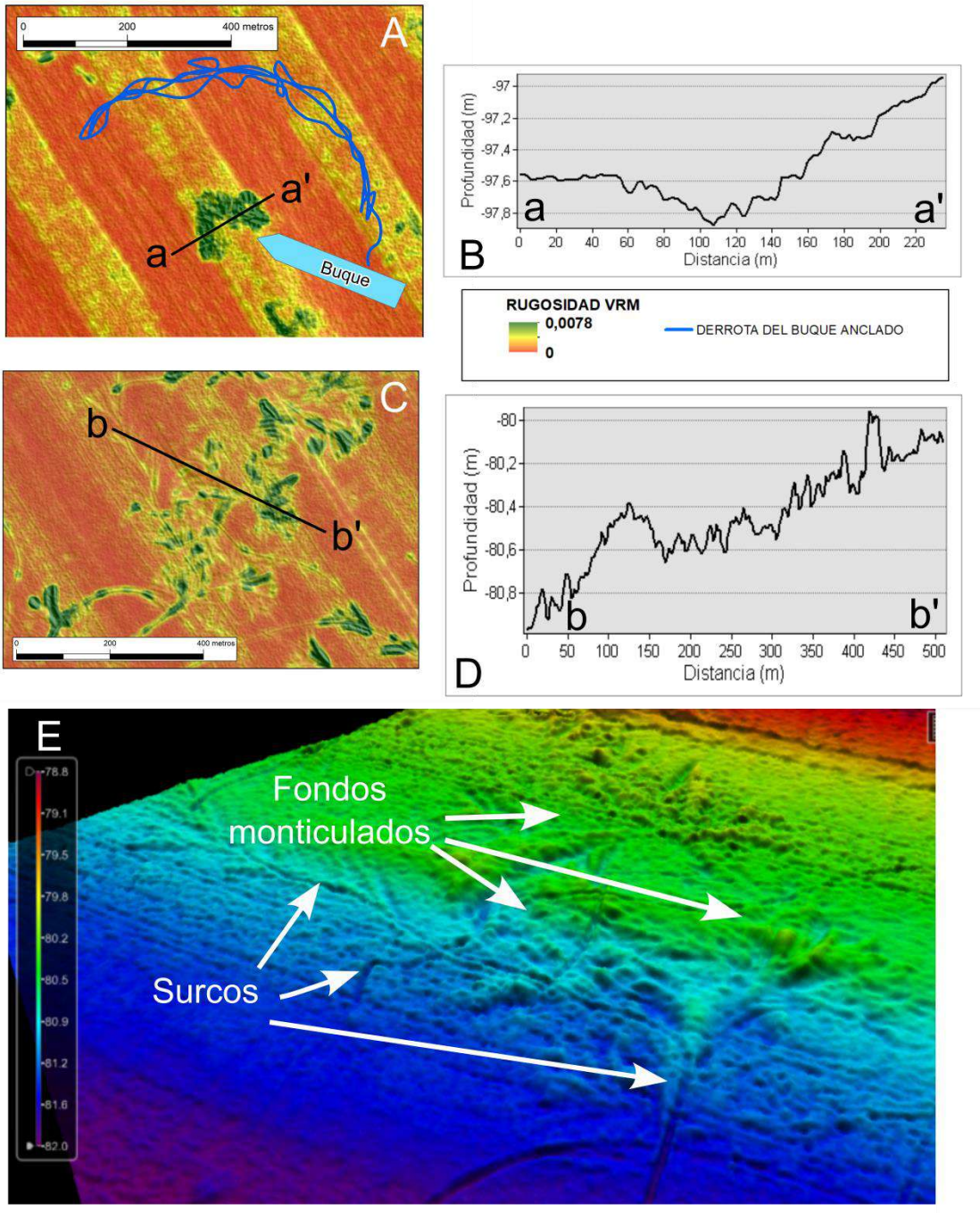


FIGURA 2. *A) Mapa de rugosidad del fondo marino en una zona de detalle al sur de la región de estudio. La posición del perfil batimétrico, destacado en el marco B, se indica con una línea negra. También se sobrepone la derrota trazada por un buque durante su anclaje el 6/10/22. B) Perfil batimétrico correspondiente a la zona señalada en A. C) Mapa de rugosidad del fondo marino en una zona de detalle al norte de la región de estudio. La posición del perfil batimétrico, resaltado en el marco D, se indica con una línea negra. D) Perfil batimétrico correspondiente a la zona señalada en C. E) Modelo en tres dimensiones de la batimetría contenida en el marco C.*

Peligros geológicos en cascada: análisis de la Zona de Cizalla Bética-Alborán-Rif a través del proyecto BARACA

Cascading geological hazards: analysis of the Betic-Alboran-Rif Shear Zone through the BARACA Project

J. Galindo-Zaldívar[1], G. Ercilla[2] y grupo BARACA*

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. jgalindo@ugr.es
2 Institut de Ciències del Mar, CSIC, GMC,08003 Barcelona, España. gemma@icm.csic.es;

Palabras clave: Procesos geológicos activos, Zona de cizalla Bética-Alborán-Rif, peligros geológicos.

Resumen

La cordillera Bético-Rifeña central y el mar de Alborán constituyen la región óptima para examinar procesos geológicos activos. Con el objetivo de establecer los peligros geológicos en cascada en la zona de cizalla Bética-Alborán-Rif, se integran datos geológicos, geofísicos y geodésicos existentes y nuevos, en tierra, mar y áreas costeras. Las fallas activas se evidencian mediante series sísmicas que afectan la región, vinculadas a la colisión heterogénea de las placas Eurasiática y Nubia (África). La investigación sobre deslizamientos parcialmente sumergidos en costa y pantanos y los submarinos tiene como objetivo comprender sus respuestas bajo condiciones sísmicas y asísmicas. La monitorización de deformaciones tectónicas y deslizamientos semisumergidos a escalas regional y local utilizando redes GNSS y perfiles de nivelación de alta precisión, evidencia su actividad actual. Las fallas y deslizamientos submarinos tienen el potencial de deformar la columna de agua causando tsunamis. En este contexto, el proyecto BARACA analiza los procesos geológicos peligrosos y sus interacciones para establecer los factores que influyen en la potencial ocurrencia de procesos en cascada que pueden producir tsunamis. Este análisis permitirá además mejorar los protocolos de estudio.

Abstract

The central Betic-Rif mountain range and Alboran Sea constitute the optimal region for examining active geological processes. A comprehensive approach integrating the existing and new onshore, offshore, and coastal geological, geophysical and geodetical data is carried with the aim of establishing the cascading geological hazards in the Betic-Alboran-Rif shear zone. The active faults are evidenced by the seismic series occurring in the zone, which are linked to the Eurasia-Nubia (Africa) heterogeneous plate collision. Research on partially submerged landslides in the coast and dams as well as on submarine ones aims to comprehend their responses under geodynamic seismic and aseismic conditions. The monitoring of tectonic deformations and semisubmerged landslides at regional and local scales, utilizing GNSS networks and high-precision leveling profiles, provides evidence of present-day activity. Fault and submarine landslide activity may deform water masses and trigger tsunamis. In this context, the BARACA project analyzes the hazardous geological processes and their interactions in order to know the factors that may provoke the occurrence of hazardous geological processes in cascade that finally may produce tsunamis. This analysis will also allow the study protocols to be improved.

*Grupo BARACA: Aerden, D.G.A.M., Azzouz, O., Benmakhlouf, M., Borque, M. J., Castro, C.D., Chiocci, F., Chourak, M., d'Acremont, E., Delgado, J., Ercilla, G., Fernandez-Puga, M. C., Galindo-Zaldívar, J., Gomez-Hurtado, E., Gonzalez-Vida, J. M., Idarraga, J., Junge, A., Lafuerza, S., Lamas, F. J., Latni, El M., Madarieta-Txurruka, A., Martínez-Moreno, F. J., Martino, S., Ortega-Acosta, S., Palomino, D., Peláez-Montilla, J. A., Rodríguez-Peces, M. J., Ruiz-Fuentes, A., Sakellariou, D., Santamaria-Lopez, A., Teixeira, M., Tendero-Salmerón, V., Vazquez, J. T.

Inicio de la Corriente Circumpolar Antártica en el Paso del Drake: implicación de los eventos tectónicos y las variaciones sedimentarias

Antarctic Circumpolar Current onset in the Drake Passage: Tectonic events and sedimentary variations implication

A. Gamisel-Muzás[1], C. Escutia[1], F. Bohoyo[2]

[1] Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT-CSIC, 18100, Armilla, Granada. a.gamisel@csic.es. cescutia@ugr.es
2 Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, 28760, Tres Cantos, Madrid. F.bohoyo@igme.es

Palabras clave: Corriente Circumpolar Antártica, sondeos ODP, perfiles sísmicos, modelización gravimétrica y magnética.

Resumen

Estudiar los principales eventos tectónicos y sedimentarios que han influido en el establecimiento y desarrollo de la Corriente Circumpolar Antártica (CCA) es crucial para comprender su evolución e influencia en el clima. Las aperturas de los pasos oceánicos del Drake y de Tasmania han facilitado su distribución actual (Kennett, 1977), aunque persiste la controversia respecto a los mecanismos que propiciaron dichas aperturas. Estudios en el Paso de Tasmania apuntan a que es hace ~10 Ma cuando la ACC adquiere su naturaleza actual (Evangelinos et al., 2024) (más amplia, rápida y profunda del océano global) y señalan al Paso del Drake como pieza esencial para dilucidar el control tectónico y/o climático en el desarrollo de la misma. Se pretende constreñir esta incertidumbre a través de la caracterización de testigos de sedimento de los sondeos del Ocean Drilling Program (ODP) más próximos a la Península Antártica, la interpretación de perfiles sísmicos y la modelización gravimétrica y magnética de la estructura del margen noroccidental de la Península Antártica.

Abstract

Studying the main tectonic and sedimentary events that affected the onset and development causes of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) is key to understand its evolution and influence on the climate. The opening of Drake and Tasmanian Passages allowed its nowadays distribution (Kennett, 1977), yet there is still controversy regarding the involved mechanisms. Studies taken place at Tasmanian Gateway point to ~10 Ma, as the time when the ACC acquired its current characteristics (Evangelinos et al., 2024) (widest, fastest and deepest global oceanic current) and point to the Drake Passage as an essential piece to elucidate the tectonic and/or climatic control in the final development stages of the modern ACC. We aim to constrain this uncertainty through the analysis of sediment cores from the Ocean Drilling Program (ODP) nearest to the Antarctic Peninsula, the interpretation of seismic profiles, and gravimetric and magnetic modelling of the northwestern margin of the Antarctic Peninsula.

Referencias

Evangelinos D., Etourneau J., van de Flierdt T., Crosta, X., Jeandel, C.. Flores, J.A., Harwood D.M., Valero, L., Ducassou, E. Sauermilch, I., Klocker, A., Cacho, I., Pena, L., Kreissing, K., Benoit, M., Belhalj, M., Paredes, E., García-Solsona, E., López-Quirós A., Salabarnada A. and Escutia C., Late Miocene onset of the Antarctic Circumpolar Current. Nature Geosciences, in press. DOI: 10.1038/s41561-023-01356-3

Kennett, J. P. Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic ocean, and their impact on global paleoceanography. Journal of Geophysical Research. 82, 3843-3860 (1977).

Morfología y sedimentación en la plataforma continental y talud superior del noroeste de Galicia y su relación con los hábitats bentónicos.

Morphology and sedimentation on the NW continental shelf and upper slope of Galicia and their links with benthonic habitats.

M. García[1], L.M. Fernández-Salas[1], I.P. Diez-García[2], J. Valeiras[3] y I. Herraiz[4]

1 Centro Oceanográfico de Cádiz (IEO-CSIC). Muelle de Levante, s/n, Puerto Pesquero. C.P. 11006 Cádiz. marga.garcia@ieo.csic.es; luismi.fernandez@ieo.csic.es.
2 Subdirección General de Investigación (IEO-CSIC). Corazón de María, 8, 28002 Madrid. irene.diez@ieo.csic.es.
3 Centro Oceanográfico de Vigo (IEO-CSIC). Subida a Radio Faro, 50-52, 36390 Vigo. julio.valeiras@ieo.csic.es.
4 Centro Oceanográfico de A Coruña (IEO-CSIC). Paseo Alcalde Francisco Vázquez, 10, 15001 A Coruña. isabel.herraiz@ieo.csic.es.

Resumen: Los fondos de la plataforma y talud superior del margen noroeste de Galicia han sido estudiados mediante técnicas acústicas de muy alta resolución en el marco del proyecto ISUNEP25, con objeto de caracterizar los rasgos morfosedimentarios y los procesos geológicos y oceanográficos que afectan a los fondos marinos y a los hábitats bentónicos. Este trabajo presenta la primera aproximación a dicho estudio de detalle, que ha dividido la zona de estudio en cuatro sectores. La plataforma presenta afloramientos rocosos delimitados por rellenos sedimentarios por corrientes en su sector proximal y un gran un depósito contornítico monticular con campos de ondas sedimentarias en su sector externo. En la terraza de Ortegal, caracterizada por procesos oceanográficos de alta energía, destaca la actividad biogénica y los escapes de fluidos, que originan depresiones (*pockmarks*) y montículos, además del efecto de la acción antrópica reflejada en grandes surcos lineales como efecto de la pesca de arrastre. La rampa del talud superior presenta *pockmarks* y montículos biogénicos indicativos de la actividad de las corrientes de fondo. Este estudio pone de manifiesto el efecto de la actividad humana en los fondos y la interacción entre procesos sedimentarios y oceanográficos con los hábitats bentónicos.

Palabras clave: Margen continental de Galicia; Rasgos morfosedimentarios; Procesos sedimentarios; Corrientes de fondo.

Abstract: *The continental shelf and upper slope of the NW Galicia margin have been studied by the use of very-high resolution acoustic techniques by the Project ISUNEP25, with the aim of characterizing the morphosedimentary features and the oceanographic and geologic processes affecting the seafloor and the benthonic habitats. This contribution shows the first detailed description of the study area, divided into four main sectors. The continental shelf presents rocky outcrops with lateral deposits affected by currents on the inner sector, and a large contourite drift with sediment wave fields on the outer sector. In the Ortegal terrace, characterized by the activity of high-energy oceanographic processes, biogenic activity and fluid escape create depressions (pockmarks) and mound, while the fishing activity generates abundant trawl marks. The upper slope ramp presents pockmarks and biogenic mounds related with bottom current activity. This work reveals the effect of human activity on the seafloor and the close link between sedimentary and oceanographic processes with the benthic habitats.*

Key words: *Galicia contienental margin; Morphosedimentary features; Sedimentary processes; Bottom currents.*

INTRODUCCIÓN

La plataforma continental del noroeste de Galicia es una de las áreas marinas del margen continental ibérico que carece de información detallada y de alta resolución sobre sus características morfosedimentarias, a pesar de albergar zonas con gran abundancia de recursos pesqueros. Este estudio aborda el análisis de los rasgos morfosedimentarios como parte del proyecto ISUNEP25 del Instituto Español de Oceanografía. El objetivo del proyecto es evaluar el stock de cigala (*Nephrops norvegicus*) de la Unidad Funcional 25 (Galicia Norte) establecida por el Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES) y monitorizar el estado ambiental de sus hábitats, incluyendo la caracterización morfosedimentaria, ya que la cigala vive en madrigueras excavadas en el fondo marino.

MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo se basa en los datos de batimetría y reflectividad obtenidos mediante el uso de ecosonda

multihaz (EM710), y perfiles de sonda paramétrica (TOPAS PS18) adquiridos en la campaña ISUNEP25-0623, realizada a bordo del buque oceanográfico Ramón Margalef. Los datos de batimetría y reflectividad se procesaron utilizando el software Caris HIPS & SIPS 11.4, mientras que los perfiles de alta resolución se analizaron con el software Kingdom Suite de S&P Global. Como batimetría regional se han utilizado las cartas proporcionadas por EMODNET (https://portal.emodnet-bathymetry.eu).

CARACTERIZACIÓN FISIOGRAFICA Y MORFOSEDIMENTARIA

El margen noroeste de Galicia se orienta con una dirección general SO-NE (Fig. 1). El borde de plataforma se sitúa a profundidades entre los 180 y 200 m. En la parte NE del área de estudio se encuentra la terraza de Ortegal, que se extiende hacia el NO con una anchura máxima de unos 80 km, alcanzando los 450 m de profundidad. En dirección SO, el borde de la plataforma se caracteriza por un leve aumento de pendiente, formando el talud superior una rampa de unos 20 km que alcanza profundidades en torno a los 460 m.

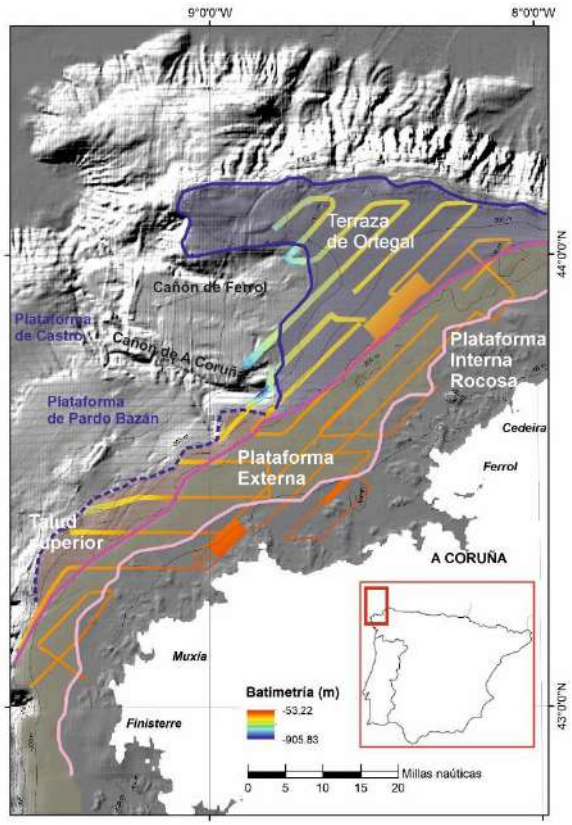


FIGURA 1. Mapa del margen continental de Galicia mostrando la cobertura de datos acústicos de sonda paramétrica (TOPAS PS18) y sonda multihaz (EM710) y la distribución de los sectores morfosedimentarios en los que se divide el área de estudio. La base cartográfica batimétrica corresponde a los datos de EMODNET.

La zona de estudio se divide en distintos sectores diferenciados tanto por las características fisiográficas como por los rasgos morfosedimentarios identificados en los perfiles de TOPAS y datos de batimetría y reflectividad (Fig. 1): 1) Plataforma interna rocosa; 2) Plataforma externa sedimentaria; 3) Terraza de Ortegal; 4) Rampa del talud superior.

La plataforma interna rocosa somera exhibe una pendiente que varía entre 0 y 2º y alcanza los 120-150 m de profundidad, con una extensión máxima de unos 22 km (Fig. 1). En este sector abundan los afloramientos rocosos, de hasta 30 m de altura que muestran valores altos de reflectividad y un relieve irregular, con lineaciones en direcciones NO-SE a NNO-SSE (Figs. 2b y 2c). Corresponderían a los afloramientos ígneos y metamórficos identificados en las zonas de las rías (García-Gil et al., 2000; Durán et al., 2000, 2001; García-García et al., 2003). Dichos afloramientos delimitan zonas irregulares de reflectividad media-alta con rellenos sedimentarios de morfologías monticulares, en forma de prisma o irregulares, y facies caóticas a laminares. En las proximidades de los afloramientos se identifican zonas con depresiones elongadas de orientaciones variables y reflectividades altas, con profundidades menores a 1 m y anchuras de hasta 100 m.

La plataforma externa muestra una batimetría más uniforme (Fig. 1) y valores de reflectividad moderados a bajos. Los perfiles de TOPAS revelan la presencia de una cuña sedimentaria que aumenta su espesor aguas adentro y se vuelve a acuñar hacia el borde. La batimetría de este sector muestra una morfología monticular elongada, orientada de forma paralela a las isobatas, y delimitada proximalmente (al pie de los relieves rocosos más distales) por una depresión paralela a la orientación del montículo, a profundidades entre 170 y 200 m. La batimetría y los perfiles muestran que en su mayor parte la plataforma externa presenta ondas de sedimento con crestas orientadas N-S (Fig. 2d), y amplitudes y espaciado variables, alcanzando alturas de hasta 5 m. En esta zona se han caracterizado parches de fango correspondientes al denominado Cinturón Fangoso de Galicia, que se ha relacionado con las corrientes de dirección general hacia el N-NE que barren la plataforma (Fernández-Salas et al., 2015).

La terraza de Ortegal ha sido considerada por Llave et al. (2018) como el resultado de los procesos oceanográficos de alta energía en la interfase entre las masas de agua Central del Atlántico Noreste (Eastern North Atlantic Central Water, ENACW) y Mediterránea (Mediterranean Outflow Water, MOW). En esta zona la reflectividad muestra el efecto de la actividad de la pesca en forma de marcas lineales de arrastre que se extienden a lo largo de decenas de kilómetros y pueden alcanzar 400 m de ancho (Fig. 2e). Hacia la zona distal de la terraza, se encuentran depresiones circulares (Fig. 2f) que alcanzan diámetros de hasta 600 m y profundidades de hasta 25 m. A profundidades entre 400 y 460 m también se encuentran montículos elongados en dirección NE-SO (Fig. 2g). Estos rasgos cuentan con alturas en torno a los 2 m y anchuras máximas de 150-180 m y altas reflectividades. Estructuras similares a las depresiones circulares y los montículos fueron interpretadas como pockmarks y

domos generados por escape de fluidos por Llave et al. (2018). Hacia el extremo norte de la terraza de Ortegal, la cobertera sedimentaria desaparece, revelando afloramientos rocosos con rasgos estructurales como pliegues y fallas (Fig. 2h). En el borde de la terraza, también se observan morfologías en forma de anillos o montículos circulares o irregulares que contrastan por su baja reflectividad, alcanzando diámetros de hasta 200 m y alturas de hasta 6 m. Estos montículos se interpretan como bioconstrucciones probablemente relacionadas con crecimiento de corales (Collart et al., 2018; Llave et al., 2018).

Finalmente, en la rampa del talud superior se identifican depresiones circulares de hasta 300 m de diámetro y 26 m de profundidad, interpretadas como *pockmarks*, y numerosos montículos irregulares de alta reflectividad que se interpretan como estructuras de origen biogénico.

PROCESOS SEDIMENTARIOS, OCEANOGRÁFICOS Y TECTÓNICOS Y SU RELACIÓN CON LOS HÁBITATS BENTÓNICOS

Los rasgos morfosedimentarios identificados en este trabajo permiten caracterizar la plataforma y talud noreste de Galicia como un margen con un aporte sedimentario relativamente bajo, indicado por la escasa potencia de la cobertera sedimentaria. Esta cobertera, en su mayor parte, solo se encuentra rellenando las irregularidades del basamento rocoso, que aflora hasta profundidades elevadas, de hasta 150 m en la plataforma interna. La plataforma externa muestra la actividad de la corriente sobre el fondo, que se traduce en el desarrollo de ondas sedimentarias y en el depósito del cuerpo monticular elongado limitado por una zona de no-depósito situada al pie de los relieves de afloramientos rocosos. Las principales corrientes en esta zona fluyen hacia el norte (Haynes and Barton, 1990), transportando el sedimento fino en esa dirección.

La terraza de Ortegal y la rampa del talud superior presentan evidencias de procesos de escape de fluidos, los cuales pueden estar vinculados con procesos tectónicos, al poderse asociar la presencia de pockmarks y domos con fallas de dirección NE-SO y NO-SE en los límites de la terraza de Ortegal, así como con fallas de dirección E-O en la zona que limita la rampa del talud superior (Rodríguez-Fernández et al., 2014). La actividad de las corrientes en esta zona se relacionaría con la presencia de la interfase entre las masas de agua ENACW y MOW.

La distribución de los rasgos morfosedimentarios y su relación con los procesos sedimentarios, tectónicos y oceanográficos muestra la importante interrelación entre estos procesos y los hábitats bentónicos y su diversidad (Lozano et al., 2020). En la zona de estudio, la presencia de los parches fangosos en la plataforma continental, influida por las corrientes dirigidas hacia el norte, delimita la distribución del hábitat de la cigala. En cambio, la distribución de bioconstrucciones de origen

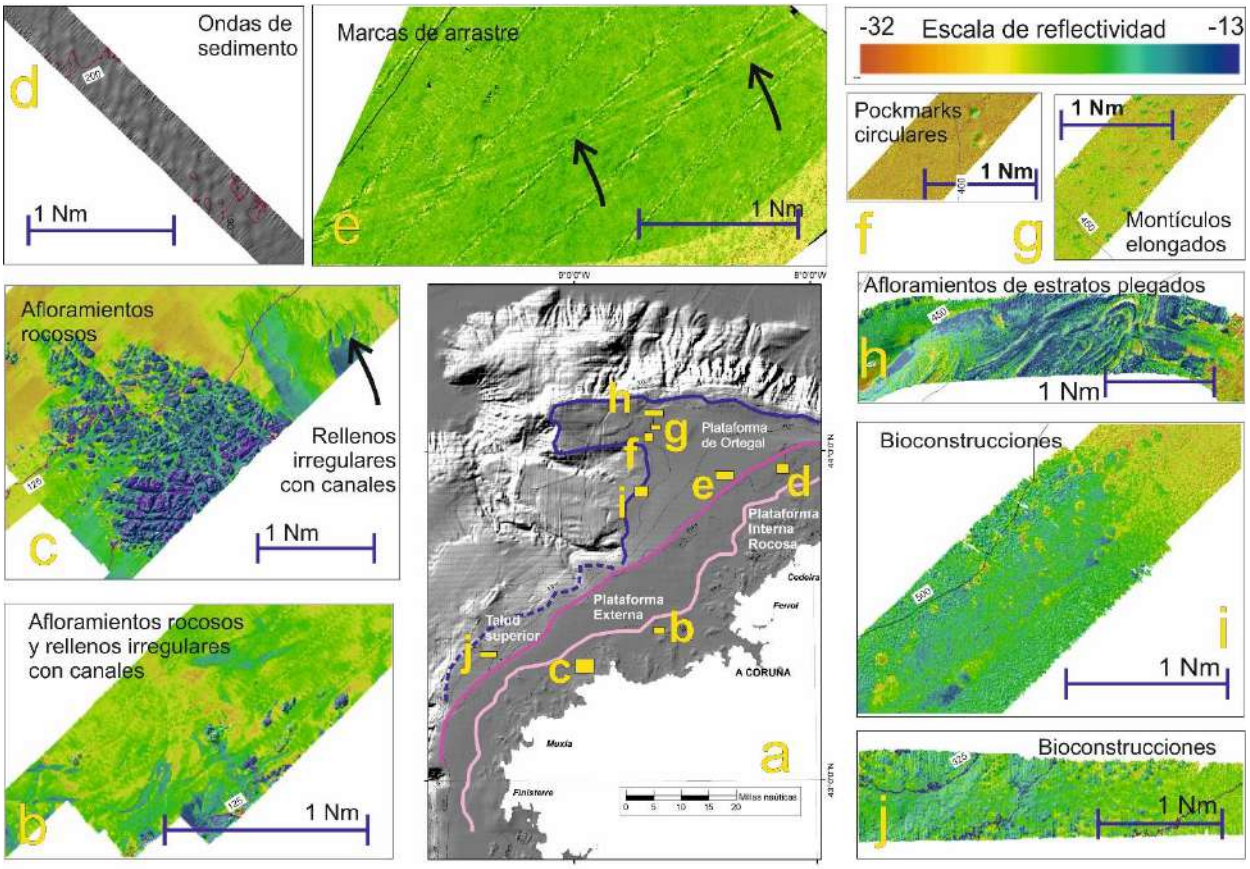


FIGURA 2. Ejemplos de los rasgos morfosedimentarios descritos en la plataforma y talud superior del margen de Galicia. Se muestran los relieves sombreados combinados con la reflectividad, excepto la Figura 2d, con el objeto de mejorar la visualización.

posiblemente coralino estaría relacionada con procesos de mayor energía en las interfases entre masas de agua, en particular entre la ENACW y la MOW.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el trabajo de las tripulaciones del BO Ramón Margalef y al equipo ISUNEP25 por su invaluable contribución en la toma de datos, y a S&P Global por la cesión de licencias académicas para el uso del software Kingdom Suite.

REFERENCIAS

Collart, T., Verreydt, W., Hernández-Molina, F.J., Llave, E., León, R., Gómez-Ballesteros, M., Pons-Branchu, E., Stewart, H., y Van Rooij, D. (2018): Sedimentary processes and coldwater coral mini-mounds at the Ferrol canyon head, NW Iberian margin. *Progress in Oceanography*, 169: 48-65.

Durán, R., García-Gil, S. y Vilas, F. (2000): Aplicación del Sonar de Barrido Lateral a la cartografía de fondos marinos: Ejemplo de la Ría de Pontevedra (Galicia, NO España). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 26: 43-64.

Durán, R., Manso, F., Bernabeu, A.M., García-Gil, S. y Vilas, F. (2001): Estudio de la dinámica sedimentaria de la plataforma interna gallega: La Lanzada (NO España). *Geotemas*, 3: 145-148.

Fernández-Salas, L. M., Durán, R., Mendes, I., Galparsoro, I., Lobo, F. J., Bárcenas, P., Rosa, F., Ribó, M., García-Gil, S., Ferrín, A., Carrara, G., Roque, C. y Canals, M. (2015): Shelves of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands (I): Morphology and sediment types. *Boletín Geológico y Minero*, 126 (2-3): 327-376.

García-García, A., García-Gil, S. y Vilas, F. (2003): Echocharacters and recent sedimentary processes as indicated by high-resolution sub-bottom profiling in Ría de Vigo (NW Spain). *Geo-Marine Letters*, 24: 32-45.

García-Gil, S., Durán, R. y Vilas, F. (2000): Side scan sonar image and geologic interpretation of the Ria de Pontevedra seafloor (Galicia, NW Spain). *Scientia Marina*, 64: 393- 402.

Haynes, R. y Barton, E.D. (1990): A poleward flow along the Atlantic coast of the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 95: 11425-11441.

Llave, E., Jané, G., Maestro, A., López-Martínez, J., Hernández-Molina, F.J. y Mink, S. (2018): Geomorphological and sedimentary processes of the glacially influenced northwestern Iberian continental margin and abyssal plains. *Geomorphology*, 312: 60-85.

Lozano, P., Fernández-Salas, L.M., Hernández-Molina, F.J., Sánchez-Leal, R., Sánchez-Guillamón, O., Palomino, D., Farias, C., Mateo-Ramírez, A., López-González, N., García, M., Vázquez, J.T., Vila, Y. y Rueda, J.L. (2020): Multiprocess interaction shaping geoforms and controlling substrate types and benthic community distribution in the Gulf of Cádiz. *Marine Geology* 423: 106139.

Rodríguez-Fernández, L.R., López-Olmedo, F., Oliveira, J.T., Medialdea, T., Terrinha, P., Matas, J., Martín-Serrano, A., Martín-Parra, L.M., Rubio, F., Montes, M. y Nozal, F. (2014): *Mapa Geológico de España y Portugal a escala 1:1.000.000.* Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Contourite stratigraphic models in the Alboran Sea: water flow regime variations of the light intermediate and dense deep Mediterranean water masses

Modelos estratigráficos de contornitas en Mar de Alborán: variaciones del régimen de flujo de las masas de agua intermedia y profunda del Mediterráneo

G. Ercilla[1*], B. Alonso[1], C. Juan[2], N. López-González[3], I. Cacho[4], G. Francés[5], D. Palomino[3], P. Bárcenas[3], M. Yenes[6], J. Nespereira[6], B. Ausín[6], P. Mata[7†] , D. Casas[1]

1 Institut de Ciències del Mar ICM-CSIC, The Continental Margins Group-GMC, Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona, Spain. belen@icm.csic.es, gemma@icm.csic.es, davidcasas@icm.csic.es
2 Instituto Español de Oceanografía, CSIC, Centro Oceanográfico de Cádiz, Puerto Pesquero, Muelle de Levante s/n, 11006 Cádiz, Spain. carmen.juan@ieo.csic.es
3 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Centro Oceanográfico de Málaga, Puerto Pesquero s/n, 29640 Fuengirola, Málaga, Spain. nieves.lopez@ieo.csic.es, desiree.palomino@ieo.csic.es, patricia.barcenas@ieo.es
4 Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad de Barcelona, Martí Franqués s/n, 08028 Barcelona, Spain. icacho@ub.edu
5 Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Vigo, Campus Universitario Lagoas, 36200 Vigo, Spain. gfrances@uvigo.es
6 Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca, Spain. myo@usal.es, jnj@usal.es, ausin@usal.es
7 Instituto Geológico y Minero de España-CSIC, Río Rosas 23, 28003 Madrid, Spain. p.mata@igme.csic.es

Abstract: Based on an integration of chronological, sedimentological, and compositional analysis on sediment cores in the NW Alboran Sea, we define three stratigraphic models for the contourites formed by the light intermediate (LMW) and dense deep Mediterranean (DMW) bottom currents, during the last glacial period to the Holocene. The contourite terrace model (I) is characterized by coarse-grained sediment sequences. It is an archive of the interplay between the high-energy Atlantic Water-LWM interface and glacioeustasy from the Younger Dryas (YD) to the Holocene. The contourite drift models (II) comprise coarse-grained sediment sequences formed by a relatively fast LMW and also, fine-grained sediment sequences formed by a relatively weak DMW, except for the Heinrich Stadials HS3 to HS1 and YD when coarse-grained sequences were deposited. These models represent archives of rapid ocean-climate coupled fluctuations since 29 kyr. Finally, the contourite/turbidite mixed model (III) comprising a fine and coarse-grained sediment sequences, represents another archive of DMW and glacioeustasy interplay from the end of the late Pleistocene to Holocene. These three contourite stratigraphic models allows us to decode for the first time the relative variability of the LMW *versus* DMW flow regimes.

Palabras clave: Contourite, Mediterranean water masses, stratigraphy, paleoceanography, Alboran Sea.

Resumen: *El análisis cronológico, sedimentológico y composicional de testigos de sedimento en el NO del mar de Alborán permite definir tres modelos estratigráficos formados por las corrientes de fondo de las masas de agua mediterráneas intermedia (LMW) y profunda (DMW), para el último período glacial hasta el Holoceno. El modelo de terraza de contornítica (I) presenta secuencias de grano grueso y es un archivo de los procesos oceanográficos de alta energía que acontecen en la interfase entre la masa de agua del Atlántico y la LWM desde el Dryas Reciente (YD) hasta el Holoceno. Los modelos de crestas contorníticos (II) comprenden secuencias de grano grueso formadas una LMW rápida y secuencias de grano fino formadas por una DMW débil, excepto para los estadiales de Heinrich estadiales HS3 a HS1 y YD. Estos modelos estratigráficos contorníticos representan archivos de fluctuaciones rápidas de la interacción océano-clima desde hace 29.000 años. El modelo mixto contornita/turbidita (III) comprende secuencias de grano fino y grueso formados por cambios de dinámica en la DMW durante el cambio glacioeustático, desde finales del Pleistoceno tardío. Estos tres modelos estratigráficos contorníticos permiten decodificar por primera vez la variabilidad relativa de los regímenes de flujo de LMW versus DMW.*

Palabras clave: *contornita, masas de agua mediterráneas, estratigrafía, paleoceanografía, mar de Alborán.*

INTRODUCTION

The Alboran Sea, located in the southwestern Mediterranean, exhibits considerable variability in its paleoenvironmental and paleoceanographic conditions because it represents the area where the Atlantic and Mediterranean waters encounter (Cacho et al., 2001; Pérez-Folgado et al., 2003; Rogerson et al., 2012). Within this sea, extensive contourite depositional systems are prominent, representing sedimentation in deep-water environments beyond the continental shelf during the Plio-Quaternary (Ercilla et al., 2016; Juan et al., 2016, 2020). Those authors have demonstrated that these systems are formed by the action of the light

intermediate (LMW) and dense deep Mediterranean (DMW) bottom currents and also by the turbulent processes characterizing their interface with the Atlantic Water (AW), all contributing to the complex sedimentary processes in the region.

Sedimentological, compositional and chronological analyses have been carried out on sediment cores located between the Guadiaro and Baños canyons to the north and the adjacent deep basin of the Moroccan margin, in the W Alboran Sea. Cores were retrieved from a contourite terrace (T1 and drifts D1 to 4), and from the overbank of the Guadiaro fan (Fig. 1). The main aim of this work has been to decode the bottom current variations of the LMW and DMW oceanography during the last glacial-Holocene.

RESULTS AND DISCUSSION

Contourite, turbidite and mixed contourite/turbidite facies have been characterized. Their vertical arrangement and morphosedimentary location have allowed to define two contourite stratigraphic models, terrace and drift models, and a contourite/turbidite mixed model (Alonso et al., 2021; 2023) (Fig.1).

The contourite terrace model (I) comprise coarse-grained sediments that form homogeneous sequences with a fining-upward trend (see terrace T1 in Fig. 1). This stratigraphic model has resulted from the turbulent processes of the AW-LMW interface and its landward migration due to the sea level rise that occurred from the YD to the Holocene.

The contourite drift model (II) involves two different stratigraphic sequences based on the grain size of facies; one coarser that characterizes the shallower slope drift (D1) and another finer for the deeper drifts D2, D3 and D4 (base-of-slope to basin) (Fig. 1). The coarse-grained drift model is characterized by bigradational sequences. They were formed by the action of the LMW bottom current variability during the LGM (since 29 kyr) and also the Holocene during cold periods at millennial (Heinrich stadials HS3 and HS1, and YD) and centennial scales. The fine-grained drift model comprises silty and sandier thin beds within the overall muddier sediments. The intercalations of these coarser beds form sequences with different vertical trends, such as bigradational, topcut-out, basecut-out and homogenous sequences. They form under the action of the of DMW bottom currents affected by abrupt velocity reinforcements during rapid cold periods since the last 25.5 kyr, at millennial (HS2, YD)- and centennial-scale scales.

The mixed model (III) represents a mixed of turbidites and contoruites facies, both alternatively and simultaneously due to the the interaction of turbidity flows and DMW bottom currents. Indeed, a discernible vertical trend is observed. Initially, turbidites were deposited during the latest Pleistocene. Subsequently, there is a transition towards contourite/turbidite mixed deposits, reflecting a shift in depositional dynamics of the DMW bottom currents during the Younger Dryas (YD) period. Finally, during the Holocene, contourites become the predominant marking a distinct phase characterized by more stable and persistent bottom currents.

The analysis of contourite drift sequences provides valuable insights into the relative variability of the LMW

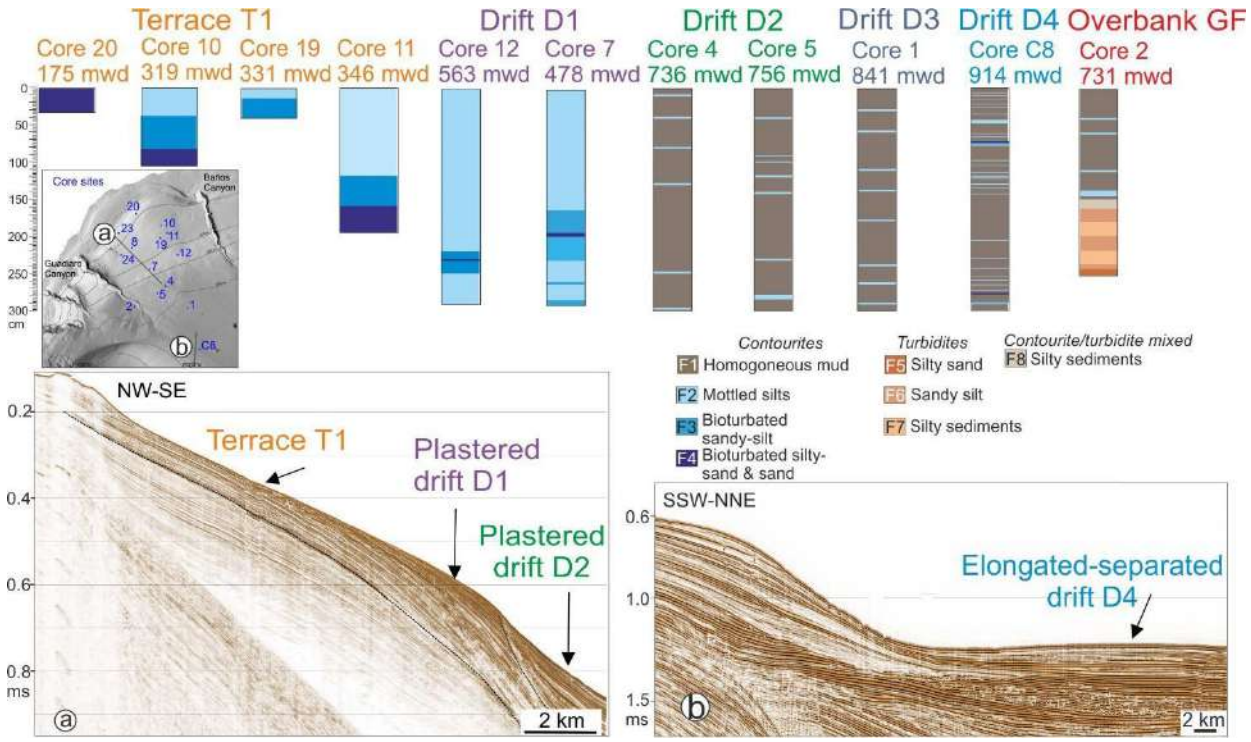


FIGURA 1. *Stratigraphic logs of the studied sediment cores. The stratigraphy comprises different types of facies (F1 to F8) that have been classified as contourite, turbidite and mixed deposits. Seismic profiles pointing the different contourite features that have been sedimentological characterized are also shown. Likewise, a map with the location of the analysed sediment cores and of the displayed seismic records are included.*

versus the DMW flow regimes in the Alboran Sea, shedding light on both similarities and differences between them. These similarities suggest that variations in LMW and DMW flow regimes occur in tandem, reflecting fluctuations across three distinct temporal scales: 4th order, millennial, and centennial scales.

However, a notable difference emerges in terms of the overall velocity of LMW versus DMW, with LMW typically exhibiting lower velocities except during HS2, where DMW also experiences an increase in bottom current velocity. Additionally, a disparity is observed in the magnitude of velocity changes, being lower for the LMW than for the DMW.

ACKNOWLEDGMENTS

The contribution is dedicated to memory of our colleague and friend Mª Pilar Mata. Research was funded by FAUCES (CTM2015-65461-C2-1-R) and CONTOURIBER (CTM 2008-06399-C04) projects. ICM-CSIC scientists thank for the Severo Ochoa Centre of Excellence accreditation (CEX2019-000928-S).

REFERENCIAS

Alonso, B., Juan, C., Ercilla, G., Cacho, I., López-González, N., Rodríquez-Tovar, F.J., Dorador, J., Francés, G., Casas, D., Vandorpe, T., Vázquez, J.T., (2021). *Marine Geology*, 437, 106488.

Alonso, B., Ercilla, G., Juan, C., López-González, N., Cacho, I., Francés, G.,Palomino, D., Bárcenas, P., Yenes, M., Nespereira, J.,Ausín, B., Mata, P., Casas, D. (2023). *Marine Geology*, 465, 107147.

Ercilla, G., Juan, C., Hernández-Molina, F.J., Bruno, M., Estrada, F., Alonso, B., Casas, D., Farran, M.L., Llave, E., García, M., Vázquez, J.T., D'Acremont, E., Gorini, C., Palomino, D., Valencia, J., El Moumni, B., Ammar, A. (2016). *Marine Geology*, 378, 157–170.

Juan, C., Ercilla, G., Hernández-Molina, F.J., Estrada, F., Alonso, B., Casas, D., García, M., Farran, M.L., Llave, E., Palomino, D., Vázquez, J.T., Medialdea, T., Gorini, C., D'Acremont, E., El Moumni, B., Ammar, A. (2016). *Marine Geology*,. 378, 292–311.

Juan, C., Ercilla, G., Estrada, F., Alonso, B., Casas, D., Vázquez, J.T., D'Acremont, E., Medialdea, T., Hernández-Molina, F.J., Gorini, C., El Moumni, B., Valencia, J. (2020). *Marine Geoolgy*, 423, 106138.

Comparación geomorfológica de márgenes continentales ibéricos: interacción entre la tectónica y la sedimentación durante el Cuaternario

Geomorphological comparison of Iberian continental margins: interaction between tectonics and sedimentation during the Quaternary

G. Ercilla[1], J. Galindo-Zaldívar[2], C. Juan[3], F. Estrada[1], J. Iglesias[4]*, J. Valencia[5], V. Tendero-Salmerón[2], E. d'Acremont[6], M.C. Fernández-Puga[7], L. González-Castillo[2], A. Madarieta-Txurruka[2], D. Palomino[8], M. Teixeira[9], J. T. Vázquez[8]

1 Institut de Ciències del Mar, Grupo de Márgenes Continentales, CSIC, 08003 Barcelona, España. gemma@icm.csic.es; festrada@icm.csic.es; vtendero@ugr.es
2 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. jgalindo@ugr.es; lgcastillo@ugr.es; amadatxu@ugr.es
3 Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, C.O. Cádiz, 11006 Cádiz, España. carmen.juan@ieo.csic.es
4 Universidade de Vigo, Dpto. Xeociencias Mariñas e Ordenación do Territorio. 36817 Redondela, Pontevedra, España. * Dirección actual: Eurofins | IPROMA, 36418, Sanguiñeda, Mos, Pontevedra, España. jiglesiascrespo@gmail.com
5 LYRA, Engineering Consulting, 01015 Gazteiz, España. javi.valencia.m@gmail.com
6 ISTeP, Sorbonne Université, Campus Jussieu and CNRS, UMR 7193, F-75005 Paris, Francia. elia.dacremont@sorbonne-universite.fr
7 Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR (Instituto Universitario de Investigación Marina), Universidad de Cádiz, 11510 Cádiz, España. mcarmen.fernandez@uca.es
8 Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, C.O. 29640, Fuengirola, Málaga, España. desiree.palomino@ieo.csic.es; juantomas.vazquez@ieo.csic.es
9 IDL (Laboratório Associado) – Instituto Dom Luíz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal. mane.teixeira@gmail.com

Resumen: La interacción entre la tectónica y la sedimentación cuaternaria de los márgenes continentales ibéricos del mar de Alborán, golfo de Vera y Cantábrico se analiza a través de la comparación de la fisiografía y los depósitos que conforman su geomorfología. La influencia de la tectónica en la geomorfología sedimentaria de los tres márgenes presenta similitudes y diferencias. En la plataforma continental, el levantamiento terrestre, activo o inactivo, determina la preservación de los depósitos, su anchura y los gradientes del fondo marino. En el margen continental distal, los altos tectónicos y volcánicos, las grandes fallas, las cuencas intratalud, la geometría general de las cuencas marinas y el basculamiento tectónico regional son los principales elementos y procesos morfotectónicos que influyen significativamente en el transporte, deposición y erosión. El análisis comparativo de los tres márgenes continentales permite establecer dos tipos de márgenes tectónicos en base a la geomorfología sedimentaria: desmantelados (margen del Golfo de Vera y margen Cantábrico) y constructivos (margen Ibérico de Alborán).

Palabras clave: geomorfología, margen continental, tectónica, sedimentación, Cuaternario.

Abstract: *By comparing the physiography and Quaternary deposits of three tectonically deformed Alboran, Gulf of Vera, and Cantabrian continental margins in Iberian, our objective is to examine the interplay of tectonics and sedimentation trough their geomorphology. We highlight similarities and differences in the tectonic influences and their signatures in the sedimentary geomorphology. In the continental shelf, the influence of active or inactive onshore uplift seems to dictate the preservation of deposits, subsequently impacting its width and seafloor gradients. In the distal continental margin and adjacent deep-sea areas, regional structural features such as active/inactive tectonic and volcanic highs, large faults, along-margin intraslope basins, overall sea basin geometry, and regional tectonic tilting play a crucial role in conditioning the transport, sedimentation, and erosión. The sedimentary geomorphology categorizes two types of tectonic margins: dismantled (Gulf of Vera and Cantabrian margins) and constructional (Iberian Alboran margin).*

Key words: *geomorphology, continental margin, tectonics, sedimentation, Quaternary.*

INTRODUCCIÓN

La geomorfología de los márgenes continentales modernos deformados tectónicamente responde a una compleja interacción entre los procesos tectónicos y la topografía estructural heredada (activa o inactiva) con el glacioeustatismo, el aporte de sedimento, la oceanografía y la hidrografía (p. ej., Mosher et al., 2017; Beelen y Wood, 2023).

Nuestro trabajo se desarrolla en el contexto de los márgenes continentales ibéricos. El principal objetivo es

obtener una visión general del papel determinante que juega la interacción de la tectónica (activa e inactiva) en la geomorfología sedimentaria de los principales márgenes continentales tectónicamente deformados en la Península Ibérica, durante el Cuaternario. Las zonas escogidas para este fin son los márgenes del sur en el mar de Alborán y golfo de Vera, ambos en el Mediterráneo, y el margen norte del Cantábrico en el Atlántico. Estos tres márgenes continentales están tectónicamente deformados debido a la convergencia e interacción NO-SE entre las placas de Eurasia-Iberia-África. Para este propósito, este artículo intenta proporcionar un vínculo conceptual entre estudios previos relacionados con la fisiografía y la morfoarquitectura sedimentaria general de los depósitos cuaternarios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la plataforma continental se observa que el tectonismo es un factor fundamental que condiciona la preservación de los depósitos de la plataforma continental, su anchura y la pendiente durante el Cuaternario (Fig. 1). El levantamiento activo en tierra conduce a la formación de plataformas más estrechas y con gradientes más altos, tal y como ocurre en el Mar de Alborán y golfo de Vera. Esto se debe a que el levantamiento ha provocado una baja preservación de los depósitos de la plataforma a lo largo del tiempo porque éstos se deforman rápidamente y se incorporan a la deformación costera. En contraste, la inactividad del levantamiento terrestre en el Cantábrico ha promovido una prolongada existencia de la plataforma, permitiendo el ensanchamiento gradual de la misma a lo largo del tiempo.

En el margen continental distal, varios son los parámetros y procesos tectónicos que han condicionado la geomorfología sedimentaria general en las tres áreas. Algunos son comunes y otros particulares de cada margen. Son los siguientes (Fig. 1): (i) la distribución regional de las grandes fallas y de los altos tectónicos y volcánicos, así como las elevadas pendientes que todos ellos presentan. La distribución ha condicionado la localización y desarrollo de cañones grandes en los tres márgenes y de pequeños en el golfo de Vera y Cantábrico; y las altas pendientes han influido en el desencadenamiento de una gran variedad de procesos de movimiento en masa cuyos depósitos moldean las superficies de esas estructuras en los tres márgenes. (ii) La existencia de cuencas intratalud a lo largo de los márgenes. Un ejemplo de ello es la cuenca de Le Danois en el margen cantábrico, que ha condicionado la aceleración local de las corrientes de fondo de la masa de agua mediterránea de salida, contribuyendo a la formación de depósitos contorníticos. Estos depósitos contribuyen al relleno de la mencionada cuenca durante el Cuaternario, obliterando las paleomorfologías del basamento y formando un fondo marino plano que destaca sobre el irregular circundante creado por la presencia de cañones y depósitos de movimiento en masa. (iii) La geometría regional de la cuenca marina. A mayor escala, la configuración semicerrada de la cuenca del mar de Alborán también ha condicionado la aceleración de las masas de aguas mediterráneas, creando una geomorfología dominada por los suaves rasgos de las crestas contorníticas. Y (iv) el basculamiento tectónico, que juega un papel importante en el margen distal del golfo de Vera. Este proceso ha contribuido al desarrollo de una geomorfología sedimentaria irregular compleja de depósitos de movimientos en masa que afecta a la casi totalidad del talud y el ascenso continental.

El reconocimiento de esta influencia tectónica en la geomorfología sedimentaria del Cuaternario ha permitido categorizar dos tipos de márgenes: desmantelados y constructivos. Los márgenes desmantelados caracterizan al margen tectónicamente activo del golfo de Vera y al inactivo del Cantábrico. En éstos, la interacción entre tectónica y sedimentación convierte al margen en una zona de trasvase de sedimento mediante procesos de inestabilidad sedimentaria, canalizados y sin canalizar, hacia a las cuencas profundas adyacentes, favoreciendo el relleno de las mismas. En contraste, los márgenes constructivos, tipificado para el margen activo Mar de Alborán, se caracterizan porque la interacción entre la tectónica y la sedimentación favorece que el margen continental distal sea el principal lugar de sedimentación mediante la acción dominante de procesos contorníticos.



FIGURA 1. *Parámetros y procesos tectónicos que controla la geomorfología sedimentaria de los márgenes continentales ibéricos de Alborán, golfo de Vera y Cantábrico durante el cuaternario.*

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por los proyectos. BARACA (PID2022-136678NB-I00. AEI/FEDER, UE), y EMODNET Ingestión y custodia de datos marinos- III EASME/EMFF/2018/…SI2.810021.

REFERENCIAS

Beelen, D. y Wood, L. J. (2023): Predicting bottom current deposition and erosion on the ocean floor. *Basin Research*, 35, 5: 1985-2009.

Mosher, D.C., Campbell, D.C., Gardner, J.V., Piper, D.J.W., Chaytor, J.D. y Rebesco, M. (2017): *Marine Geology*, 393: 245–259.

Posibles escenarios geológicos para el Banco del Guadalquivir (Golfo de Cádiz, Portugal).

Possible geological scenarios for the Guadalquivir Bank (Gulf of Cádiz, Portugal).

C. Giraldo Ceballos [1]

1 U3 Explore, Madrid, cgiraldoc1958@gmail.com

Resumen: A lo largo del margen suroeste del golfo de Cádiz existen montes submarinos claramente identificados en la batimetría, siendo el Banco del Guadalquivir una de estas conocidas estructuras. A partir de la revisión bibliográfica, se postulan diversos escenarios que explicarían su génesis y posibles contextos geológicos: desde un afloramiento de rocas paleozoicas asociado a la tectónica del basamento, hasta una posible acumulación sedimentaria del Plioceno - Pleistoceno, tipo "*MTD*" ("*Mass-transport deposit*"), deformada y levantada por la tectónica salina activa hoy en día.

Palabras clave: escenarios geológicos, afloramiento rocas paleozoicas, "MTD" Pleistoceno.

Abstract: *Along the southwest margin of the Gulf of Cádiz there are seamounts clearly identified in the bathymetry. The Guadalquivir Bank is one of these known structures. Based on the bibliographic review, various scenarios are postulated that would explain its origin and possible geological contexts: from an outcrop of Palaeozoic rocks associated with "thick - skin" tectonics, to a possible Pliocene - Pleistocene Mass-transport deposit (MTD) deformed and uplifted by active salt tectonics.*

Key words: *Geological scenarios, Palaeozoic rocks outcrop, Pleistocene MTD.*

INTRODUCCIÓN

Una de las características más resaltantes de la batimetría del golfo de Cádiz, es la presencia de montes submarinos, que se asocian a la extrusión de fluidos provenientes de zonas más profundas dentro de la cobertera sedimentaria Mesozoica – Cenozoica (Medialdea et al., 2004). Algunos de estos montes submarinos son volcanes de lodo, que se ubican por encima de zonas donde la movilidad de las evaporitas del Triásico superior – Jurásico inferior ha sido muy importante durante el Cenozoico. También sería el caso de los montes submarinos a lo largo del Banco de Portimao el cual se ubica unos 40 kilómetros al suroeste (Fig. 1).

El Banco del Guadalquivir (Fig. 1b) tiene una orientación N 70 E, y su parte más somera alcanza aproximadamente los 250 metros de profundidad. El flanco noroeste desciende hasta los 800 metros, mientras que el flanco sureste lo hace hasta casi 1.800 metros de profundidad. Para más detalles sobre la geología regional e interpretación sísmica, consultar a Ramos et al. (2017).

De acuerdo con el muestreo de rocas y análisis realizados por Vegas et al. (2003), en el Banco del Guadalquivir aflorarían unidades geológicas que se correlacionan con el basamento pre-Triásico. Por otro lado, los resultados de Giraldo et al. (2014), sugieren que dicho basamento se encontraría unos 3 a 4 kilómetros de profundidad (en base a sísmica de reflexión 2d y modelado gravimétrico). El mapa estructural del techo del basamento (Fig.2; Ramos et al., 2017) sugiere que, por debajo del Banco del Guadalquivir, el techo del basamento estaría entre 3 a 4 km de profundidad.

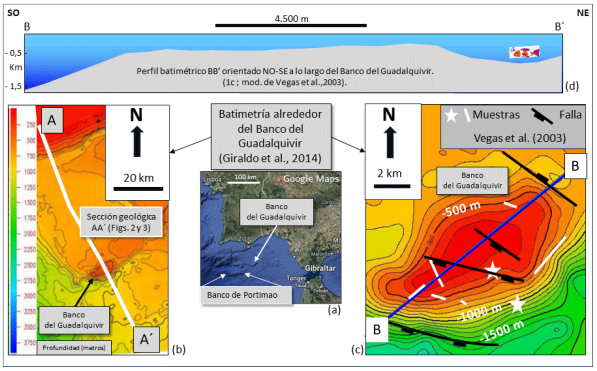


FIGURA 1. (a): Ubicación regional del Banco del Guadalquivir; (b): Localización de la sección geológica AA' (Figs.2 y 3); (c): Situación del perfil batimétrico BB' y muestras geológicas; (d): Perfil batimétrico BB'.

MUESTRAS DEL FONDO MARINO

Vegas et al. (2003; Fig. 1c) identificaron muestras del fondo marino, que se correlacionan con el basamento varisco, el cual aflora al norte: grauvacas, pizarras, cuarcitas, rocas volcánicas básicas y metabasitas en facies de anfibolita. Estas rocas se atribuyen al Complejo Volcano -Sedimentario de la Faja Pirítica (Zona Surportuguesa). Igualmente, mencionan una muestra de "*hardground*" carbonatado, con foraminíferos de edad Tortoniense superior - Messiniense inferior, que será discutida más adelante.

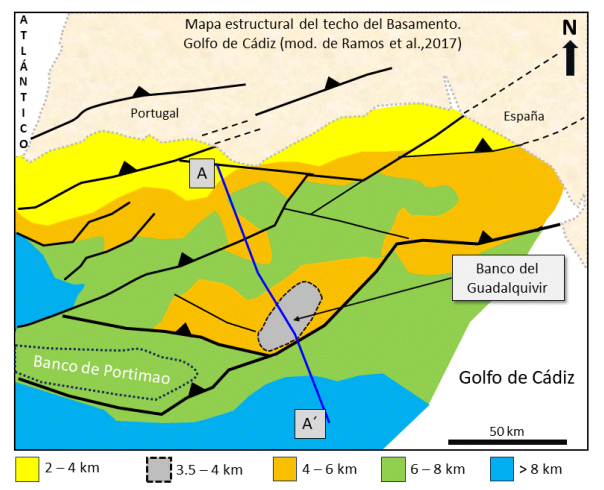


FIGURA 2. Mapa estructural simplificado del techo del Basamento (mod. de Ramos et al., 2017). Se ubica sección geológica AA' (Figs. 1 y 3).

MODELADO GRAVIMÉTRICO-MAGNÉTICO

Giraldo et al. (2014) interpretan una línea sísmica de reflexión 2d que al ser transformada en profundidad se modeló con datos gravimétricos y magnéticos. Se destaca igualmente la importancia de la movilidad de las evaporitas del Triásico superior - Jurásico inferior (Fig. 3) y la presencia de un diapiro de sal subyacente. El resultado sugiere que el espesor de sedimentos por debajo del Banco del Guadalquivir estaría en el orden de los 3,5 kilómetros. El posible afloramiento de rocas pre-Triásicas no ha sido validado por la gravimetría.

DISCUSIÓN

La presencia de una muestra de "*hardground*" carbonatado del Mioceno superior (Vegas et al., 2003), podría sugerir que durante la última glaciación el "paleo-Banco" pudo haber aflorado hasta quedar inundado nuevamente durante el Holoceno debido al deshielo glacial.

Igualmente, se podría tratar de un bloque transportado durante el Plioceno - Pleistoceno por un "*mass-transport complex (MTC)"; se* trataría entonces de un depósito tipo "*mass-transport" ("MTD"),* el cual incluiría también aquellas muestras de rocas que se han correlacionado con el basamento pre-Triásico. La figura 4 resume tres escenarios posibles.

A menos de 80 kilómetros al norte, afloran en la región del Algarve formaciones sedimentarias marinas del Tortoniense – Messiniense. Las litologías predominantes son clásticas, sin embargo, también coexisten carbonatos con microfauna marina (Pais et al., 2000). La zona de los afloramientos miocenos del Algarve cercanos a la línea costera es candidata para ser una posible fuente de sedimentos del "*hardground*" carbonatado encontrado en el Banco del Guadalquivir y analizados por Vegas et al. (2003).

Los depósitos tipo "MTD" son bastante frecuentes en los fondos marinos; los mismos se asocian a la erosión de los márgenes continentales. El transporte de estos materiales hacia partes más profundas de las plataformas continentales e inclusive hasta las llanuras abisales está bien documentado. Para mayor detalle se recomienda consultar a Bhatnagar et al. (2019), Le Bouteiller et al. (2019) y a Claussmann et al. (2022).

La interpretación geológica del transecto regional (Fig. 3) validada por el modelado gravimétrico – magnético (Giraldo et al., 2014) y el mapa estructural de Ramos et al. (2017), sugiere que el basamento, estaría ente unos 3 a 4 kilómetros de profundidad: En dicho sector la anomalía de Bouguer observada coincide con la anomalía de Bouguer modelada. Existiría también la posibilidad de que las muestras del basamento sean bloques "exóticos" transportados por el diapiro salino subyacente. Este tipo de procesos se ha documentado, en afloramientos de Irán (Sarshar et al., 2020).

Desde el punto de vista geomorfológico, el Banco del Guadalquivir sería muy parecido a los montes submarinos que se encuentran a lo largo del Banco de Portimao; dichos montes están asociados a diapiros activos de sal (Giraldo et al., 2014; Ramos et al., 2017).

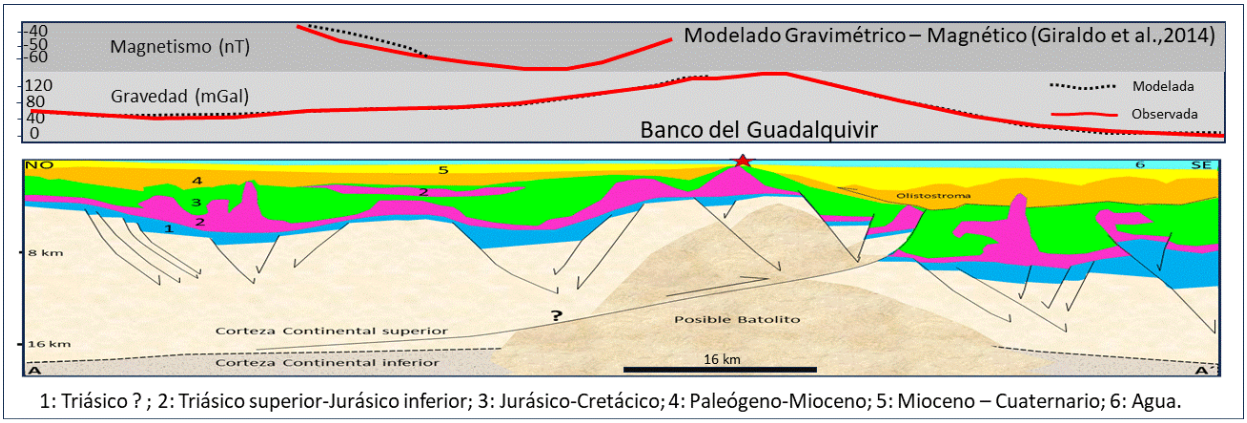


FIGURA 3. Sección geológica AA'. Escenario geológico basado en la interpretación sísmica y modelado gravimétrico-magnético; la anomalía de Bouguer observada coincide con la anomalía modelada (mod. de Giraldo et al.,2014)

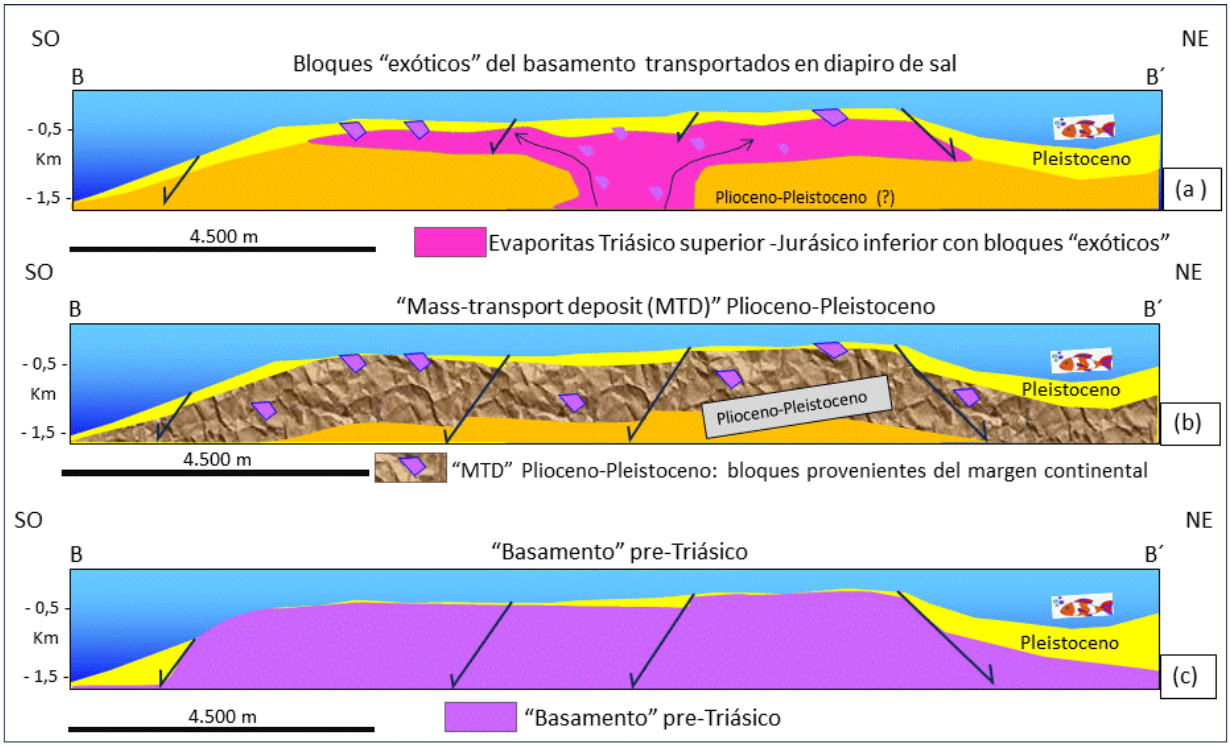


FIGURA 4. Escenarios posibles. (a): Bloques "exóticos" transportados por diapiro salino; (b) "MTD" Plioceno - Pleistoceno; (c) Basamento aflorante. Los escenarios (a) y (b) implican que el monte submarino (Banco del Guadalquivir) se asociaría al diapiro activo de sal subyacente (Fig. 3).Se incluyen fallas del fondo marino en los 3 escenarios (Vegas et al.,2003; Fig. 1).

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Al menos, tres posibles escenarios se proponen para explicar el origen del Banco del Guadalquivir a partir de la presencia de rocas pre-Triásicas afines al basamento:

-Se explicarían como bloques exóticos transportados por el diapiro de sal subyacente.

-Podrían pertenecer a una unidad sedimentaria del tipo "*Mass-transport deposit*". Esta unidad incluiría también litologías del Mioceno superior ("*hardground*"), equivalentes a las que afloran en tierra. La edad de esta secuencia se restringiría al Plioceno - Pleistoceno.

-Se trataría de un afloramiento del basamento varisco, que ya ha sido mencionado en varios trabajos previos.

Se sugiere reprocesar los datos sísmicos de reflexión existentes para optimizar la transformación en profundidad de las líneas sísmicas alrededor del Banco.

Finalmente, se recomienda trabajar en equipos multidisciplinarios, para realizar nuevos modelados gravimétricos–magnéticos y estructurales, que permitan acotar en detalle la profundidad del basamento.

AGRADECIMIENTOS

A mis colegas coautores de la presentación en el Congreso AAPG 2014 (ver REFERENCIAS).

REFERENCIAS

Bhatnagar, P., Verma, S. y Bianco, R. (2019): Characterization of mass transport deposits using seismic attributes: Upper Leonard Formation, Permian Basin, *Interpretation, V.7, 4:19-32.*

Claussmann, B., Bailleul, J., Chanier, Fr., Mahieux, G., Caron, V., McArthur, A., Chaptal, C., Morgans, H. y Vendeville, B. (2022): Shelf-derived mass-transport deposits: origin and significance in the stratigraphic development of trench-slope basins, New Zealand *Journal of Geology and Geophysics, 65:1, 17-52.*

Giraldo, C., Hermoza, W., Amigo, B., Rocca, R., Martínez, C., Malcroma, Y., Rosales, C., Baudino, R., Martin-Monge, A., Fernández, O., Welsink, H., Cascone, L., Olaitz, A., García - Mojonero, C. y Arnaiz, A. (2014): Evidences of Salt Tectonics around the Guadalquivir bank, Gulf of Cádiz (SW Iberia), *AAPG European Regional Conference and Exhibition, Barcelona, Search and Discovery 50980.*

Le Bouteiller, P., Lafuerza, S., Charléty, J., Tadeu Reis, T., Granjeon, D., Delprat-Jannauda, F., y Gorini, Ch. (2019): A new conceptual methodology for interpretation of mass-transport processes from seismic data, *Marine and Petroleum Geology 103: 438-455.*

Medialdea, T., Vegas, R., Somoza, L., Vázquez, J.T., Maldonado, A., Díaz del Río, V., Maestro, A., Córdoba, D. y Fernández-Puga, M.C. (2004): Structure and evolution of the ''Olistostrome'' complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cádiz (eastern Central Atlantic): evidence from two long seismic cross-sections, *Marine Geology 209: 173-198.*

Pais, J., Legoinha, P., Elderfield, H., Sousa, L. y Estevens, M. (2000): The Neogene of Algarve (Portugal), *1° Congresso sobre Cenozóico de Portugal, Lisboa, Ciencias da Terra (U.N.L.), 14: 227-288.*

Ramos, A., O. Fernández, P. Terrinha y Muñoz, J.A. (2017): Neogene to recent contraction and basin inversion along the Nubia-Iberia boundary in SW Iberia, *Tectonics, 36.*

Sarshar, M., Moghadam, H., Griffin, W., Santos, J., Stern, R., Ottley, Ch., Sarkarinejad, Kh., Sepidbar, F. y O'Reilly, S. (2020): *Geochronology and* geochemistry of exotic blocks of Cadomian crust from the salt diapirs of SE Zagros: the Chah - Banu example, *International Geology Review, 64:10,1409-1430.*

Vegas, R., Medialdea, T., Muñoz, M., Díaz del Río, V. y Somoza, L. (2003): Nature and tectonic setting of the Guadalquivir Bank (Gulf of Cádiz, SW Iberian Peninsula). *Revista Sociedad Geológica de España, 17 (1 - 2): 49 -60.*

Experimento GEOMARHIS: Estudio geofísico multi-escala de la tectónica oblicua, partición de la deformación y los peligros geológicos asociados en el margen sumergido del norte de La Española.

GEOMARHIS experiment: Multi-scale geophysical study of oblique tectonics, strain partitioning and associated geological hazards in the northern Hispaniola offshore margin.

J.L. Granja-Bruña[1], A. Muñoz-Martín[1], G. De Vicente[1], M. Gómez-Ballesteros[2], J. Martín-Dávila[3], J. Fiz[4], F.J. Martínez-Moreno[1], A. Rodríguez-Zurrunero[1], J.M. Gorosábel-Araus[5], M.A. De la Fuente-Oliver[1], M. Berriolópez[1], M. Druet[6], I. Díez-García[2], F. Fernández-Sáez[1], A. Olaiz[7], M. Rueda-Fort[1], A. Muñoz-Cemillán[1], V. Ory[4], C. Granado[1], M. Catalán[†4] & A. Carbó-Gorosabel[†1]

1 Dept. GEODESPAL, Fac. C.C. Geológicas, Univ. Complutense de Madrid. C/ José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid. jlgranja@ucm.es; amunoz@ucm.es; gdv@ucm.es; fjmmoreno@ucm.es; arzurrunero@ucm.es; miguelde@ucm.es; marberri@ucm.es; ffdezsaez@gmail.com; alfomu01@ucm.es; marinrue@ucm.es; crgranad@geo.ucm.es;
2 Instituto Español de Oceanografía. C/ Corazón de María 8, 28002 Madrid. maria.gomez@ieo.csic.es; ip.diez@ucm.es;
3 Centro Universitario de la Defensa. Univ. de Vigo. Plaza España s/n, 36920 Marín, Pontevedra. jmartindavila@cud.uvigo.es
4 Real Instituto y Observatorio de la Armada, C/ Cecilio Pujazón s/n, 11110 San Fernando, Cádiz. jfiz@roa.es; vdeory@roa.es;
5 Department of Earth and Atmospheric Sciences. University of Houston. jmgorosa@central.uh.edu
6 Instituto Geológico y Minero de España. C/ Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. m.druet@igme.es.
7 Repsol Exploración. Dirección de Bajas Emisiones en Carbono. Méndez Álvaro, 44 28045 Madrid.antoniojose.olaiz@repsol.com

Palabras clave: Tectónica oblicua, Terremotos, Tsunamis, República Dominicana, Haití.

Resumen

El margen sumergido del norte de La Española presenta riesgos importantes de terremoto y tsunami para el Caribe. La coexistencia de un cinturón compresivo que acomoda el acortamiento normal entre las placas Caribe y Norteamericana, y una zona de desgarre que acomoda el movimiento paralelo al margen de placas, representa un "ejemplo de libro" para el estudio de la tectónica oblicua y la partición de la deformación. En 2025-2026 se llevará a cabo el Experimento GEOMARHIS, y consiste en la adquisición de datos sísmicos de reflexión multi-escala con fuente controlada entre Puerto Rico y Haití. La adquisición sísmica (regional-a-local) incluye; (1) perfiles multicanal de media resolución a lo largo y a través del límite de placas; (2) perfiles de alta resolución para caracterizar la Falla Septentrional en las bahías de Samaná y Manzanillo; y (3) registro continuo de sísmica de ultra-alta resolución. Además, de forma complementaria se realizará un levantamiento sistemático de batimetría-reflectividad multihaz, gravimetría y magnetometría. Aquí, informaremos a la comunidad científica sobre los objetivos específicos, tipos de datos y los resultados científicos esperables, los cuales confiamos que proporcionarán información relevante sobre la peligrosidad de terremotos y tsunamis en la República Dominicana y Haití.

Abstract

The Northen Hispaniola margin poses major earthquake and tsunami hazards for the Caribbean. The coexistence of the compressive North Hispaniola Deformed Belt that accommodates the normal shortening component between the Caribbean and the North American plates, and the strike-slip Septentrional Fault Zone that accommodates the along-strike component represents a "textbook example" for the study of oblique tectonics and strain partitioning. In 2025-2026 we will conduct the GEOMARHIS experiment, a controlled-seismic source survey between Puerto Rico and Haiti. GEOMARHIS consists of the acquisition of multi-scale (regional-to-local) seismic reflection profiles: (1) medium resolution multichannel data along- and across-strike of plate boundary; (2) high-resolution multichannel data to characterize the Septentrional Fault Zone in the Samana and Manzanillo bays; (3) continuous ultra-high-resolution data. In addition, we will acquire systematic swath bathymetry-backscatter, gravity and magnetics. Here, we will inform about detailed objectives, datasets and expected results, which we hope to provide new critical constraints to the seismic and tsunami hazard for Dominican Republic and Haiti.

Reconstruyendo la dinámica superficial oceánica: Patrones de productividad de cocolitóforos durante la Terminación V en el Golfo de Cádiz.

Reconstructing oceanic surface dynamics: Coccolithophore productivity patterns during Termination V in the Gulf of Cádiz.

M. González-Martín[1], J.A. Flores[1], M. Alonso-García[1], M. F. Sánchez-Goñi[2] y G. Hes[3]

1 Grupo de Geociencias Oceánicas (GGO), Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37008, Salamanca. (mariaglezmartin@usal.es).
2 UMR CNRS 5805 EPOC – OASU, Université de Bordeaux, Site de Talence - Bâtiment B18**N**, Allée Geoffroy Saint-Hilaire, CS 50023, 33615 PESSAC CEDEX, France.
3 Département de Géosciences, École Normale Supérieure, PSL Université, Paris, France.

Palabras clave : Palaeoceanography, MIS 11 and 12, Gulf of Cádiz, Coccolithophores, NAO.

Resumen

Este estudio de la Terminación V (TV), Estadios Isotópicos Marinos (MIS) 12/11, analiza la productividad de cocolitóforos en el IODP *Site* U1386 para reconstruir cambios en la dinámica oceánica y atmosférica en el Golfo de Cádiz, utilizando patrones de variabilidad en las asociaciones de cocolitóforos, esencialmente influenciadas por factores ambientales.

Registros de nanofósiles y polen del mismo punto se combinaron para obtener información sobre la variabilidad de fases similares a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO-like). La productividad primaria de cocolitóforos se determinó mediante el PPP (= valores de N de *small Gephyrocapsa group* + *G. caribbeanica*). Los cambios de temperatura se evaluaron analizando taxones de aguas frías y cálidas (*C. pelagicus* y grupo *Warm Water Taxa*). La intensidad de la *Mediterranean Outflow Water* (MOW) se determinó por el porcentaje de nanofósiles retrabajados.

El registro de polen indica dos fases de expansión del bosque mediterráneo, coincidiendo con fases NAO-like negativas y mayor precipitación invernal. Durante el interglacial, los valores de PPP y taxones de aguas cálidas son más altos, mientras que, en el glacial, dominan los de aguas frías, sugiriendo limitaciones de productividad relacionadas con la temperatura. El aumento del PPP también puede deberse a la entrada de nutrientes durante periodos de mayor precipitación invernal. Los nanofósiles retrabajados muestran un pico de intensidad de la MOW durante el MIS 12, potencialmente desencadenando la reanudación de la *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC). En resumen, nuestros datos preliminares destacan un impacto significativo de los cambios de temperatura glacial-interglacial en las masas de agua superficiales y de la circulación oceánica/atmosférica en la productividad de cocolitóforos en el Golfo de Cádiz durante TV.

Abstract

This study of Termination V (TV), Marine Isotope Stages (MIS) 12/11, analyses coccolithophore productivity at IODP *Site* U1386 to reconstruct changes in the ocean and atmosphere dynamics in the Gulf of Cádiz, based on changes of coccolithophore assemblages, responding at environmental factors.

Nannofossil and pollen records from the same *Site* were combined to provide insights into the variability of North Atlantic Oscillation-like (NAO-like) phases. Coccolithophore primary productivity was determined using the PPP (= N values of small *Gephyrocapsa* group + *G. caribbeanica*). Temperature changes were assessed by analysing cold and warm water taxa (*C. pelagicus* and Warm Water Taxa group). The strength of the Mediterranean Outflow Water (MOW) was determined by the percentage of reworked nannofossils.The pollen record shows two phases of Mediterranean forest expansion, aligning with NAO-like negative phases and increased winter precipitation. During the interglacial, PPP values and warm-water taxa are higher, while in the glacial, cold-water taxa dominate, suggesting temperature-related production limitations. Elevated PPP may also result from nutrient input during periods of higher winter precipitation. Reworked nannofossils confirm a peak strength of the MOW during MIS 12, potentially triggering the resumption of the AMOC. Overall, our preliminary data emphasize the significant impact of glacial-interglacial temperature changes on surface water masses, resulting in significant variations in coccolithophore productivity in the Gulf of Cádiz during TV.

Efectos de la dinámica sedimentaria y ambiental sobre las asociaciones de nanofósiles calcáreos en el Golfo de Cádiz durante el Plioceno temprano

Effects of sedimentary and environmental dynamics on calcareous nannofossil associations in the Gulf of Cadiz during the Early Pliocene

L. Martín-García[1], F. J. Jiménez Espejo[2] y J. A. Flores[3]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca 3700, Salamanca. lauramaga@usal.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT), CSIC, Universidad de Granada 18100. francisco.jimenez@csic.es
3 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca 3700, Salamanca. flores@usal.es

Palabras clave: MOW, Plioceno, nanofósiles calcáreos, *washing-winnowing*, dinámica orbital.

Resumen

El Golfo de Cádiz es un área de gran interés oceanográfico y gracias al estudio de sus sedimentos es posible conocer cómo ha funcionado el intercambio de agua entre el Mediterráneo y el Atlántico y estimar cómo ha ido variando el funcionamiento de la *Mediterranean Outflow Water* (MOW) desde que comenzó a instaurarse tras la Crisis de Salinidad del Mesiniense (MSC) hasta la actualidad.

A partir del material sedimentario Plioceno recuperado en el sondeo IODP 1387C, situado en el Golfo de Cádiz, se han empleado los nanofósiles calcáreos como herramienta de doble interpretación para estudiar el funcionamiento de la MOW y para realizar una reconstrucción ambiental de la temperatura y la productividad del agua superficial. El estudio cuantitativo de las asociaciones de nanofósiles calcáreos se ha combinado con información proporcionada geoquímica elemental obtenida mediante escáner de fluorescencia de rayos X.

En la secuencia sedimentaria estudiada se han encontrado niveles con indicios de un efecto *washing-winnowing* en los sedimentos de fondo, en los cuales se observan descensos importantes en la cantidad de nanofósiles calcáreos, máximos en los porcentajes de especies frías y máximos de Zr. Se propone el efecto *washing-winnowing* como un posible indicador de las variaciones en la actividad de la MOW. De acuerdo a modelos actuales y a la señal orbital que muestran los datos, los eventos de intensificación de la MOW podrían estar relacionados con la dinámica del monzón africano, a su vez relacionado con la dinámica orbital.

Abstract

The Gulf of Cadiz is a place with great oceanographic interest. Through the study of its sediments it is possible to know how the Mediterranean-Atlantic water exchange has worked and how the Mediterranean Outflow Water (MOW) has changed since it was established after the Messinian Salinity Crisis (MSC) to the present day.

Using Pliocene sedimentary material cored in IODP 1387C, located in the Gulf of Cadiz, calcareous nannofossils were used as a dual interpretation tool to study the behavior of the MOW and to perform an environmental reconstruction of surface water temperature and productivity. Calcareous nannofossils can be considered palaeoecological indicators. Additionally, elemental geochemical data obtained by X-ray fluorescence-scanner have also been used combined with calcareous nannofossil quantitative analyses.

In the sedimentary sequence studied, some signs of a washing-winnowing effect have been found in the ocean bottom sediments, in which we observed significant decreases in the amount of calcareous nannofossils and peaks in the percentages of cold species and Zr content. The washing-winnowing effect is proposed as a possible past variations of the MOW activity. According to current models, and to the orbital signal that the data seem to show, MOW intensification events could be related to the dynamics of the African monsoon, to orbital dynamics at the same time.

Colecciones Geológicas Marinas de Referencia (CGMR-ICM)

Geological Marine Reference Collections (GMRC-ICM)

C. Martín[1], G. Ercilla[1] y F. Estrada[1]

1 Dpto. Geociencias Marinas, Instituto de Ciencias del Mar, 08003 Barcelona. carlosm@icm.csic.es, gemma@icm.csic.es, festrada@icm.csic.es

Resumen: Las Colecciones Geológicas Marinas de Referencia (CGMR) comprenden muestras de sedimentos marinos y registros sísmicos procedentes de diferentes mares y océanos (Mediterráneo, Atlántico, Pacífico y Antártida) obtenidos desde finales de los años 70. Representan un patrimonio científico y permiten llevar a cabo cualquier estudio en el ámbito de las geociencias marinas y ambientales. El objetivo de este servicio respondería a la necesidad de ofrecer un segundo uso ya que representan una fuente de datos de enorme valor científico y aplicado, para las diferentes instituciones públicas y privadas. Actualmente se están llevando a cabo una serie de mejoras en las CGMR, principalmente en relación a la estandarización de los datos introduciéndolos en la nueva infraestructura europea conocida como DiSSCo (*Distributed System Scientific Collections*). De esta manera, se pretende dar a conocer nacional e internacionalmente el contenido de estas colecciones. Asimismo, otra de las acciones más importantes que se pretende llevar a cabo es el desarrollo de una web en la que se incluyan todos los ejemplares de colecciones, resultados de sus análisis y sus metadatos.

Palabras clave: CGMR; registros sísmicos; sedimentos marinos.

Abstract: *The Geological Marine Reference Collections (GMRC) comprise marine sediment samples and seismic records, from seas and oceans (Mediterranean, Atlantic, Pacific and Antarctic) that were collected from the late 1970s to the present time. They represent a scientific heritage and permit to conduct any other study in the field of marine and environmental geosciences. The objective of this service would respond to the need to offer a second use since they represent a source of data of enormous scientific and applied value for different public and private institutions. The GMRC is nowadays undergoing a series of improvements in the GMRC, mainly related to the standardization of data, being these established in the new European infrastructure known as DiSSCo (Distributed System Scientific Collections). Another of the most important actions, which are being carrying out, is the creation of a website where each sample and geophysical register can be consulted, sorted by cruise on the map.*

Keywords: *GMRC; seismic records; sediment samples.*

¿QUÉ SON LAS CGMR?

Las Colecciones Geológicas Marinas de Referencia (CGMR) del Instituto de Ciencias del Mar (ICM) son una de las colecciones más importantes del CSIC. Este instituto custodia muestras de sedimento, registros sísmicos y datos relacionados, los cuales fueron adquiridos en diferentes mares y océanos (Mediterráneo, Atlántico, Pacífico y Antártida), en el marco de proyectos científicos que se han llevado a cabo desde finales de los años 70 hasta la actualidad. Las CGMR representan un rico patrimonio científico en España en el ámbito de las geociencias marinas, las cuales son clave para conocer el pasado y presente de océanos y mares y para abordar nuevos objetivos de investigación en el futuro

El objetivo principal de las CGMR es ofrecer a diversos actores (ciencias, industria y gobierno) que trabajan en los desafíos oceánicos un conjunto de datos coherente que pueda utilizarse para afrontar cuestiones fundamentales en materia de cambio climático, geoamenazas, contaminación, cartografía de hábitats, exploración de recursos, política marina, avances tecnológicos marinos, etc.

¿QUÉ HAY EN LAS CGMR?

Las CGMR se encuentran organizadas en:

1) **Muestras de sedimentos:** un conjunto de más de 1800 testigos de sedimentos que documentan la geología del (sub)fondo y aproximadamente unas 13.000 muestras de sedimentos de superficie del fondo marino. Se presentan junto con fotografías, submuestras, imágenes SEM y de lupa, registros de texturas, análisis granulométricos, descripción de testigos, etc.

Los testigos de sedimento se encuentran almacenados en una litoteca fría con temperatura (4-5ºC) y humedad constante (Figura 1).

2) Datos geofísicos: un conjunto de más de 250.000 km en datos sísmicos, gravimétricos y magnetométricos, tanto en formato analógico como en formato digital. Los

metadatos son parcialmente accesibles en la web del grupo de colecciones del ICM.



Figura 1. *Litoteca fría dónde se almacenan los testigos de sedimento.*

¿QUÉ OFRECEN LAS CGMR?

Los usuarios de la infraestructura de las CGMR abarcan un rango muy amplio de disciplinas y enfoques científicos, tales como: geología sedimentaria marina, estratigrafía sísmica y secuencial, tectónica, ecosistemas marinos, cartografía geomorfológica, contaminación marina, ciclos biogeoquímicos, peligros geológicos y cambio climático.

El uso y la demanda del conjunto de datos y servicios asociados del CGMR incluye tanto a grupos internos del ICM y del CSIC, como universidades y centros de investigación nacionales e internacionales. Asimismo, las CGMR también ha colaborado con el sector privado facilitando datos tales como a NORKS-HYDRO, el consorcio MEDGAZ - Sociedad para el gaseoducto entre Argelia y el sur de España, y Telefónica-España. También podemos mencionar la colaboración de las CGMR con el servicio de Protección Civil de España, para evaluar los riesgos sismogénicos, de deslizamientos submarinos y los tsunamis derivados de éstos en la zona del Mar de Alborán.

¿QUÉ SE PUEDE IMPLEMENTAR EN LAS CGMR?

En las CGMR se están implementando mejoras en los servicios científico-técnicos para dar un mejor servicio a los potenciales usuarios. Las mejoras que se proponen son las siguientes:

- Aplicar los nuevos estándares de los nuevos testigos y muestras adquiridos para su incorporación y añadir los metadatos de las nuevas incorporaciones a la base de datos.
- Desarrollar una base de datos para el registro y catalogación de muestras, testigos de sedimentos, perfiles y/o registros geofísicos siguiendo las normas estandarizadas establecidas por la nueva infraestructura europea llamada DiSSCo (*Distributed System Of Scientific Collections*).
- Digitalización masiva de información histórica de muestras de sedimentos marinos. Esto incluye tanto análisis continuos de alta resolución como imágenes de muestras de suelo.
- Elaborar una norma de conservación básica basada en los modelos de los repositorios básicos internacionales para establecer un protocolo de registro, catalogación, conservación y mantenimiento de la base de datos para diseñar procedimientos para la cesión o préstamo de los datos de la colección. De igual manera, evaluar los recursos económicos y de infraestructura necesarios para el mantenimiento de las CGMR y su modernización. Esto permitirá obtener una mayor calidad del equipamiento.
- Desarrollar y desplegar una *geodatabase* que incluya todos los datos de las CGMR con una adecuada georreferenciación.
- Preparación de los registros geofísicos para su conservación tanto en formato analógico como digital, así como la digitalización de los perfiles analógicos e la incorporación de éstos a la base de datos (http://gma.icm.csic.es/en/data).
- Preparar los metadatos y la información asociada de todos los especímenes para su transferencia a *DIGITAL CSIC*.
- Participar en colecciones nacionales e internacionales dedicadas a aumentar los beneficios de las colecciones científicas.
- Diseñar y desplegar un nuevo protocolo de acceso y uso de los datos incluidos en las CGMR.
- Dar servicio tanto interno como externo con el laboratorio de apertura de testigos (Figura 2).



Figura 2. *Laboratorio de apertura de testigos, en el que se muestra la sierra para abrir longitudinalmente testigos de sedimento.*

Explorando la complejidad tectónica y geomorfológica de una falla direccional submarina mediante datos de muy alta resolución y técnicas avanzadas de cartografía automatizada.

Unveiling the tectonic and geomorphological complexity of a marine strike-slip fault through very-high resolution data and state-of-the-art automated mapping techniques.

S. Martínez-Loriente[1], R. Duran[1], H. Perea[1], J. Llopart[1,2], R. Urgelés[1], E. Gràcia[1]

1 Institut de Ciències del Mar - CSIC, 08003 Barcelona, Spain. smartinez@icm.csic.es, rduran@icm.csic.es, hperea@icm.csic.es, urgeles@icm.csic.es.
2 Saalg Geomechanics, Av Diagonal 359, 08037 Barcelona, Spain. jaume.llopart@gmail.com.

Palabras clave: tectónica activa, geomorfología submarina, robótica submarina, sparker, herramientas GIS.

Resumen

El margen SO de Iberia alberga el límite de placas convergente actual entre Iberia y Nubia. La actividad sísmica consiste en eventos de baja a moderada intensidad, aunque también se han producido en la región terremotos históricos e instrumentales de gran magnitud (Mw>8.0), como los de Lisboa en 1755 y Horseshoe en 1969. La convergencia NO-SE (4-5 mm/año) se acomoda mediante cabalgamientos y un conjunto de fallas direccionales que conforman una gran banda de deformación, conocida como la Zona de Falla SWIM. Dentro de esta zona se encuentra la Lineación Sur (LS) sismogénica, una destacada falla direccional dextra de 350 km de longitud, que representa una amenaza significativa de tsunami debido a su extensión, orientación y proximidad a la costa. Este estudio presenta un análisis tectónico y geomorfológico detallado que combina perfiles sísmicos y batimetría de muy alta resolución. Los perfiles sísmicos muestran cómo la LS desplaza toda la secuencia sedimentaria hasta el fondo marino, generando una serie de crestas y valles continuos que se extienden cientos de metros en la superficie. Además, mediante técnicas innovadoras de visualización y análisis del terreno, hemos identificado, cartografiado y caracterizado cuencas de *pull-apart*, crestas de presión, escarpes semicirculares interpretados como estructuras colapsadas, dunas submarinas con longitudes desde 200 m hasta 6 km, extensas formas erosivas longitudinales interpretadas como *furrows*, y evidencias de cicatrices de movimientos en masa.

Abstract

The SW Iberian margin hosts the present-day convergent plate boundary between Iberia and Nubia. Seismic activity consists of low to moderate events, although occasionally large historical and instrumental earthquakes (Mw>8.0) have occurred in the region, such as the 1755 Lisbon and 1969 Horseshoe ones. The NW-SE convergence (4-5 mm/yr) is accommodated by thrusts and a set of strike-slip faults that conforms a large deformation band, referred to as the SWIM Fault Zone. Within this zone lies the seismogenic Lineament South (LS), a prominent 350 km-long dextral strike-slip fault, which represents a significant tsunami threat due to its extension, orientation, and proximity to the coast. This study showcases a detailed tectonic and geomorphological analysis combining seismic profiles and very-high resolution bathymetry. The seismic profiles show how the LS offsets the entire sedimentary sequence up to the seafloor, resulting in a series of continuous ridges and troughs spanning hundreds of meters across the seabed. Additionally, by combining cutting-edge terrain visualization and analysis techniques, we have identified, mapped, and characterized pull-apart basins, pressure ridges, semi-circular escarpments interpreted as collapsed structures, submarine dunes ranging from 200 m to 6 km in length, extensive longitudinal erosive bed-forms interpreted as furrows, and evidence of mass movement scars.

Revelando la actividad cuaternaria del sistema de falla de Yusuf (mar de Alborán) a través de análisis sísmicos multiescala.

Unveiling quaternary activity in the Yusuf fault system (Alboran Sea) through multi-scale seismic analysis.

H. Perea[1], S. Martínez-Loriente[1], A. Canari[1,2], R. Bartolome[1] y E. Gràcia[1]

1 BSCI, Institut de Ciències del Mar-CSIC. Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49. 08003 Barcelona. hperea@icm.csic.es, smartinez@icm.csic.es, acanari@icm.csic.es, rafael@icm.csic.es, egracia@icm.csic.es
2 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona.

Palabras clave: Falla de Yusuf, Falla de dirección, Fallas activas, Neotectónica, Mediterraneo Occidental.

Resumen

La deformación actual de la corteza a lo largo de los márgenes sur de la Península Ibérica y norte de África está influenciada por la convergencia NO-SE (4-5 mm/año) entre las placas africana y euroasiática. Esta convergencia da como resultado una amplia zona de deformación con importante actividad sísmica, caracterizada principalmente por eventos de magnitud baja a moderada. Sin embargo, la aparición de terremotos grandes y destructivos (Intensidad > IX) en la región muestra la necesidad de una comprensión integral de las estructuras activas en el Mar de Alborán. Durante diferentes cruceros geocientíficos realizados en la última década, hemos adquirido datos batimétricos de alta resolución y perfiles sísmicos para investigar los sistemas de fallas en la cuenca de Alborán, incluido el sistema de falla de Yusuf. Este es un sistema de fallas de dirección, de movimiento diestro con orientación ONO-ESE, que genera la cuenca pull-apart de Yusuf. El análisis de la batimetría de alta resolución muestra que el sistema de fallas de Yusuf presenta tres zonas diferenciadas: a) el lineamiento de Yusuf en la zona occidental; b) en la zona central la cuenca de Yusuf, que se profundiza hacia el este y está limitada por la Cresta de Yusuf; y c) en la zona oriental, el escarpe de Habibas, donde el sistema de fallas se estrecha. Además a lo largo de las zonas escarpadas generadas por la actividad de la falla se observan evidencias de un gran número de deslizamientos submarinos. La interpretación de los perfiles sísmicos revela que el sistema de fallas consta de varias fallas, predominantemente verticales, que probablemente convergen en un plano de falla común en profundidad. En particular, algunas fallas desplazan la superficie del fondo marino, sugiriendo la actividad cuaternaria del sistema.

Abstract

The present-day crustal deformation along the southern Iberian and northern African margins is influenced by the NW-SE convergence (4-5 mm/yr) between the African and Eurasian plates. This convergence results in a broad deformation zone with significant seismic activity, mostly characterized by low to moderate magnitude events. However, the occurrence of large and destructive earthquakes (Intensity > IX) in the region underscores the need for a comprehensive understanding of active structures in the Alboran Sea. During different geoscientific cruises carried on the last decade, we have acquired high-resolution bathymetric data and MCS profiles to investigate fault systems in the Alboran basin, including the Yusuf fault system. This is a right-lateral strike-slip fault system with a WNW-ESE trend, giving rise to the Yusuf pull-apart basin. The analysis of the high-resolution bathymetry shows that the Yusuf fault system exhibits three distinct zones: a) the Yusuf lineament to the west; b) in the central zone, the Yusuf basin, deepening eastwards and bounded by the Yusuf Ridge; and c) to the east, the Habibas escarpment, where the fault system narrows. In addition, along the slopes related to the fault activity there is evidence of a large number of submarine mas transport deposits. The interpretation of the MCS profiles reveals that the fault system consists of several faults, predominantly vertical, probably converging on a fault at depth. Notably, some faults offset the seafloor surface, indicating the Quaternary activity of the fault system.

Cambios de salinidad en la MOW durante los últimos 55 000 años reflejan ciclos de precesión en el balance hídrico del Mediterráneo

Changes in MOW salinity during the last 55,000 years reflect precession cycles in the Mediterranean hydrologic budget

J. P. Tarruella[1], I. Cacho[2], A. Català[2], T.M. Béjard[1] y F.J. Sierro[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Cienciasm USAL. 37008 Salamanca. pereztarruella@usal.es, sierro@usal.es, thibauld.bejard@usal.es.
2 Departament de Dinàmica de la Terra i de l'oceà. Universitat de Barcelona. 08028 Barcelona. icacho@ub.edu, al_catala@ub.edu.

Resumen: La circulación termohalina del Mediterráneo compensa el balance hídrico negativo de esta cuenca exportando aguas densas y salinas al Atlántico. Esta masa de agua que sale por el estrecho de Gibraltar es conocida como la *Mediterranean Outflow Water* (MOW). Cambios fisicoquímicos en esta corriente, así como en su dinámica sedimentaria pueden interpretarse como una respuesta al balance hídrico al otro lado del Estrecho. En este trabajo hemos obtenido un registro de la temperatura y salinidad de la MOW a partir de análisis de isótopos estables y elementos traza en foraminíferos bentónicos del IODP *Site* U1389 del golfo de Cádiz, muy influenciado por la MOW. El registro del proxy de salinidad muestra una ciclicidad en fase con la precesión (insolación de verano en el hemisferio norte), incluso durante el MIS-3. Un mayor aporte neto de agua dulce en los máximos de insolación deriva en una reducción de la salinidad del agua que sale por el Estrecho, y lo opuesto durante los mínimos de insolación. Esta influencia constante de la precesión, amplificada por el bajo nivel del mar y sobreimpuesta a la variación global del volumen de hielo contribuye a los mayores cambios isotópicos del agua Mediterránea con respecto al océano global.

Palabras clave: MOW, golfo de Cádiz, ciclos de Milankovitch, pluviosidad, salinidad.

Abstract: *The Mediterranean overturning circulation compensates for the negative hydrologic budget of the Mediterranean basin by exporting dense, saline water to the Atlantic. This water mass flowing out through the Strait of Gibraltar is known as the Mediterranean Outflow Water (MOW). Physico-chemical changes in this current can be interpreted as a response to the hydrologic budget on the other side of the Strait. In this study we obtained a high-resolution record of the temperature and salinity of the MOW for the last 55 ka BP. We performed stable isotopes and trace element analysis in benthic foraminifera from IODP Site U1389, located in the Gulf of Cadiz and highly influenced by the MOW. The salinity proxy record shows cyclicity in phase with precession even during MIS-3. A higher net freshwater input during Northern Hemisphere summer insolation maxima implies a reduction in salinity of the water leaving the Strait, and the opposite occurs during insolation minima. The persistent influence of the precession cycles superimposed on the global variation of the ice volume contribute to the greater Mediterranean water isotopic signal changes with respect to the global ocean during terminations.*

Key words: *MOW, Gulf of Cadiz, Milankovitch cycles, pluviosity, salinity.*

INTRODUCCIÓN

La circulación termohalina del Mediterráneo tiene lugar como consecuencia de su balance hídrico negativo, con una evaporación dominante sobre la precipitación. Esto deriva en un aumento de la salinidad y un gradiente de densidad con el Atlántico, que es compensado por un intenso intercambio de aguas en el estrecho de Gibraltar: mientras que las aguas menos salinas entran por la superficie, por el fondo se exporta agua muy salada y densa hacia el oeste, que conocemos como MOW (*Mediterranean Outflow water*). La presencia de la MOW en el golfo de Cádiz ha generado un sistema deposicional de contornitas, cuyas altas tasas de sedimentación y continuidad permiten estudiar con detalle los cambios producidos al otro lado del Estrecho, en el Mediterráneo.

Desde el Mioceno se han observado interrupciones de la circulación del Mediterráneo en los mínimos de precesión (máximos de insolación de verano), dejando depósitos cíclicos, laminados y ricos en materia orgánica, conocidos como sapropeles (Rohling, 1994). Estos sapropeles se han dado en fase con los monzones de Asia o África, coincidiendo con los llamados Periodos Húmedos Africanos. En el golfo de Cádiz, el debilitamiento cíclico de la MOW se traduce en una disminución de los depósitos contorníticos y un aumento de depósitos hemipelágicos (Bahr et al., 2015).

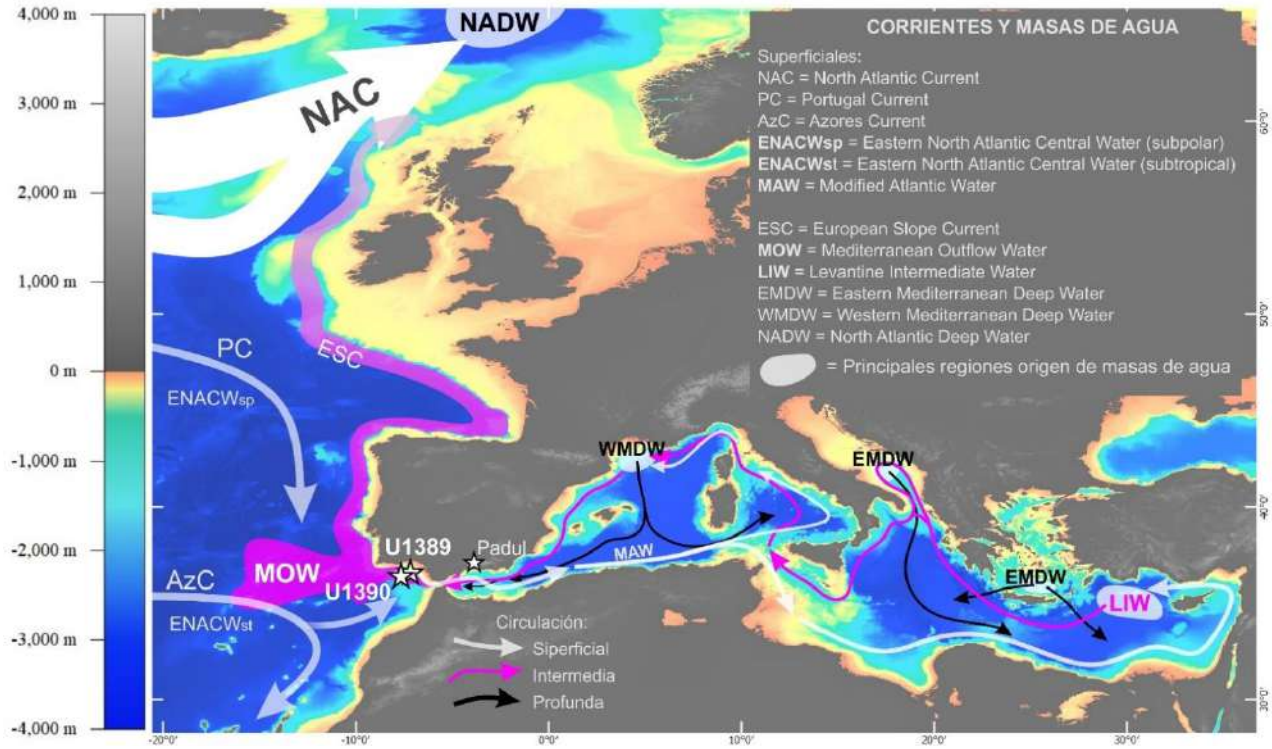


FIGURA 1. *Localización y contexto oceanográfico del sondeo IODP U1389.*

Aunque la periodicidad de las glaciaciones en el planeta desde el Mioceno ha cambiado de 20 ka a 40 ka, y posteriormente a 100 ka, los depósitos de sapropeles, así como los monzones de verano han seguido teniendo una marcada ciclicidad de precesión (20 ka). Durante periodos de muy baja excentricidad de la órbita, como es el caso del MIS-3, hay ciclos que carecen de su expresión sedimentológica clara en el Mediterráneo y el golfo de Cádiz.

En este trabajo hemos obtenido un registro de las propiedades fisicoquímicas de la MOW basado en isótopos estables y elementos traza en foraminíferos bentónicos del IODP *Site* U1389, situado en la rama principal de la MOW en el golfo de Cádiz (Fig. 1). Como la MOW es una mezcla de aguas de diferentes puntos del Mediterráneo, sus propiedades ofrecen una imagen global de lo que sucede en la cuenca. La resolución y extensión de este registro nos ha permitido analizar los cambios de temperatura y salinidad en la MOW en los últimos 55 ka (MIS-1-3) y explorar su relación con la dinámica climática.

MATERIALES Y MÉTODOS

El conjunto de sondeos U1389 fueron perforados en la expedición 339 del programa IODP en 2013. Este estudio abarca los 37 m superiores (55 ka BP), que fueron muestreados cada 10 cm. Las muestras fueron pesadas en seco, disgregadas, tamizadas en 62 y 150 µm y pesadas por separado. Los análisis de isótopos estables $\delta^{18}O_c$ fueron realizados en la especie *Cibicidoides pachyderma* (>250 µm) a máxima resolución (n = 390). El análisis de elementos traza Mg/Ca se realizó seleccionando >20 ejemplares/muestra de la especie *Uvigerina mediterranea* (>250 µm) en muestras alternas (n = 106). El protocolo de preparación y limpieza constó de una fragmentación de las cámaras, eliminación de arcillas, fase oxidativa, fase reductora y lixiviación por ácido débil (Barker et al., 2003). Las muestras contaminadas fueron descartadas con un análisis de las ratios Fe/Ca, Al/Ca y Mn/Ca. La fórmula empleada para obtener la temperatura del fondo oceánico a partir de la ratio Mg/Ca, calibrada para *U. mediterranea* fue la siguiente (Elderfield et al., 2006):

$$\frac{\mathrm{Mg}}{\mathrm{Ca}} = 0{,}94(\pm 0{,}044)\exp 0{,}053(\pm 0{,}004)\mathrm{T}(^{\circ}\mathrm{C})$$

Posteriormente se extrajo la señal isotópica original del agua $\delta^{18}O_w$ como proxy de salinidad, corrigiendo en el registro de $\delta^{18}O_c$ bentónico el efecto de la temperatura obtenida anteriormente, según la fórmula (Marchitto et al., 2014):

$$\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w + 0{,}27 = -0{,}224T + 3{,}53(\pm 0{,}02)$$

Al $\delta^{18}O_w$ se le aplicó una corrección del efecto del volumen de hielo en el planeta, aplicando un 0.0083 ‰ por cada metro de nivel relativo del mar (Waelbroeck et al., 2002) para obtener la señal $\delta^{18}O_{wi}$. El modelo de edad utilizado es el publicado por Sierro et al. (2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El registro bentónico de $\delta^{18}O_c$ sigue la curva isotópica global, con valores máximos en torno al último máximo glacial. Se observa variabilidad milenaria estadial-interestadial sobreimpuesta (Fig. 2A). La Temperatura del fondo presenta también una marcada variabilidad milenaria y un ascenso gradual desde la primera mitad del MIS-2 (Fig. 2B).

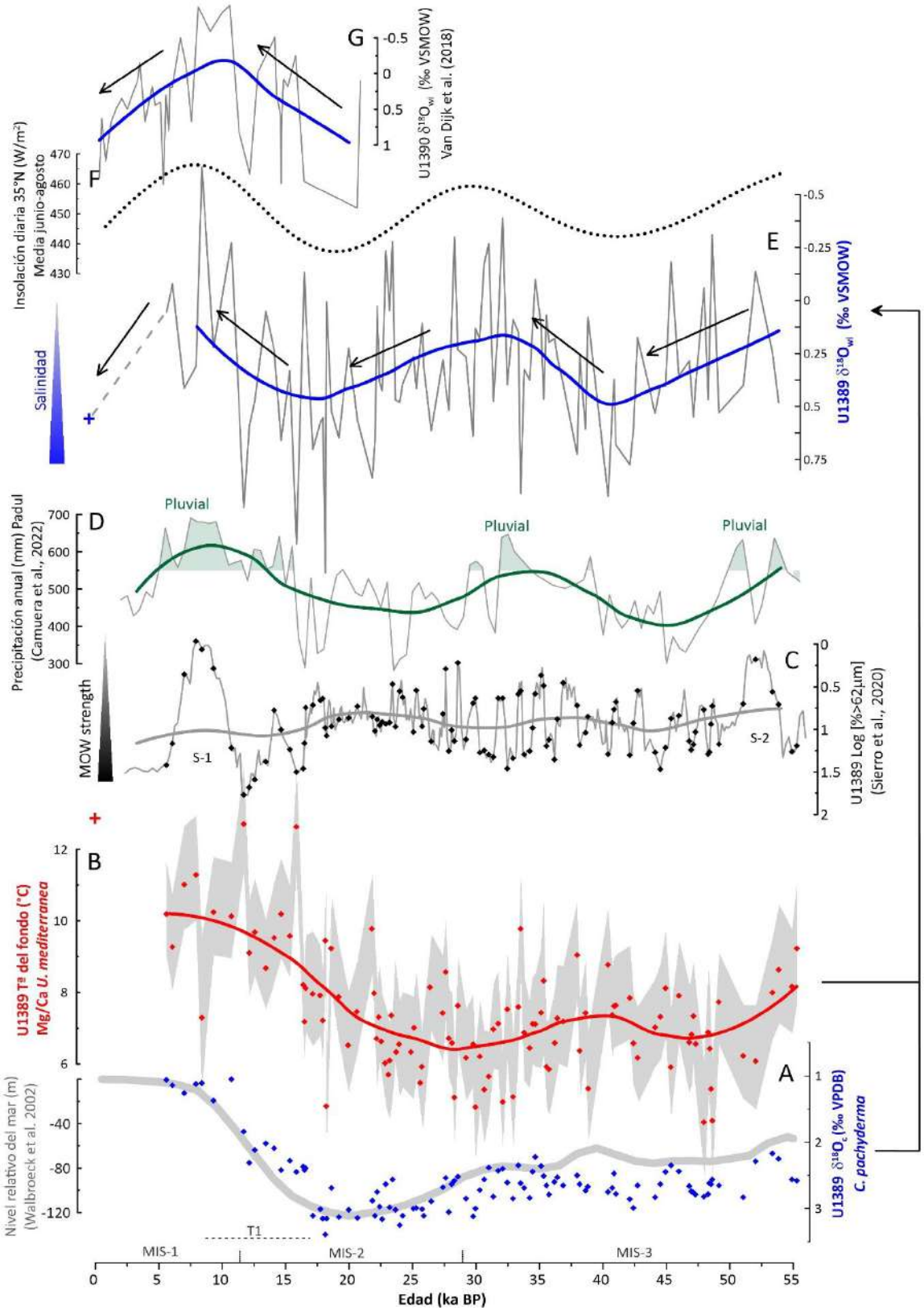


FIGURA 2. *A) Registro bentónico de δ^{18}Oc, los puntos representan las muestras seleccionadas para el análisis de Mg/Ca y nivel relativo del mar (Waelbroeck et al., 2002); B) Temperatura del fondo oceánico obtenida a partir de Mg/Ca; C) Proxy de intensidad de la MOW en el Site U1389 (Sierro et al., 2020); D) Estimación de la precipitación anual a partir de los registros de polen de Padul (S Península ibérica; localización en Fig.1) (Camuera et al., 2022); E) Señal isotópica del agua corregida con el volumen de hielo global δ^{18}Owi; F) Insolación media diaria de verano a 35° N. G) Señal isotópica corregida del agua δ^{18}Owi en el IODP Site U1390 (Van dijk et al., 2018); localización del Site en Fig.1. Tendencias representadas por curvas LOESS de extensión 0.4-0.5. Las cruces representan valores calculados con mediciones actuales. T1: Terminación 1.*

Una vez extraído el efecto de la temperatura, la señal del agua $\delta^{18}O_w$ presenta una amplitud glacial-interglacial mayor a la global ($\Delta\delta^{18}O_w$ ~1.6 vs ~1 ‰ VSMOW). La señal corregida $\delta^{18}O_{wi}$ muestra una clara impronta de precesión, con valores mínimos en fase con los máximos de insolación de verano en el hemisferio norte, y viceversa (Fig. 2E).

Teniendo en cuenta que la MOW es una mezcla de aguas originadas en diferentes puntos del Mediterráneo, los cambios observados en $\delta^{18}O_{wi}$ pueden responder al balance hídrico general de la cuenca. Durante los máximos de insolación se da un mayor aporte neto de precipitaciones, que explicarían los descensos observados en $\delta^{18}O_{wi}$. Esto coincide con registros de pluviosidad del interior de la cuenca (Camuera et al., 2022) (Fig. 2D). El MIS-3 se caracteriza por amplitudes de precesión e insolación muy bajas, sin expresión clara en la sedimentología de este sondeo (Sierro et al., 2020) (Fig. 2C), pero estos ciclos astronómicos son claros en la salinidad de la MOW (Fig. 2E). Datos de estudios previos en sondeos cercanos complementan nuestro registro, y muestran esta señal de precesión también durante el Holoceno (Fig. 2G) (Van dijk et al., 2018).

Esta señal constante de la precesión en el balance hídrico contribuye a amplificar el cambio en la señal isotópica durante las terminaciones: El máximo glacial se da durante un máximo de precesión (mínimo de insolación), con condiciones áridas en torno a la cuenca, que se traducen en valores altos de $\delta^{18}O_{wi}$, que se suman a la subida global; por otra parte, la deglaciación se da en un mínimo de precesión (máximo de insolación) con condiciones más húmedas y su asociado descenso en $\delta^{18}O_{wi}$.

CONCLUSIONES

Encontramos una impronta constante de la precesión en la señal isotópica reconstruida del agua ($\delta^{18}O_{wi}$) de la MOW. Esta ciclicidad es evidente incluso durante el MIS-3, de baja excentricidad de la órbita y sin expresión clara en la sedimentología del sondeo estudiado. Proponemos que este registro de salinidad responde al balance hídrico general de la cuenca Mediterránea. Los mayores aportes netos de agua dulce en fase con los máximos de insolación de verano se traducen en una reducción de la salinidad del agua que sale por el Estrecho. Esta influencia constante de la precesión, sobreimpuesta a la variación global del volumen de hielo contribuye a la mayor amplitud de los cambios en la señal isotópica del Mediterráneo durante las terminaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el contrato predoctoral FPU2019/01656 del ministerio de Universidades concedido a J.P.T. y el proyecto PID 2021-128322-NB-100 (PICTURE) del Ministerio de Ciencia e Innovación concedido al Grupo de Geociencias Oceánicas (GGO) de la Universidad de Salamanca. Agradecemos a IODP por la cesión de las muestras y al Grup de Reçerca Consolidat en Geociències Marines de la Universitat de Barcelona por la formación en análisis de elementos traza.

REFERENCIAS

Bahr, A., Kaboth, S., Jiménez-Espejo, F. J., Sierro, F. J., Voelker, A. H. L., Lourens, L., Röhl, U., Reichart, G. J., Escutia, C., Hernández-Molina, F. J., Pross, J. y Friedrich, O. (2015): Persistent monsoonal forcing of Mediterranean Outflow Water dynamics during the late Pleistocene. *Geology*, 43 (11): 951-954.

Barker, S., Greaves, M. y Elderfield, H. (2003): A study of cleaning procedures used for foraminiferal Mg/Ca paleothermometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*: 4(9): 8407.

Camuera, J., Ramos-Román, M. J., Jiménez-Moreno, G., García-Alix, A., Ilvonen, L., Ruha, L., Gil-Romera, G., González-Sampériz, P. y Seppä, H. (2022): Past 200 kyr hydroclimate variability in the western Mediterranean and its connection to the African Humid Periods. *Scientific Reports*, 12 (1): 9050.

Elderfield, H., Yu, J., Anand, P., Kiefer, T. y Nyland, B. (2006): Calibrations for benthic foraminiferal Mg/Ca paleothermometry and the carbonate ion hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 250 (3-4): 633-649.

Marchitto, T. M., Curry, W. B., Lynch-Stieglitz, J., Bryan, S. P., Cobb, K. M. y Lund, D. C. (2014): Improved oxygen isotope temperature calibrations for cosmopolitan benthic foraminifera. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 130: 1-11.

Rohling, E. J. (1994). Review and new aspects concerning the formation of eastern Mediterranean sapropels. *Marine Geology*, 122 (1): 1–28.

Sierro, F. J., Hodell, D. A., Andersen, N., Azibeiro, L. A., Jimenez-Espejo, F. J., Bahr, A., Flores, J. A., Ausin, B., Rogerson, M., Lozano-Luz, R., Lebreiro, S. M. y Hernández-Molina, F. J. (2020): Mediterranean overflow over the Last 250 kyr: Freshwater forcing from the tropics to the ice sheets. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35 (9): e2020PA003931.

van Dijk, J., Ziegler, M., de Nooijer, L. J., Reichart, G. J., Xuan, C., Ducassou, E., Bernasconi, S. M. y Lourens, L. J. (2018): A Saltier Glacial Mediterranean Outflow. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33 (2): 179–197.

Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J. C., McManus, J. F., Lambeck, K., Balbon, E. y Labracherie, M. (2002): Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21 (1–3): 295–305.

Anomalías magnéticas del Mar de Alborán: modelos 2-D e implicaciones geodinámicas

Magnetic anomalies of the Alboran Sea: 2-D models and geodynamics implications

V. Tendero-Salmerón[1], J. Galindo-Zaldívar[1,2], E. d'Acremont[3], M. Catalán[4†], Y. M. Martos[5], A. Ammar[6], G. Ercilla[7]

1 Institut de Ciències del Mar, CSIC, Grupo de Márgenes Continentales, 08003 Barcelona, España. vtendero@ugr.es , gemma@icm.csic.es
2 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. jgalindo@ugr.es
3 Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre Paris, ISTeP UMR 7193, 75252 París Cedex 05, Francia. elia.dacremont@sorbonne-universite.fr
4 Real Observatorio de la Armada Española, 11100 San Fernando (Cádiz), España. mcatalan@roa.es
5 University of Maryland College Park, College Park, MD 20742, USA. yasmina.martos@nasa.gov
6 Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, Morocco. siadamammar@yahoo.fr

Palabras clave: anomalías magnéticas, Mar de Alborán, intrusiones ígneas

Resumen

Las anomalías magnéticas de origen profundo del mar de Alborán han sido modelizadas a lo largo de varios perfiles de escala regional. Estas revelan la presencia de intrusiones ígneas de escala cortical a profundidades de 8-14 km. Las anomalías más intensas están asociadas con una lineación NE-SO de intrusiones ígneas debajo del Canal de Alborán. Esta anomalía cambia a NO-SE hacia el este, haciéndose paralela a la falla de Yusuf y alcanza la costa argelina. Siguiendo la historia geodinámica del mar de Alborán, el emplazamiento de estos cuerpos podría deberse al rift del dominio continental situado en el Mediterráneo occidental durante el Oligoceno-Mioceno Inferior. Este rift habría sido causado por una extensión NO-SE debido a *slab retreat*. Así, las intrusiones representarían el final de este rift por el oeste ya que tienen la misma dirección que el eje de rift y no se pueden atribuir al vulcanismo mioceno por su localización. Desde el Mioceno Superior, la inversión tectónica de la cuenca de Alborán habría curvado la alineación de intrusiones. Durante el Plio-Cuaternario, se desarrolla la indentación tectónica en la que las intrusiones actúan de contrafuerte, favoreciendo el plegamiento y elevación de la Cresta de Alborán. En conjunto, las anomalías magnéticas muestran que las intrusiones ígneas generadas durante las etapas extensionales iniciales de la cuenca pueden condicionar y controlar su estilo tectónico de inversión.

Abstract

The magnetic anomalies of deep origin of the Alboran Sea have been modeled along several profiles revealing the presence of crustal scale, basic igneous intrusions located at 8-14 km depth. The most intense anomalies are associated with a NE-SW igneous intrusions located below the Alboran Channel. This anomaly turns eastwards to NW-SE, paralleling to the Yusuf fault and reaching the Algerian coast. According with the geodynamic history of the Alboran Sea, the emplacement of these basic igneous intrusions may be related to the rifting of the continental domain located in the western Mediterranean during Oligocene-Early Miocene. This rifting process is caused by a NW-SE extension associated with slab retreat. Thus, the intrusions would represent the western tip of that rift since they have the same trend that the rift axis and are also not related with the Miocene volcanic highs. Since Late Miocene, the tectonic inversion of the Alboran basin curved the intrusions alignment. During Pliocene Quaternary, tectonic indentation was developed, and the intrusions act as a backstop that have favored the folding and uplift of the Alboran Ridge. Altogether shows that the deep igneous intrusions originated during the extensional, initial stages of a basin can condition and control the style of the later tectonic inversion of the basin.

Evolución reciente del acantilado marino del Morro de Toix (Alicante, SE España).

Recent evolution of Morro de Toix seacliff (Alicante, SE Spain).

J. E. Tent-Manclús[1], D. Bonomo[2], J. Alcántara-Carrió[2,3] y A. Estévez[4]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio "Ramón Margalef", Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig (Alicante). je.tent@ua.es
2 Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio "Ramón Margalef", Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig (Alicante). Davide.Bonomo@ua.es
3 Dpto. Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid. javier.alcantara@uam.es
4 Dpto. Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig (Alicante). antonio.estevez@ua.es

Resumen: El macizo del Morro de Toix, localizado en el litoral alicantino entre las poblaciones de Altea y Calpe, muestra un acantilado marino coincidente con un plano de falla vertical. En el acantilado se distinguen un sector occidental vertical de hasta 70 m de altura sobre el nivel del mar, de un sector oriental, extraplomado entre 30 y 50 m de altura. En el primer sector hay un resalte alineado que delimita dos sectores de meteorización y que se interpreta como la superficie de un abanico aluvial formado durante la última glaciación, el cual ha sido erosionado durante la posterior subida del nivel del mar. El sector oriental se encontraría expuesto y por ello presenta una mayor disolución del acantilado. Estudios anteriores han identificado en el macizo del Morro de Toix conductos kársticos que descargan agua dulce o absorben agua de mar (el sumidero), en diferentes periodos del año. Estas surgencias de agua dulce pueden haber favorecido la formación del notch mareal a lo largo del acantilado.

Palabras clave: Morro de Toix, Evolución acantilado marino, Costa de Alicante, notch.

Abstract: *The Morro de Toix massif, located between Altea and Calpe on the Alicante coast in southeastern Spain, features a seacliff coinciding with a vertical fault plane. The western sector shows a vertical plane up to 70 m high above mean sea level, while the eastern sector shows an overhanging up to 30 to 50 m high. In the first one there is an aligned flange that delimits two weathering portions and is interpreted as the surface of an alluvial fan, developed during the last glaciation and eroded during the subsequent sea level rise. The eastern sector, being exposed, showcases a more extensive karstic surface processes cliff dissolution. This area is known to contain karst conduits that discharge freshwater or absorb seawater (acting as a sink) during different periods of the year. These freshwater under-the-sea springs may have favored to the formation of the tidal notch along the entirety of the cliff.*

Key words: *Morro de Toix, Seacliff evolution, Alicante Coast, notch.*

INTRODUCCIÓN

El Morro de Toix, situado en el límite sur del municipio de Calpe (Alicante, Fig. 1), es un macizo calcáreo que presenta un acantilado marino de 2 km de longitud y de 75 a 30 m de altitud, constituyendo la prolongación de la Sierra de Bernia hasta el Cabo de Toix. Este macizo es uno de los principales hitos de la costa, por su característica silueta. El punto más alto del macizo se encuentra a 340 m. A los extremos se encuentran las calas del Racó del Corb al Oeste y del Gasparet al Este, ambas de complicado acceso.

Entre el Morro de Toix y la Sierra de Bernia se encuentra el Barranco del Mascarat, por donde discurre la nacional (N-332), la vía del tren de vía estrecha (*trenet*) y la autopista (AP-7). Al W de la desembocadura de dicho barranco se encuentra el puerto Marina Greenwich Campomanes, cuyo nombre hace referencia a que se encuentra a la longitud del meridiano de Greenwich.

En el acantilado marino, las capas del Eoceno Superior están de verticales a 85º (Fig. 2). Todo el macizo del Morro de Toix está formado por calizas algales masivas con *Lepidocyclina* (y *Nummulites* en la parte inferior) del Eoceno Superior al Oligoceno Inferior. Su espesor es de 370 m (Stoklosa, 2002). En los niveles más altos, disminuye ligeramente el buzamiento hasta los 80º y discordantemente sobre él se sitúa un nivel glauconítico, que marca la base del Mioceno Inferior (Moseley, 1990).

En la parte oriental del acantilado se desarrollan formas exokársticas y en la parte sumergida se han contabilizado 23 surgencias de aguas freáticas (Departamento de Ciclo Hídrico, 2007). Entre ellas, el Sumidero de Toix (Fig. 3), destaca por su tamaño, su entrada, de 1,5 m de alto por 1 m de ancho, se encuentra

a 8 m por debajo del nivel del mar y ha sido explorado con más de 150 m reconocidos en planta, con un pozo localizado a unos 50 m de la entrada que desciende hasta los -70 m de profundidad. Su comportamiento hidrogeológico es particular, ya que en la mayor parte del año succiona agua de mar, mientras que en otros momentos funciona como surgencia (Morales García y Rodríguez Hernández, 2015). El sumidero ha sido monitorizado por la Diputación de Alicante desde 1998 y para más información al respecto se puede consultar en las publicaciones al respecto (ver Morales García y Rodríguez Hernández, 2015).



FIGURA 1. *Situación del Morro de Toix en la provincia de Alicante.*

Es interesante mencionar que antes del comienzo de las captaciones de las aguas subterráneas. Los hombres de mar mencionaban de la existencia de un gran río de agua dulce que salía del acantilado, como recoge Escolano (1611) en el libro sexto, columna 107: "*A la vanda de Poniente, respeto de Calpe, viene un cabo o montaña, que llaman de Toyx, a media legua de Hyfach, donde a la mesma lengua del agua labro naturaleza una cueva, que por los muchos palomos silvestres que en ella se anidan, tiene nombre de los palomos: y no se puede entrar a ella sino es con barco. Tiene de largo cien passos de ancho, y cinquenta y dos picas de alto. Iunto a la boca desta cueva, a la misma lengua del agua, sale de dicha peña un rio tan impetuoso y grande, que no se dexa ver como se entra en el mar, por ser por allí muy fondable, los vaxeles que allí tocan siente su furia, y de miedo de volcarse, se van alargado lo que basta*". Dicha cita es recogida por Cavanilles (1797) en una nota en su tomo 2 pág. 233, añadiendo "*Yo no he visitado aquel sitio; pero oí decir á los naturales que hácia la parte occidental de dicho cabo se observa una corriente en las aguas del mar, y que los marineros quando están en aquel sitio sacan agua dulce, introduciendo hasta cierta profundidad un cántaro vacío y tapado, que destapan quando está sumergido en contacto de la corriente.*"

El acantilado al sur del macizo se originó por una falla paralela a la estratificación y orientación N110º, que separaba los materiales de calizas masivas que forman dicho macizo, de las margas eocenas con *Nummulites* estratigráfícamente inferiores, las cuales aflorarían en el bloque sur y actualmente afloran en la cala del Racó del Corb (Yébenes et al., 2004, Fig. 2). Al W el acantilado está limitado por otra falla, perpendicular al acantilado (y a la falla anterior) de salto en dirección dextra con desplazamiento hectomético (op. cit.) y que hunde el bloque del E (el del Morro). Esto último permite que se conserve en el bloque opuesto (W) las margas anteriormente mencionadas. En el extremo oriental del acantilado del Morro de Toix también se observa otra falla perpendicular al acantilado de iguales componentes.



FIGURA 2. *Acantilado del Morro de Toix desde el mirador de la Racó del Corb. Las flechas negras marcan el paleonivel del abanico aluvial del Racó del Corb. La línea discontinua separa las dos partes del acantilado, de la línea hacia el espectador es coincidente con las fallas. De la línea alejándose del observador los procesos de erosión kárstica costera han producido el retroceso del acantilado. A la izquierda en la playa de Racó de Corb afloran las margas del Eoceno.*

EL ACANTILADO MARINO

El acantilado tiene dos sectores. El sector occidental, cuya extensión es 1/3 de todo el acantilado, es coincidente con la estratificación y falla verticales, que muestra un plano vertical perfecto (Fig. 2) mientras que en el sector oriental el acantilado es extraplomado, fuertemente karstificado (Fig. 3) y las capas pierden buzamiento de subverticales a 85º en el extremo E. También se observa una disminución de la altura del acantilado aéreo, juntamente con la extensión de la parte sumergida. Según las isobatas del levantamiento del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (Ecocartografía de Alicante, 2007) en la parte más occidental del acantilado la parte de pared sumergida es de unos 3 m de superficie vertical y plana, aumentando en dirección E hasta casi alcanzar los 30 m, pero siendo más irregular, con el pie del acantilado sumergido hacia afuera y la parte más somera hacia dentro. De forma que en el sector oriental la sección del acantilado sería cóncava considerando las partes subaérea y sumergidas con la parte más profundizada hacia el macizo marcada por el *notch*.



FIGURA 3. *Extremo oriental del acantilado del Morro de Toix imagen tomada desde drone. La línea blanca discontinua coincide con la de la Fig. 2. La flecha marca la posición aproximada del sumidero de Toix, que se encuentra a 8 m de profundidad. La cornisa del acantilado está mayormente extraplomada sobre el mar.*

EL *NOTCH*

En el acantilado destaca el *notch* que marca el nivel del mar actual, desde la cala del Racó del Corb hasta la del Gasparet. En la primera el *notch* aumenta su excavación de la pared del acantilado desde la playa hacia la arista que separa los dos planos de falla. La profundidad máxima de este varía entre 40 y 60 cm en diferentes sectores reconocidos. No habiendo recorrido toda la extensión del acantilado, por cuestiones de dificultad en el acceso.

El *notch* de Toix es un muesca mareal (*tidal notch*) similar a otros reconocidos sobre formaciones a lo largo del Mediterráneo (Antonioli et al., 2015). En sección estos acantilados siempre muestran la máxima excavación del acantilado coincidente con el nivel medio del mar, la sección por encima, que podemos llamar "emergida", forma una cúpula cóncava, mientras la inferior, "sumergida", suele ser menos cóncava, más plana y ligeramente inclina hacia mar. Estos autores mencionan que la presencia de surgencias de aguas marinas favorece la disolución de los carbonatos, ya que el agua de mar está sobresaturada en carbonatos (Antonioli et al., 2015). Las observaciones realizadas no permiten afirmar que, en la parte más oriental del acantilado, con surgencias, el *notch* muestra mayor excavación.

En cuanto a su edad, en otras partes del Mediterráneo cuando se encuentran *notch* recientes elevados por tectónica activa, son siempre más jóvenes de 6500 años por lo que Antonioli et al. (2015) consideran que los *notch* activos actuales son siempre más recientes. Lo que implica que el acantilado del Morro de Toix en tiempos recientes ha permanecido estable, y al menos, no se ha levantado, por no encontrarse ningún *notch* por encima del actual.

CAMBIO DE PAISAJE EN EL ACANTILADO

En la parte occidental de Toix, las dos fallas forman un ángulo diedro con una arista totalmente vertical (Fig. 2). En ambas caras de dicho ángulo se reconoce un saliente marcado por vegetación rúpicola y que además separa una zona más alterada, por encima, de otra menos, por debajo. Dicha línea parece continuar en los depósitos de ladera sobreimpuestos a las margas eocenas de la parte alta de la Cala del Racó del Corb. La erosión marina actual hace retroceder la ladera margosa de la playa y el *notch* está menos desarrollado hacia la playa. Por ello, suponemos que la erosión marina desde que el nivel del mar alcanzó la posición actual ha ido erosionando el abanico aluvial. En la Fig. 4 se compara la actual costa de la playa con el final de la transgresión hace 6000 años, con el abanico aluvial recubriendo las margas del Eoceno. La zona oriental, no protegida por el abanico se encontraría una surgencia de descarga del acuífero, que ya estaría sumergida.

CONCLUSIONES

El acantilado muestra dos sectores el sector más oriental es extraplomado y presenta una importante karstificación mientras que el occidental es una pared plana y recta, coincidente con una falla. Este último, es producto de la erosión del mar con la posición del nivel actual, mientras que el anterior se encontraría expuesto durante el nivel bajo del mar durante la última glaciación. La formación del *notch* en todo el acantilado ha podido ser favorecido por la presencia de surgencias de agua dulce en la zona.

.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por fondos del programa thinkinazul NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) de la Unión Europea, proyecto de la Generalitat Valenciana GVA-THINKINAZUL/2021/039 y el proyecto PID2020-114381GB-I00 de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación. Es una aportación del grupo de investigación de la VIGROB21-053 de la Universidad de Alicante.

REFERENCIAS

Antonioli, F., Lo Presti, V., Rovere, A., Ferranti, L., Anzidei, M., Furlani, S., Mastronuzzi, G., Orru, P.E., Scicchitano, G., Sannino, G., Spampinato, C.R., Pagliarulo, R., Deiana, G., de Sabata, E., Sansò, P., Vacchi, M. y Vecchio, A., (2015): Tidal notches in Mediterranean Sea: a comprehensive analysis. *Quaternary Science Reviews*, 119: 66–84. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.016

Cavanilles, A. J. (1797, reimpresión 1981): *Observaciones sobre la historia natural, Geografia, agricultura, población y frutos del Reyno de Valencia*. Albatros ediciones, Bibliotheca Valentina, 2 tomos, 236 pp. + 338 pp.

Departamento de Ciclo Hídrico (2007): *Los manantiales provinciales. Segunda parte*. Diputación de Alicante, 236 p.

Escolano, G. (1611): *Segunda Parte de la Década primera de la Historia de la Insigne, y Coronada Ciudad y Reyno de Valencia*. Imprenta Pedro Patricio Mey, 2004 p.

Ecocartografía de Alicante (2007): Ministerio de Transición Ecológica y Reto demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/ecocartografia-alicante.html (consulta, 1/02/2024).

Morales García, R. y Rodríguez Hernández, L. (Eds.) (2015): *Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogelógico de Alicante* Diputación de Alicante, 445 p.

Moseley, F. (1990): *A Geological Field Guide to the Costa Blanca, Spain*. The Geologists' association, 79 p.

Stoklosa, M. L. (2002): *Evaluation of controls on carbonate platform morphology, facies and diagenetic variability: an Oligocene example from southeast Spain*. Ph D. Thesis Univerisity of Wisconsin-Madison, 194 p.

Yébenes, A., Estévez, A., López-Arcos, M. y Alfaro, P. (2004): Itinerario Geológico litoral entre Benidorm, Altea y Calpe. En: *Geología de Alicante* (P. Alfaro, J. M. Andreu, A. Estévez, J. E. Tent-Manclús y A. Yébenes, eds.). Universidad de Alicante, 89-116.

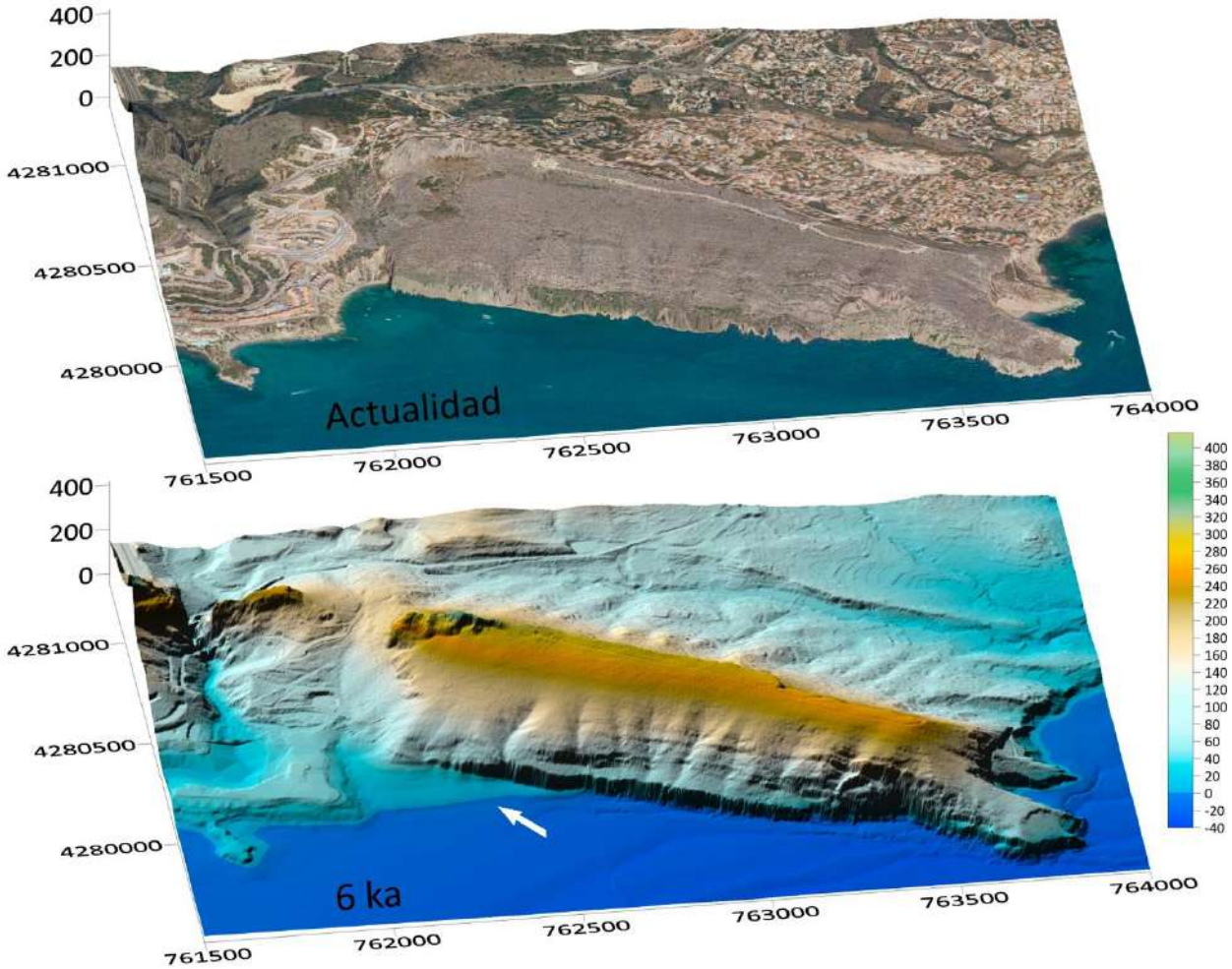


FIGURA 4. *Arriba modelo digital de elevaciones actual con la ortofotografía del año 2007 (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, del IGN). Abajo reconstrucción del posible modelo digital de elevaciones con el abanico aluvial del Racó de Corb hace 6000 años (flecha blanca) cuando el nivel del mar alcanzó una posición similar a la actual. La erosión costera ha producido la desaparición del abanico, la formación del acantilado costero occidental y la aparición de la playa del Racó de Corb.*

Interacción entre montes submarinos y zonas de cizalla en el Sector Central del Mar de Alborán (Mediterráneo Occidental).

Interaction between seamounts and shear zones in the Central Sector of the Alboran Sea (Western Mediterranean)

J.T. Vázquez[1], O. Sánchez-Guillamón[1], D. Palomino[1], A. García-Ledesma[1], P. Bárcenas[1], M. García[2], M. Sayago[2], J. Galindo-Zaldivar[3], A. Madarieta-Txurruka[3], F. Estrada[4], E. d'Acremont[5], G. Ercilla[4]

1 Centro Oceanográfico de Málaga, Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, 29640 Fuengirola, Málaga. juantomas.vazquez@ieo.csic.es olga.sanchez@ieo.csic.es, desiree.palomino@ieo.csic.es, antonio.garcia@ieo.csic.es, patricia.barcenas@ieo.csic.es
2 Centro Oceanográfico de Cádiz, Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, Cádiz. marga.garcia@ieo.csic.es, miriam.sayago@ieo.csic.es
3 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. jgalindo@ugr.es; amadatxu@ugr.es
4 Institut de Ciències del Mar, Grupo de Márgenes Continentales, CSIC, 08003 Barcelona, España. festrada@icm.csic.es; gemma@icm.csic.es
5 ISTeP, Sorbonne Université, Campus Jussieu and CNRS, UMR 7193, F-75005 Paris, Francia. elia.dacremont@sorbonne-universite.fr

Palabras clave: monte submarino, zonas de falla, escarpes de falla, depresiones tectónicas.

Resumen

En el sector central del fondo marino del Mar de Alborán destacan dos conjuntos de elementos morfo-estructurales: una alineación de montes submarinos de tendencia NO-SE y origen predominantemente volcánico y un conjunto de escarpes de falla y depresiones tectónicas que corresponden a cinco zonas de falla activas de tendencia NNE-SSO y movimiento general sinestral. La adquisición de nuevos datos batimétricos ha mejorado la imagen de la morfo-estructura de los dos montes surorientales de esta alineación (Villa de Djibouti y Al Idrissi) y permiten analizar sus interacciones con las zonas de cizalla que las limitan y que también atraviesan al monte de Villa de Djibouti. La estructura interna de los mismos está controlada por crestas y escarpes de orientación N-S, más continuas en el caso del monte Al Idrissi que, además, se caracteriza por amplias crestas y valles de tendencia ENE-OSO. Esta estructura interna estaría causada por la deformación asociada a las zonas de cizalla y al menos, en el caso del monte Al Idrissi, podrían ser causantes de una posible rotación. Por otro lado, la traza de dos zonas de falla sufre cierta deflexión al atravesar la alineación de montes. El aumento de resolución de los modelos batimétricos es básico para definir mejor los modelos de deformación activa en áreas submarinas.

Abstract

In the central sector of the Alboran Sea, two sets of morpho-structural elements stand out in the seafloor: a NW-SE alignment of seamounts of predominantly volcanic origin; and a set of fault scarps and tectonic depressions that reflect the activity of five active fault zones with trending NNE-SSW and a general sinistral movement. The acquisition of new bathymetric data has improved the morpho-structure image of the southeastern seamounts (Villa de Djibouti and Al Idrissi) and has allowed the analyses of their interactions with the shear zones that confine them and also cross to the Villa de Djibouti seamount. Their internal structure is marked by ridges and scarps oriented N-S, more continuous in the case of Al Idrissi seamount, which has also broad ridges and valleys ENE-WSW trending. This internal structure would be caused by deformation related to the shear zones and at least in the case of Al Idrissi seamount, they have also caused a posible rotation. On the other hand, the trace of two of the fault zones suffers a certain deflection when crossing the mountain alignment. The increase in resolution of the bathymetric models allows us to better image and defines the deformation models in tectonic active submarine areas.

Acomodación de la convergencia de placas en la Cuenca Occidental del Mar de Alborán y el Golfo de Cádiz

Accommodation of plate convergence in the Western Basin Alboran and the Gulf of Cadiz

R. Vegas[1] y J.T. Vázquez[2]

1 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, UCM, C/ José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid. Spain. ruidera@ucm.es
2 Centro Oceanográfico de Málaga, Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, Puerto Pesquero s/n. 29640 Fuengirola. juantomas.vazquez@ieo.csic.es

Resumen: Se presenta una revisión de la evolución de placas en el entorno de Iberia, considerando el comportamiento de este bloque litosférico como relativamente individualizado entre las dos placas principales de África y Eurasia. Las diferentes y sucesivas aperturas de las cuencas oceánicas en el entorno de Iberia han producido que el límite de placas entre África y Eurasia haya pasado sucesivamente del sur de Iberia (límite Triásico-Jurásico), al norte de Iberia (Albiense-Aptiense) y de nuevo al sur (Oligoceno-Mioceno). A partir de este último momento comienza el desarrollo de los márgenes continentales actuales del sur de Iberia. La Cuenca de Alborán se forma en la trasera del frente de deformación del bloque litosférico de Alborán en su migración hacia el oeste. En esta zona, la convergencia se resuelve hasta el Tortoniense mediante procesos de subducción y obducción de una litosfera continental hiperextendida contra los márgenes de Iberia y de África, incluyendo la formación de mantos peridotíticos. En este mismo escenario, en el Golfo de Cádiz, como resultado de la migración hacia el oeste del bloque de Alborán, tiene lugar el emplazamiento de un conjunto de unidades alóctonas sobre el límite transformante entre las dos grandes placas, si bien parte de la deformación es asumida por la inversión de las cuencas de antepaís. A partir del Mioceno superior-Plioceno se bloquean estos procesos y se produce la inversión de la cuenca de Alborán en relación con la indentación de la Dorsal de Alborán, como parte de África, y el desarrollo de cabalgamientos oblicuos al principal límite de placas relacionadas con una subducción remanente de un segmento de litosfera oceánica Atántica bajo el Arco de Gibraltar.

Palabras clave: tectónica de placas, convergencia, Cuenca de Alborán, Golfo de Cádiz.

Abstract: *A review of the plate evolution in the Iberian region is presented, considering the behavior of Iberia as a relatively individualized lithospheric block between the two main plates of Africa and Eurasia. The successive spreading of oceanic basins around Iberia has caused the evolution of the plate boundary between Africa and Eurasia successively from southern Iberia (Triassic-Jurassic boundary), to the north of Iberia (Albian-Aptian) and again to the south (Oligocene-Miocene). From this moment on, the development of the current margins of southern Iberian begins. The Alboran Basin forms at the rear of the Alboran lithospheric block deformation front as it migrates westward. In this area, convergence is resolved through subduction and obduction processes, until the Tortonian, of a hyperextended continental lithosphere against the margins of Iberia and Africa, including the formation of peridotite sheets. In this scenario, in the Gulf of Cádiz, a set of allochthonous units is emplaced on the transform boundary between the two main plates as a result of the migration of the Alborán block, although part of the deformation is assumed by the inversion of the foreland basins. From the upper Miocene-Pliocene boundary onwards, these processes are blocked and the inversion of the Alborán basin occurs in relation to the indentation of the Alborán Ridge as part of Africa, and also the development of oblique thrusts with respect to the main plate boundary in the Gulf of Cadiz. This last occurs in relation to a remnant subduction of the Atlantic oceanic lithosphere under the Gibraltar Arc.*

Key words: *plate tectonics, convergence, Alboran Basin, Gulf of Cadiz*

INTRODUCCIÓN

En sentido amplio, el movimiento relativo entre las placas de África y Eurasia comprende dos etapas diferentes (Dewey et al, 1989). Una primera de tipo transcurrente ligada a la apertura de las cuencas oceánicas del Atlántico Central y del Tethys Alpino y, otra posterior, convergente causada por la apertura de la cuenca oceánica del Atlántico Sur, que produce la rotación anti-horaria de África, el bloqueo de la apertura en la cuenca el Tethys Alpino, y como consecuencia la migración de la apertura de la cuenca del Atlántico

Central hacia el norte formando la cuenca del Atlántico Norte. En ambas etapas se suceden ambientes tectónicos locales de extensión, compresión o *strike-slip*, debido a la irregularidad de los límites de las dos grandes placas y el funcionamiento de diversos bloques litosféricos intermedios (Iberia, Adria).

En el borde sur de la Península Ibérica, la primera etapa transcurrente se inicia en el entorno del límite Triásico-Jurásico. Esta etapa perdura hasta el Albiense-Aptiense, cuando el movimiento relativo principal entre África y Eurasia pasa a situarse al norte del bloque listosférico de Iberia (Srivastava et al., 1990) debido a la migración del crecimiento oceánico en la cuenca del océano Tethys Alpino hacia la cuenca del Atlántico Norte. Esta migración incluye la formación de la cuenca del Golfo de Vizcaya también en un contexto de rotación anti-horaria de Iberia en forma solidaria con África.

Esta rotación lleva progresivamente al desarrollo de una etapa convergente que se inicia en el borde norte de Iberia a partir del límite Cretácico-Paleóceno propagándose de este a oeste con un mayor paroxismo en el Eóceno. En esta fase se inicia la colisión de Pirineos entre Iberia y Eurasia así como la subducción e infracabalmiento de la cuenca oceánica Cantábrica bajo Iberia produciendo la inversión de diversas estructuras en el Golfo de Vizcaya. Una vez que tiene lugar la colisión de Pirineos y se bloquea la subducción de la litosfera oceánica del Cantábrico, la mayor parte de la componente convergente y el propio límite de placas principal se fijan al sur del bloque litosférico de Iberia a partir del Oligoceno-Mioceno.

En el Mediterráneo Central y Occidental, la convergencia de África respecto a Eurasia tiene una orientación NNE del Oligoceno superior al Burdigaliense (Fig. 1), que pasa a ser NNO desde el Langhiense al Tortoniense inferior, y NO a partir del Tortoniense superior hasta la actualidad (Marzolli y Helman, 1994). Las medidas actuales con GPS pasan a considerar este último movimiento incluso dirigido hacia el ONO (González del Castillo et al., 2015 y referencias citadas).

CUENCA DE ALBORÁN

Una parte sustancial de la convergencia es asumida por la superposición de una lámina cabalgante de corteza "tipo Alborán o Dominio de Alborán" sobre la cuenca triásico-jurásica de Antequera (margen Sudibérico). Esta lámina contiene cuerpos peridotíticos y en su conjunto puede asimilarse a una corteza continental extremadamente adelgazada (hiperextendida) donde llega a producirse la exhumación de manto litosférico. El emplazamiento de esta lámina puede ser explicado por un proceso de obducción durante la evolución alpina de la corteza continental hiperextendida formada en el margen continental de una cuenca oceánica mesozoica, en el ambiente tectónico existente en el límite de placas Triásico-Jurásico.

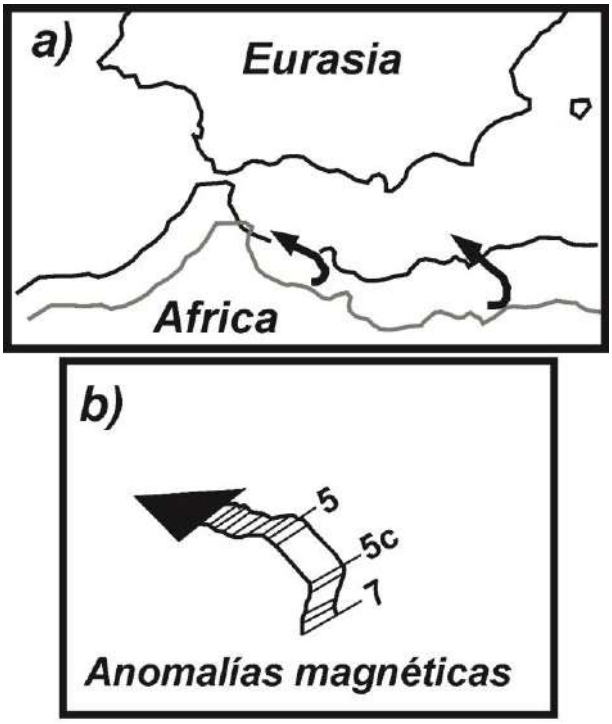


FIGURA 1. a) Trayectoria (líneas de flujo) de la aproximación relativa de África con respecto a Eurasia desde el final del Oligoceno (gris) al presente (negro). b) Edad de los segmentos de la línea de flujo según las anomalías magnéticas; se han marcado las anomalías 7 (25,50 Ma), 5C (16,22 Ma) y 5 (8,92 Ma). Basadas en Mazzoli y Helman (1994).

En este proceso, la litosfera oceánica correspondiente a esta cuenca mesozoica intermedia (el llamado Dominio de Alborán) subduce hacia el NNO bajo Iberia (Fig. 2), si bien la resistencia de la litosfera oceánica jurásica situada al oeste impide la progresión de la subducción hacia esta misma dirección. Como consecuencia, la losa que subduce se dobla hacia el SSO, tal como evidencia la distribución de los hipocentros de los terremotos de profundidad intermedia (40-100 km, Vázquez y Vegas, 2000). En este contexto, la lámina cabalgante desborda hacia el SSE situándose sobre el borde del margen africano. Este mecanismo tectónico debió actuar en su mayor parte desde el Langhiense al Tortoniense inferior.

Esta forma de asumir la convergencia permite explicar la continuidad de la lámina cabalgante en ambos orillas del Estrecho de Gibraltar (las denominadas *zonas internas* de la cordillera Bético-Rifeña) así como la formación de un arco orogénico abierto al Este. El progresivo desarrollo de este frente de deformación se relacionaría, además, con la formación de la barrera orográfica responsable del aislamiento de la cuenca mediterránea, y su desecación, en el Mesiniense.

A partir del Mioceno superior-Plioceno se llegó a una situación donde el emplazamiento del este orógeno Bético-Rifeño de forma arqueada sobre los márgenes de Iberia y África produce una ralentización de la deriva hacia el oeste del Dominio de Alborán, si bien África sigue teniendo un movimiento convergente relativo con

respecto a Eurasia en dirección NO. Como consecuencia se produce la inversión de la Cuenca de Alborán en relación con la indentación de un promontorio de la litosfera africana (Estrada et al., 2018), esta identación produce la elevación de una antiforma principal, la propia Dorsal de Alborán, en relación con un cabalgamiento ciego situado bajo su flanco norte en el límite norte del bloque identador, así como la estructuración del margen norte de la cuenca, afectado por sistemas de fallas *strike-slip* de dirección NNE-SSO senestras y NO-SE dextrales, así como pliegues de tendencia ENE-OSO (Estrada et al., 2018 y referencias citadas).

GOLFO DE CÁDIZ

En esta región vecina, la acomodación de la convergencia es amortizada por un mecanismo tectónico completamente diferente tal como fue definido anteriormente (Vázquez y Vegas, 2000). Es muy probable que una parte de la convergencia haya sido amortizada con anterioridad al Tortoniense suprior mediante la inversión (moderada) de la cuenca mesozoica del Algarve (Ramos et al., 2017) en la región del antepaís. Una parte importante de esta inversión podría estar relacionada con la transmisión de esfuerzos lejanos a través del margen continental portugués.

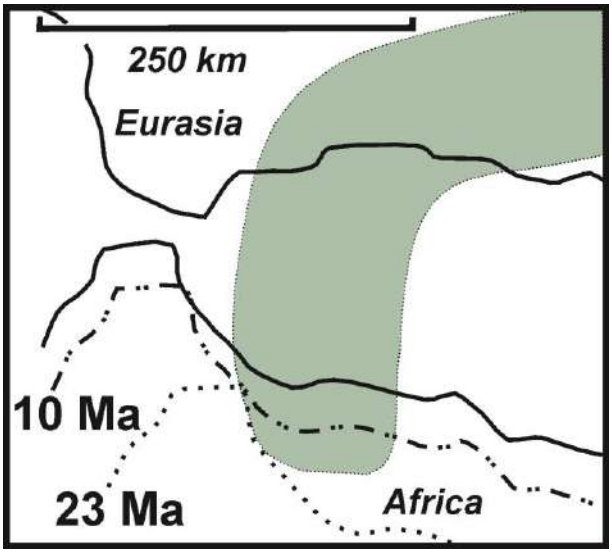


FIGURA 2 Posición de la losa de subducción tras la formación del arco orogénico de Gibraltar y situación de África respecto a Eurasia desde el Mioceno inferior. Modificado de Spakman y Wortel (2004).

A partir del Tortoniense inferior, la convergencia es asumida por la transferencia de esfuerzos cercanos del límite de placas incluyendo los esfuerzos residuales del arco orogénico de Gibraltar. El movimiento convergente de las placas es aquí amortizado en las estructuras de la primitiva zona transformante activa durante el Jurásico, que son obliteradas en parte por el emplazamiento sobre el margen del Golfo de Cádiz de un importante complejo alóctono de origen tectónico-gravitacional. Este complejo es el resultado de la erosión y el desmantelamiento del arco orogénico de Gibraltar, consecuencia de la propia colisión hacia el oeste del bloque de Alborán. Este complejo alóctono se articula en dos lóbulos de diferente tamaño. El más extenso se sitúa al norte y tapiza la corteza de edad Jurásico del antiguo límite transcurrente. El más pequeño, situado al sur, se superpone al margen africano.

A partir del Mioceno superior-Plioceno, la deformación asociada por la actividad del límite de placas es asumida por la reactivación de fallas de largo recorrido cuyo origen ha de buscarse en el sistema de fallas de tipo *strike slip* que conformaron este límite de placas transcurrente en etapas anteriores (Vegas et al, 2016). Estas fallas se deben considerar como corredores de tipo *strike-slip* en cuyos extremos se situarían zonas de deformación vertical que asumirían parte de la convergencia y que están representadas por relieves submarinos generados por cabalgamientos oblicuos al principal límites de placas y el exterior del arco de Gibraltar (Vegas et al., 2008). Parte de está deformación convergente podría estar relacionada con la remanencia de una cierta subducción muy ralentizada o incluso una subducción inicial de un segmento de litosfera oceánica Atántica bajo el Arco de Gibraltar.

CONSIDERACIONES FINALES

La evolución del límite de placas de África y Eurasia ha afectado al funcionamiento de Iberia como un bloque litosférico con movimientos relativamente independientes, a lo largo de su evolución, entre ambas placas. Si bien, cabe señalar el papel que han tenido a lo largo de la evolución tectónica del sur de Iberia los sistemas de fallas transcurrentes.

Así en el inicio de esta evolución, en el Jurásico, el área del sur de Iberia estuvo controlada por fallas transcurrentes que conectaban las cuencas oceánicas de África Central, al oeste, y del Tethys Alpino, al este, controlando, además, la formación de una margen continental hiperextendida. De la misma forma estos sistemas de falla transcurrentes tuvieron un papel principal en la evolución posterior del sistema Bético-Rifeño y de los dos márgenes continentales actuales, Cuenca del Alborán y Golfo de Cádiz, situados respectivamente al este, en el interior del arco orogénico, y al oeste del frente de deformación, Arco de Gibraltar, en donde se desarrollan las estructuras más externas de esta cordillera.

Esta influencia de las fallas transcurrentes generadas en el Jurásico se mantiene hoy en día en el Golfo de Cádiz, si bien están parcialmente enterradas bajo el complejo alóctono procedente del frente de deformación Bético-Rifeño.

REFERENCIAS

Dewey, J.F., Helman, M.L., Knott, S.D., Turco, E. y Hutton, D.H.W. (1989): Kinematics of the western Mediterranean. *Geological Society of London*, Spec Publ 45: 265–283.

Estrada, F., Galindo-Zaldívar, J., Vázquez, J.T., Ercilla, G., D'Acremont, E., Alonso, B. y Gorini, C. (2018): Tectonic indentation in the central Alboran Sea (westernmost Mediterranean). *Terra Nova*, 30 (1): 24-33.

González-Castillo L., Galindo-Zaldivar J., de Lacy M.C., Borque M.J., Martinez-Moreno F.J., García-Armenteros J.A. y Gil A.J. (2015): Active rollback in the Gibraltar Arc: Evidences from CGPS data in the western Betic Cordillera. *Tectonophysics*, 663: 310-321.

Mazzoli, S. y Helman, M. (1994): Neogene patterns of relative plate motion for Africa-Europe: some implications for recent central Mediterranean tectonics. *Geologische Rundsch,au* 83 (2): 464-468.

Ramos, A., Fernández, O., Terrinha, P., Muñoz, J.A. (2017): Neogene to recent contraction and basin inversion along the Nubia-Iberia boundary in SW Iberia. *Tectonic.s* 36 (2): 257-286.

Spakman, W. y Wortel, R. (2004): A Tomographic View on Western Mediterranean Geodynamics. En: W. Cavazza, F. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli, P.A. Ziegler (Eds) *The TRANSMED Atlas. The Mediterranean Region from Crust to Mantle*, Springer, Berlin, Heidelberg, 31-52.

Srivastava, S.P., Schouten, H., Roest, W.R., Klitgord, K.D., Kovacs, L.C., Verhoef, J. y Macnab, R. (1990): Iberian plate kinematics: a jumping plate boundary between Eurasia and Africa. *Nature*, 344: 756-759.

Vázquez, J.T. y Vegas, R. (2000): Acomodación de la convergencia entre África y la Península Ibérica, Golfo de Cádiz y Mar de Alborán, a partir del análisis de terremotos. *Geogaceta*, 27: 171- 174.

Vegas, R., Medialdea, T. y Vazquez, J.T. (2008): On the nature of the present-day plate boundary between the Iberian Peninsula and northern Africa. *Geo-Temas*, 10: 1535-1538.

Vegas, R, Vazquez J.T., Olaiz, A. y Medialdea, T. (2016): Tectonic model for the latest Triassic-Early Jurassic extensional event in and around the Iberian Peninsula. *Geogaceta*, 60: 23-26.

Revisando la geomorfología del Cañón de Ceuta (SW Mar de Alborán)

Revisiting the geomorphology of the Ceuta Canyon (SW Alboran Sea)

C. Juan[1], G. Ercilla[2], F. Estrada[2], D. Casas[2], B. Alonso[2], D. Van Rooij[3], Galindo-Zaldivar, J.[4]; M. Bruno[5], J.A. Jimenez[5], J.J. Gomiz[5], W. Boone[6], K. Langedoc[6], F. Fourie[6], T. Vandorpe[6], and GRACE Team

1 Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), Centro Oceanográfico de Cádiz. Puerto Pesquero, Muelle de Levante s/n, 11006 Cádiz, Spain. carmen.juan@ieo.csic.es
2 Institut de Ciències del Mar ICM-CSIC, The Continental Margins Group-GMC, Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona, Spain. gemma@icm.csic.es, festrada@icm.csic.es; davidcasas@icm.csic.es; belen@icm.csic.es
3 Renard Centre of Marine Geology (RCMG). Ghent Univertsity. Krijgslaan 281 s.8. B-9000 Gent. david.vanrooij@ugent.be
4 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra - Universidad de Granada. Av. de las Palmeras, 4, 18071 Granada. jgalindo@ugr.es
5 Universidad de Cádiz (UCA), Dpto. de Física Aplicada. Edificio CASEM, Av. República Saharaui s/n, 11510 Puerto Real, Cádiz. Miguel.bruno@gm.uca.es; juan.jimenezrincon@alum.uca.es; juanjesus.gomiz@gm.uca.es.
6 Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ). Jacobsenstraat 1, 8400 Oostende, Bélgica. wieter.boone@vliz.be; kobus.langedock@vliz.be; fred.fourie@vliz.be; thomas.vandorpe@vliz.be.

Palabras clave: Cañón, corrientes, Ceuta, Alborán, Mediterráneo.

Resumen

El Cañón de Ceuta es una estructura de gran tamaño y morfología arcuada ubicada en el extremo occidental del margen mediterráneo marroquí. Este cañón destaca debido a tres razones: i) su ubicación está controlada tectónicamente, asociada a estructuras activas en tierra (falla de Onsar); ii) su cabecera se encuentra muy próxima a la costa, mientras que su extremo distal desemboca en el Estrecho de Gibraltar; y iii) se ve influido por las masas de agua atlántica y mediterráneas, así como por ondas internas.

El presente estudio sigue un enfoque multidisciplinar, centrándose en los procesos sedimentarios, la cronoestratigrafía y la oceanografía. El uso de técnicas tanto indirectas (batimetría multihaz, y perfiles acústicos del subfondo) como directas (observaciones con AUV) permitieron conocer los procesos morfológicos que afectan el fondo marino con una resolución sin precedentes.

Los datos muestran que la heterogeneidad del basamento condiciona la ubicación del cañón proximal, mientras que la interacción entre los procesos sedimentarios longitudinales y transversales al talud afectan a la porción distal del cañón. Los datos oceanográficos indican que el cañón está muy influido por corrientes, con velocidades superiores a los 50 cm/s y causando la formación de surcos que desembocan en el Cañón de Ceuta. Sin embargo, los perfiles del subfondo muestran una cobertura sedimentaria de escala métrica sobre el cañón, que sugiere una disminución de su actividad talud abajo.

Abstract

The Ceuta Canyon is a large-scale arcuated downslope feature located at the westernmost end of the Mediterranean Morocco margin. This canyon is relevant for three main reasons: i) its location is tectonically controlled and related to onshore active structures (Onsar fault); ii) the canyon head is located very close to coast, and the distal end mouths into the Strait of Gibraltar; and iii) the canyon is affected by the Atlantic and Mediterranean waters, as well as internal waves.

This study follows a multidisciplinary approach, focusing on the sedimentary processes, chronostratigraphy, and oceanography. The use of indirect (multibeam bathymetry, subbottom acoustic profiles) and direct (AUV) observational techniques allowed obtaining knowledge of the geomorphic processes affecting the seafloor topography with unprecedented precision.

The analysis of the datasets indicates that the inherited crustal heterogeneity conditions the pathway of the upper canyon, while the interplay between alongslope and downslope sedimentary processes conditions the pathway of the distal canyon. Oceanographic results indicate that the Ceuta Canyon is deeply influenced by currents reaching up to 50 cm/s and causing the formation of scours that mouth into the Ceuta Canyon. However, the subbottom profiles show that the canyon is draped by a metric-scale layer of sediment, pointing to a diminished downslope activity of the canyon.

Yacimiento paleontológico de La Esfinge, Gran Canaria: nuevas contribuciones al conocimiento del paleoclima del Plioceno en las Canarias orientales, España.

La Esfinge paleontological site, Gran Canaria Is., new contributions for a better knowledge of the Pliocene paleoclimate in the Eastern Canaries, Spain.

M. Almenara[1], J. F. Betancort*[1], A. Lomoschitz[2] y J. Meco[1]

1 Departamento de Biología, Laboratorio de Paleontología, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, SPAIN. *moni_skt@hotmail.es, juanbetancort@gmail.com, joaquinfrancisco.meco@ulpgc.es*

2 Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, SPAIN. *alejandro.lomoschitz@ulpgc.es*

Palabras clave: Plioceno, capas marinas, Gran Canaria, *Lutraria lutraria, Janthina típica*

Resumen: Los depósitos marinos del Plioceno están ampliamente representados en las islas Canarias orientales. Están presentes a diversas alturas en Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote con facies sedimentarias características y numerosas especies fósiles, destacando entre ellas: *Grypahea virleti (Deshayes, 1832), Nerita emiliana* (Mayer, 1872), *Persististrombus coronatus* (Defrance, 1827), *Siderastraea miocenica* (Osasco, 1897), *Isognomon soldanii* (Deshyes, 1836), *Clypeaster altus* (Lamark, 1816) y *Otodus megalodon* (Agassiz, 1843). En el yacimiento de La Esfinge, La Isleta, NE de Gran Canaria, se ha levantado una nueva columna estratigráfica, que muestra una sucesión geológica compleja que, de base a techo, incluye: lavas submarinas del Plioceno en forma de lavas almohadilladas (*pillow lavas*) e Hialoclastitas, datadas en ca. 4.2 Ma (Meco et al., 2015); capas sedimentarias arenosas del Plioceno, conteniendo abundante fauna marina fósil; y coladas lávicas y piroclastos del Pleistoceno. De este yacimiento se han muestreado y clasificado 42 taxones diferentes. Es especialmente sobresaliente la presencia de una capa sedimentaria con numerosos ejemplares de *Lutraria oblonga* (Gmelin, 1791) que se encuentran en posición de vida y una capa sedimentaria que contiene abundantes especímenes de *Janthina typica* (Bronn, 1860), un gasterópodo planctónico (Meco et al., 2016; Almenara Perera, 2021).

Abstract: Pliocene marine deposits are widely represented in the Eastern Canary Islands. They are present at varied elevations in Gran Canaria, Fuerteventura and Lanzarote Islands, with characteristic sedimentary facies and several fossil species, standing out among them: Grypahea virleti (Deshayes, 1832), Nerita emiliana (Mayer, 1872), Persististrombus coronatus (Defrance, 1827), Siderastraea miocenica (Osasco, 1897), Isognomon soldanii (Deshyes, 1836), Clypeaster altus (Lamark, 1816) and Otodus megalodon (Agassiz, 1843). At La Esfinge site, NE Gran Canaria, a new stratigraphic section has been drawn which shows a complex geological succession with, bottom to top: Pliocene submarine lavas in the form of pillow lavas and hyaloclastite, dated ca. 4.2 Myr (Meco et al., 2015); Pliocene sandy sedimentary beds bearing abundant marine fossil fauna; and Pleistocene basanite lava flows and pyroclasts. From this section, 42 different taxa have been sampled and classified. It is specially outstanding the presence of a sedimentary bed with a huge number of Lutraria oblonga (Gmelin, 1791) which are in life position and a sedimentary bed bearing Janthina typica (Bronn, 1860), a planktonic gastropod (Meco et al., 2016; Almenara Perera, 2021).

REFERENCIAS

Almenara Perera, M. 2021 Aportación de un nuevo punto significativo para el neógeno de Canarias: La Esfinge, Gran Canaria, Islas Canarias. Trabajo de Fin de Grado. Grado en geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca.

Meco, J., Koppers, A.A.P., Miggins, D.P., Lomoschitz, A. & Betancort, J.F. (2015): The Canary Record of the Evolution of the North Atlantic Pliocene: New 40Ar/39Ar Ages and Some Notable Palaeontological Evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeo-ecology, 435: 53-69.*

Meco, J. Lomoschitz, A., Betancort, J.F. (2016) Early Pliocenene tracer of North Atlantic and South Pacific Sea surface currents Janthina typica (Bronn, 1860) (Mollusca: Gastropoda). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 33(2):192-197.

Carbonatos biogénicos (queras) en secuencias de loess-paleosuelos de la cuenca del Ebro: potenciales marcadores paleoambientales

Biogenic carbonates (queras) in loess-palaeosol sequences of the Ebro Basin: potential palaeoenvironmental proxies

D. Álvarez Morales[1], C.A. Torres-Guerrero[1], A. Travé[2], F. Preusser[3], J.M. Plata[1] y R.M. Poch[1]

1 Department of Chemistry, Physics and Environmental and Soil Sciences, Universitat de Lleida, Avinguda Alcalde Rovira Roure 191, E-25198 Lleida, Spain. danielav019@gmail.com; rosa.poch@udl.cat; geoplatamoreno@gmail.com
2 Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028, Spain. atrave@ub.edu
3 Institute of Earth and Environmental Sciences, University of Freiburg, 79104 Freiburg, Germany. frank.preusser@geologie.uni-freiburg.de

Palabras clave: Carbonate biocalcifications, queras, carbon and oxygen isotopes, radiocarbon dating, palaeoenvironmental indicators

Resumen

Las acumulaciones diagenéticas de carbonatos (queras) son muy comunes en suelos áridos y semiáridos y están presentes en varias secuencias Pleistocenas de loess-paleosuelos en la cuenca del Ebro. Las queras son estructuras pedogénicas complejas que consisten en rellenos de células de raíces calcificadas en canales, rodeados de halos descarbonatados, resultado de procesos de calcificación/descalcificación a microescala mediados biológicamente. Hemos caracterizado las biocalcificaciones de las secuencias datadas de loess-paleosol para determinar los principales factores de formación y discutir su posible uso como proxy paleoambiental. Las queras muestran de cuatro a cinco capas de biosparita alrededor de un canal central y un halo descarbonatado alrededor sugiriendo que se originan a partir de la calcificación de las puntas de las raíces, posiblemente relacionadas con la acidificación del suelo circundante para la absorción de nutrientes. Bajo cátodoluminiscencia, la biosparita es negra y la calcita no biológica es rojiza. Las edades de las queras corresponden a los estadios isotópicos marinos 1, 2 i 3. Los valores de los isótopos estables corresponden a plantas C3, y las temperaturas estimadas de formación reflejan un clima templado mediterráneo. Esto sugiere que las biocalcificaciones se desarrollaron durante estaciones húmedas cortas en medio de períodos áridos del Cuaternario.

Abstract

Diagenetic carbonate accumulations (queras) are very common in arid and semi-arid soils and are observed in several Pleistocene loess-paleosol sequences of the Ebro Basin. The queras are complex pedogenic features consisting of infillings of calcified root cells in channels, surrounded by decarbonated hypocoatings, resulting from biologically mediated calcification/decalcification processes at a microscale. We have characterized biocalcifications found in dated loess-palaeosol sequences, to determine the main factors of formation, and to discuss their possible use as a palaeoenvironmental proxy. Queras show four to five biosparite layers around a central channel, and a decarbonated hypocoating around suggesting that queras originate from the calcification of root tips and are related to the acidification of surrounding soil for nutrient absorption. Under cathodoluminescence, biosparite is black and the non-biological calcite is reddish. The ages of the queras correspond to marine isotope stages 1 to 3. The stable isotope values likely correspond to C3 plants, and the estimated temperatures of formation reflect a Mediterranean temperate climate. This suggests that the biocalcifications developed during short moist seasons amidst arid periods of the Quaternary.

Producción carbonatada y condiciones redox registradas en una cuenca de retroarco de la Península Ibérica

Late Ediacaran carbonate production and redox conditions in a Cadomian retroarc basin from the Iberian Peninsula

J.J. Álvaro[1], S. Lorenzo[2], B. Martínez-Benítez[1,3] y A.P. Pieren[3]

1 Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Dr. Severo Ochoa 7, 28040 Madrid, jj.alvaro@csic.es, blancm05@ucm.es
2 Departamento de Ingeniería Geológica y Minera-IGeA, Universidad de Castilla-La Mancha, Manuel Meca 1, 13400 Almadén, saturnino.lorenzo@uclm.es
3 Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid, apieren@ucm.es

Palabras clave: Cadomian Arc, carbonate, megabreccia, Ediacaran, Gondwana.

Resumen

La producción carbonatada durante el Ediacárico tardío registrada en una cuenca de retroarco cadomiense de la Península Ibérica proporciona una excelente oportunidad para evaluar los factores tectónicos y las condiciones redox que controlaron el relleno de depresiones de antepaís, intercaladas entre cuñas orogénicas elevadas y sectores de antepaís bajo exposición aérea. En la Zona Centroibérica, los carbonatos de la Formación Villarta dibujan dos cinturones geográficos, que representan mosaicos de facies carbonatadas registradas en altofondos levantados e inclinados por fallas. En ellos se registró la nucleación de complejos arrecifales marginales (ricos en conchas de *Cloudina* y *Sinotubulites* inmersas en texturas tromboidales) y de complejos de barras, que alimentaron episódicamente un conjunto de megabrechas y canales relacionados con taludes circundantes. Los datos de REE+Y aportados por estos carbonatos reflejan tanto la interacción hidrotermal como las variaciones en las condiciones redox, que oscilan de óxicas a disóxicas, estas últimas acentuadas por el depósito de lutitas (ahora pizarras) negras querógenas en las partes distales de la depresión de antepaís.

Abstract

The late Ediacaran carbonate production recorded in a Cadomian retroarc foreland basin from the Iberian Peninsula provides an excellent opportunity to evaluate the tectonic and redox factors that controlled the infill of foredeep troughs, sandwiched between uplifted orogenic wedges and exposed forebulge transects. In the Central Iberian Zone, the carbonates of the Villarta Formation follow two geographic belts, which represent short-term mosaics of uplifted and tilted fault-bounded basement highs. These recorded the nucleation of fringing reefal (rich in *Cloudina* and *Sinotubulites* shells encased in thromboid textures) and shoal and back-barrier complexes, which episodically fed slope-related megabreccia lobes and channels. REE+Y datasets yielded by the impure carbonates reflect hydrothermal interaction and variable redox conditions, ranging from oxic to dysoxic, the latter emphasized by the deposition of kerogenous black shales in distal parts of the foredeep trough.

Los efectos de la transición del endorreísmo al exorreísmo sobre la sucesión del Neógeno superior de la cuenca del Duero.

Effects of the endorheic-exorheic transition on the upper Neogene succession of the Cenozoic Duero Basin.

I. Armenteros[1], P. Huerta[1], L. González-Acebrón[2], R. Martín-García[3], A. Rodríguez-Berriguete[3], A. Martín-Pérez[4], A. Košir[4]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37071 Salamanca. ilde@usal.es
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, C/ Jose Antonio Novais, 12. Ciudad Universitaria. 28040 – MADRID lgcebron@geo.ucm.es
3 Dpto. Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense de Madrid, C/ Jose Antonio Novais, 12. Ciudad Universitaria. 28040 - MADRID rebecm05@ucm.es; arberriguete@ucm.es
4 Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Ljubljana, Slovenia, andreamp@zrc-sazu.si; adrijan@zrc-sazu.si

Palabras clave: Cuenca del Duero, Alteración, Calcitización, Karst, Exorreísmo, Neógeno superior.

Resumen

El endorreísmo de la Cuenca del Duero persistió al menos hasta el Plioceno Inferior en su parte oriental (Luengo et al., 2009) pero se desconoce el comienzo del exorreísmo en la región occidental salmantino-zamorana. Las primeras evidencias del exorreísmo son: a) la sedimentación de facies aluviales de gravas, arenas y lutitas que se encuadran en la "raña", y b) alteración sobre la unidad de Calizas del Páramo Superior, Inferior y el techo de la unidad de Facies Cuestas (Armenteros, 1991). En el sector oriental de la Cuenca del Duero, los depósitos de "raña" rellenan cavidades kársticas desarrolladas sobre la sucesión endorreica del Neógeno superior formada por facies lutítico-conglomeráticas con caliches y calizas de la Unidad del Páramo Superior (Molina y Armenteros, 1986). Sobre las Calizas del Páramo Inferior se aprecian efectos kársticos y neomorfismo con desarrollo de mosaicos mesocristalinos, mientras que sobre las facies margoso-yesíferas del techo de la unidad de Facies Cuestas se produce principalmente calcitización de los yesos. La alteración es un proceso complejo y prolongado en el tiempo que ha progresado hacia el Este.

Abstract

In the eastern part of the Duero Basin, endorheic drainage persisted at least until the Early Pliocene (Luengo et al., 2009) while the beginning of exorheic stage in the western region of Salamanca-Zamora is unknown. The first evidence of exorheic conditions are: a) the sedimentation of alluvial facies of gravels, sands, and shales corresponding to the "raña," and b) the alteration of the Upper and Lower Páramo Limestones and the top of the Facies Cuestas unit (Armenteros, 1991). In the eastern sector of the Duero Basin, the "raña" deposits fill karstic cavities developed on the upper Neogene endorheic succession formed by mudstone and conglomerate facies with calcretes and limestones of the Páramo Superior unit (Molina and Armenteros, 1986). On the Páramo Inferior Limestones, karstification and neomorphism with the development of mesocrystalline mosaics are observed, and on the marly-gypsum facies of the top of the Cuestas Facies unit, mainly gypsum calcitization occurs. Alteration is a complex and prolonged process that have progressed towards the East. .

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los proyectos de investigación: PID2022-14713NB-100 financiados por el MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/ y FEDER "Una manera de hacer Europa".

Referencias

Armenteros I. (1991). *Acta Geológica Hispánica* 26, 97-131.
Luengo, J., Nozal, F, Peláez-Campomanes, P., Montes, M., Armenteros, I., López Olmedo, F. García-Paredes, I (2009). En: 27th IAS Meeting of Sedimentology, Alghero (Italy). Abstracts Book, 582.
Molina, E., Armenteros, I. (1986). *Stvdia Geologica Salmanticensia* 22, 293-307.

Análisis mediante ArcGIS Pro y ArcGIS Online de los parámetros ambientales, dinámica de crecimiento carbonatado y respuesta hidrológica de la Cueva de Nerja (Málaga).

Modelling by means of ArcGIS Pro y ArcGIS Online of the environmental parameters, carbonate growth dynamics and hydrological response of the Nerja Cave (Málaga).

J.M. Arráez[1], C. Jiménez de Cisneros[1] y C. Liñán-Baena[2,3]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT-CSIC) Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla (Granada)
aarraezju2be@gmail.com; concepcion.cisneros@csic.es
2 Instituto de Investigación Fundación Cueva de Nerja, Carretera de maro s/n, 29787 Nerja (Málaga)
cbaena@cuevadenerja.es
3 Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga

Palabras clave: ArcGIS, temperatura, isótopos, goteo, precipitación.

Resumen

Los sistemas de monitorización en cuevas permiten realizar un seguimiento instrumental de los parámetros ambientales que resulta fundamental para establecer el modelo de comportamiento climático, evaluar la dinámica de crecimiento carbonatado actual, y la transferencia de la señal isotópica desde el agua de lluvia hasta el carbonato precipitado en las cavidades.

La monitorización realizada en la Cueva de Nerja (Málaga, España) durante cinco años (2017-2021) ha suministrado un conjunto de datos sobre los parámetros ambientales (temperatura, humedad relativa y CO_2 del aire), la composición isotópica del agua de lluvia ($\delta^{18}O$ y δD), la composición isotópica del agua de goteo que se infiltra en la cavidad ($\delta^{18}O$ y δD), la composición isotópica del carbonato ($\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$) que precipita actualmente y la composición química y mineralógica de los suelos externos situados sobre la cavidad. El análisis de estos resultados mediante ArcGIS Pro y ArcGIS Online ha permitido mediante las herramientas de geoprocesamiento y estadísticas espaciales, generar modelos analíticos y patrones de la dinámica de crecimiento actual del carbonato y su relación con los parámetros ambientales y la cobertera edáfica.

Abstract

Monitoring systems in caves allow instrumental tracking of environmental parameters that is essential to establish the model of climatic behaviour, evaluate the current carbonate growth dynamics, and the transfer of the isotopic signal from rainwater to carbonate precipitated in the caves.

The monitoring carried out in Nerja Cave (Málaga, Spain) for five years (2017-2021) has provided a dataset on environmental parameters (temperature, relative humidity and air CO_2), the isotopic composition of rainwater ($\delta^{18}O$ y δD), the isotopic composition of drip water infiltrating into the cavity (($\delta^{18}O$ y δD), the isotopic composition of carbonate ($\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$) currently precipitating, and the chemical and mineralogical composition of external soils above the cavity. The analysis of these results using ArcGIS Pro and ArcGIS Online has allowed, through geoprocessing tools and spatial statistics, to generate analytical models and patterns of the current carbonate growth dynamics and its relationship with environmental parameters and the soil cover.

Referencias

Jiménez de Cisneros, C., Peña, A., Caballero, E. and Liñán Baena, C. 2021. *International Journal of Environmental Research.* https://doi.org/10.1007/s41742-020-00278-x
Liñán, C., del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J. and Ojeda, L. 2018. *Science of the Total Environment.* https://doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.304

Reef building during the Thanetian (late Paleocene): facies architecture of some representative Pyrenean examples, N Spain

Desarrollo arrecifal durante el Thanetiense (Paleoceno superior): arquitectura de facies de ejemplos pirenaicos representativos, N España

J.I. Baceta[1], G. Mateu-Vicens[2], S. Tomas[3] and V.P. Wright[4]

1 Dpto. de Geología, Zientzi eta Teknologi Fakultatea, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Bo. Sarriena s/n, E-48940 Leioa (Bizkaia) . juanignacio.baceta@ehu.eus
2 Catedra Guillem Colom, University of the Balearic Islands, Ctra. Valldemossa km 7.5, E-07122 Palma de Mallorca, Spain. guillem.mateu@uib.es
3 Dpt. de Geologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona, C. de la Vall Moronta, s/n, E-08193 Bellaterra (Barcelona). sara.tomas.lafaja@uab.cat
4 National Museum of Wales, Cathays Park, Cardiff, CF10 3NP, Wales, UK. vpw@pwcarbonategeoscience.com

Keywords: Reef buildups, upper Paleocene, mesophotic, Pyrenees.

Abstract

Cenozoic reefs are typically built by the intergrowth of corals and different calcareous algae, with encrusting foraminifers, bryozoans, calcareous sponges and bivalves as main subordinate contributors (Kiessling, 2000). First typical Cenozoic reefs developed during the Thanetian (late Paleocene), within extensive carbonate ramps and platforms in different areas of the Mediterranean Tethys (Pomar et al., 2017). They mainly occur as discrete buildups and biostromes, although also comprise large reef banks and barriers such as those in the subsurface of the Syrte basin (Lybia). Here we document the architecture and compositional features of several selected outcrop examples from the western Pyrenees, which grew up embedded within foramol bioclastic ramp carbonates. They comprise from small mud-dominated buildups to multi-stage skeletal reef banks, in some cases developed under terrigenous influence. Integration of compositional-textural data, internal architecture and stratigraphic location point to preferential development along mesophotic depositional depths, under variable nutrient and energy levels, and during both transgressive and high sea level stands.

Resumen

Los arrecifes cenozoicos principalmente se definen por intercrecimientos de corales y diferentes algas calcáreas, con foraminíferos incrustantes, esponjas, briozoos y bivalvos como principales componentes subordinados (Kiessling et al., 2000). Los primeros arrecifes de composición típicamente cenozoica se desarrollaron durante el Thanetiense (Paleoceno superior), sobre extensas plataformas y rampas carbonatadas a lo largo del Tethys mediterráneo (Pomar et al., 2017). Comúnmente forman buildups y biostromos de tamaño discreto, aunque también aparecen como grandes bancos y barreras arrecifales, como las identificadas en el subsuelo de la Cuenca de Syrte (Libia). Aquí documentamos la composición y arquitectura de varios ejemplos distintivos expuestos en el Pirineo occidental, interestratificados entre depósitos bioclásticos de rampa carbonatada de tipo foramol. La selección incluye desde pequeños buildups dominados por fango carbonatado a bancos arrecifales esqueletales de crecimiento multiepisódico, en algunos casos desarrollados bajo influencia terrígena. La integración de datos composicionales-texturales, arquitectura de facies y posición estratigráfica señala un desarrollo preferencial en contextos mesofóticos, bajo niveles de energía y nutrientes variables y tanto durante fases transgresivas como de alto nivel del mar.

References

Kiessling, W., Flügel, E. and Golonka, J. Eds. (2002). SEPM Special Publication, 775 p.

Pomar, L., Baceta, J.I., Hallock, P., Mateu-Vicens, G. and Basso, D. (2017) *Mar. Petrol. Geol.*, 83, 261–304. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.03.015

Caracterización 3D de heterogeneidades sedimentarias y su impacto en las propiedades de reservorio en areniscas fluviales amalgamadas: Formación Montllobar (Ypresiense, Cuenca de Tremp-Graus).

3D characterization of sedimentary heterogeneity and its impact on reservoir properties in amalgamated fluvial sandstones: Montllobar Formation (Ypresian, Tremp-Graus Basin).

G. Bello[1,2], F. Tejedor[1], M. Poyatos-Moré[1], P. Cabello[3], A. van Yperen[4], J. Holbrook[5], I. Midkandal[4] and O. Oms[1]

1 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Valles, Barcelona.
g.bellomarabe.23@abdn.ac.uk
2 Department of Geosciences, University of Aberdeen, Scotland, United Kingdom.
3 Dept. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona.
4 Department of Geosciences, Universitetet i Oslo, Norway.
5 Department of Geology, Texas Christian University, USA.

Palabras clave: Sistemas Fluviales Axiales, Heterogeneidad, Geomodelaje.

Resumen

En este trabajo presentamos el estudio de un cuerpo de areniscas fluviales amalgamado en la Formación Montllobar (Eoceno inferior, Cuenca de Tremp-Graus, Pirineos), basado en un análisis de facies, arquitectura fluvial y correlación estratigráfica complementada con imágenes de dron, junto con un modelado 3D de facies y propiedades de reservorio. La unidad estudiada muestra un patrón multi-histórico con hasta tres rellenos de canal apilados verticalmente, y principalmente compuestos por areniscas de grano grueso a fino. Estas areniscas se apilan y amalgaman para formar complejos de barras de canal medio y lateral, intercaladas con niveles lenticulares de lutita, y localmente capas de conglomerado. Estas características son consistentes con la interpretación de un sistema fluvial axial trenzado con una componente sinuosa, desarrollado durante condiciones de baja acomodación y/o alto aporte sedimentario, con aportes de sedimento grueso de un abanico aluvial transversal. El modelado 3D de la unidad caracteriza la variabilidad de facies, con valores de porosidad, permeabilidad vertical y horizontal basados en análogos de subsuelo del Mar del Norte. La presencia de niveles de lutita da lugar a barreras locales lo que resultaría en una baja conectividad vertical; sin embargo, la migración lateral de los canales y acumulación horizontal de los depósitos de barras facilitarían la conectividad y expansión lateral del fluido en un hipotético reservorio.

Abstract

In this work we present the study of an amalgamated fluvial sandstone body in the Montllobar Formation (Lower Eocene, Tremp-Graus Basin, Pyrenees), based on facies and paleocurrent analysis, fluvial architecture and stratigraphic correlation, complemented by UAV imagery, together with 3D modelling of facies and reservoir properties. The studied unit shows a multi-storey pattern, with up to three vertically stacked channel fills, mainly composed by coarse- to fine-grained sandstones. These sandstones stack and amalgamate forming mid-channel and lateral bars, interbedded with lenticular mudstone levels, and local conglomerate layers. These features are consistent with the interpretation of an axial braided fluvial system with a sinuous component, developed under low accommodation conditions and/or high sedimentary input, with coarse-grained supply from a transverse alluvial fan. 3D modelling of the unit characterises the internal facies variability, with porosity, vertical and horizontal permeability values based on subsurface analogs from the North Sea. The presence of thin mudstone lenses results in local baffles and low vertical connectivity; however, the lateral migration of channels and horizontal accumulation of bar deposits would enhance lateral connectivity and fluid expansion in a hypothetical reservoir.

Análisis Petrofísico de Elementos Arquitecturales – un enfoque basado en una base de datos

Petrophysical Analysis of Architectural Elements – a database approach

G. Bello[1], J. Howell[1] y A. Hartley[1]

1 Department of Geosciences, University of Aberdeen, Scotland, United Kingdom. g.bellomarabe.23@abdn.ac.uk

Palabras clave: Base de datos, Elementos Arquitecturales, Pozos Sintéticos, Afloramientos Virtuales

Resumen

Las facies deposicionales son el control fundamental de las propiedades petrofísicas de los reservorios, acuíferos y depósitos en el subsuelo. Los afloramientos análogos proporcionan información crítica sobre las geometrías y dimensiones de las facies y pueden utilizarse para predecir la distribución de esas propiedades en el subsuelo. Las facies y sus respectivos elementos arquitecturales pueden interpretarse a partir de testigos con un grado de confianza relativamente alto, pero su interpretación a partir de datos de pozo puede resultar más difícil. Dado el coste y la consecuente escasez de testigos, poder interpretar las facies únicamente a partir de datos de pozo de forma fiable y coherente es muy conveniente.

Este estudio afronta este problema creando una base de datos petrofísicos a partir de datos públicos de los sectores británico y noruego del Mar del Norte. La base de datos de Propiedades Petrofísicas de Elementos Arquitecturales (AEP^2) se ha poblado con parámetros de *gamma ray*, resistividad profunda, acústicos, densidad y neutrón, derivados de la interpretación de pozos de subsuelo combinados con interpretaciones de facies de testigos e imágenes de testigos. La base de datos proporciona un registro de respuestas estandarizadas para más de 100 elementos arquitecturales esenciales, los cuales están definidos a partir de todas las formaciones principales de reservorios del Mar del Norte y se encuentran en el estándar de datos del Proyecto SAFARI.

La base de datos se utilizará para entrenar los datos con el objetivo de generar interpretaciones de manera automática, además de actuar como base para la generación de pozos sintéticos a partir de afloramientos y así mejorar la relación entre ejemplos de subsuelo y sus posibles análogos.

Abstract

Depositional facies are the fundamental control on petrophysical properties within subsurface reservoirs, aquifers, and deposits. Outcrop analogues provide critical information on facies geometries and dimensions and can be used to predict the distribution of those properties in the subsurface. Facies and their respective architectural elements can be interpreted from cores with a relatively high degree of confidence, however their interpretation from wireline logs can be more challenging. Given the cost and subsequent scarcity of core material, being able to reliably and consistently interpret facies solely from logs is highly desirable.

This study addresses this problem by building a petrophysical database based on publicly available data from the UK and Norwegian sectors of the North Sea. The Architectural Elements Petrophysical Properties (AEP^2) database has been populated with gamma ray, deep resistivity, sonic and density-neutron parameters derived from the interpretation of subsurface wireline logs combined with facies interpretations of core and core images. The database provides a standardised set of log responses for over 100 key architectural elements defined within the SAFARI Project data standard from all the major North Sea reservoir formations.

The database will be used as training data for automated interpretations of wireline information and as a basis for creating synthetic wireline logs from outcrops, to improve linkage between the subsurface examples and their potential analogues.

El sistema deltaico de Sabiñánigo: un ejemplo de sistema marino-somero tectónicamente controlado con interacción de aporte sedimentario axial y transversal al orógeno (Cuenca de Jaca, Pirineos)

The Sabiñánigo deltaic system: a tectonically-controlled shallow-marine system recording the interaction between orogen axial to transverse sediment supply (Jaca Basin, Pyrenees)

S. Boya[1], M. Poyatos-Moré[1], M. Roigé[1], D. Gómez-Gras[1], J. Fusté[1]

1 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Vallés. salvaboya@gmail.com

Palabras Clave: sedimentación, delta, facies, tectónica, petrología, Pirineos

Resumen

En este trabajo se integra un estudio sedimentológico y estratigráfico junto a la petrología sedimentaria para la reinterpretación paleogeográfica del sistema deltaico de Sabiñánigo (Bartoniense) en la cuenca de Jaca. Los resultados sugieren la coexistencia de dos sistemas sedimentarios. Uno de ellos caracterizado por facies deltaicas proximales junto al anticlinal de Boltaña, y su evolución a facies distales a lo largo del valle del Ara; sus paleocorrientes y composición sugieren un área fuente dominada por rocas de cobertera Mesozoica, ubicada en el sureste de la cuenca. El segundo sistema, que domina en sector de Jaca, está caracterizado por facies de desembocadura, con retrabajamientos mareales locales; sus paleocorrientes y procedencia sugieren un área dominada por depósitos turbidíticos, situada en el noreste de la cuenca. Ambas procedencias convergen en el sector central de Jaca. En este sector, en el flanco norte del anticlinal de Basa domina la procedencia norte a excepción de los niveles mareales, que muestran una mezcla de sedimentos de ambas procedencias, y de los depósitos de plataforma, que muestran procedencia del sureste. En el flanco sur, la procedencia norte se observa en depósitos de lóbulos hiperpícnicos y de plataforma prodeltaica, intercalados con areniscas y limolitas masivas y altamente bioturbadas, que son las facies dominantes. La correlación estratigráfica regional muestra unidades deposicionales de gran escala controladas por la actividad tectónica sin-sedimentaria de los cabalgamientos de Otúria y de Jaca, vinculados al cabalgamiento de Gavarnie, mientras que las secuencias de mayor frecuencia responden a fluctuaciones eustáticas y apilamiento compensacional autocíclico, proporcionando un ejemplo de aplicabilidad de los conceptos de parasecuencias o secuencias de alta frecuencia en sucesiones deltaicas de cuencas tectónicamente activas.

Abstract

This work integrates a sedimentological and stratigraphic study with sedimentary petrology to revisit the paleogeography of the Sabiñánigo deltaic system (Bartonian) in the Jaca Basin. Results suggest the coexistence of two sedimentary systems. One of them is characterized by proximal deltaic facies in the vicinity of the Boltaña anticline, which evolve into distal deposits along the Ara valley; their paleocurrent indicators and composition suggest a source area characterized by Mesozoic cover rocks, located in the southeast of the basin. A second system dominates in the Jaca sector, and it is characterized by mouth bar deposits, with local evidence of tidal reworking; their paleocurrent indicators and provenance suggest a source area characterized by turbidite deposits, located to the northeast of the basin. Both systems converge in the Jaca sector. In the northern flank of the Basa anticline, the northern provenance dominates, except in the tidally-influenced deposits, which show a mix of sediments from both provenances and in the shelf deposit, which show a southeast provenace. In the southern flank, the northern source signal is observed in hyperpycnal lobes and prodeltaic shelf deposits, which alternate with massive and highly bioturbated sandstones and siltstones, which are the dominant facies. The regional stratigraphic correlation shows large-scale depositional units controlled by the syn-sedimentary tectonic activity of the Otúria and Jaca thrusts, both linked to the regional Gavarnie thrust sheet, whereas the higher frequency sequences are associated with eustatic fluctuations and autogenic compensational stacking, providing an example to test the applicability of the concepts of parasequence or high-frequency sequences in deltaic successions from tectonically-active basins.

Ciclicidad climática durante el Albiense medio – Cenomaniense temprano: desarrollo de paleosuelos de clima húmedo en sistemas deposicionales áridos.

Mid-Albian – earliest Cenomanian climate cyclicity: development of humid palaeosoils in arid depositional systems (Utrillas Group, Eastern Iberia)

C.A. Bueno-Cebollada[a] *, R. de la Horra[b], J.F. Barrenechea[c], N. Meléndez[b], E. Barrón[a], M. Fregenal-Martínez[b]

[a] Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CN IGME-CSIC), c/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid (Spain).
[b] Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, c/ José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid (Spain)
[c] Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, c/ José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid (Spain)

Palabras clave: Albiense, Paleoclima, Este de Iberia, Serranía de Cuenca, Grupo Utrillas

Resumen

Se ha llevado a cabo un estudio sedimentológico y paleoedafológico del Albiense medio – Cenomaniense temprano (Grupo Utrillas) en el área de la Serranía de Cuenca (este de Iberia) con el objetivo de ahondar en el conocimiento del paleoclima de este intervalo. El análisis sedimentológico ha permitido identificar cuatro asociaciones de facies que reflejan el desarrollo de un sistema de braidplain bajo condiciones climáticas predominantemente áridas en un contexto transgresivo. Por el contrario, el estudio de paleoedafológico, realizado a través de diferentes técnicas, indica la existencia de periodos de mayor humedad en la cuenca sedimentaria durante el depósito de la sucesión estudiada, los cuales se caracterizaron por un clima de tipo sabana tropical. Se propone un modelo paleoclimático que explica de las oscilaciones entre un clima árido predominante y períodos estacionalmente húmedos basándose en el desplazamiento latitudinal de los cinturones climáticos durante el Cretácico medio, proporcionando nuevos datos paleoclimáticos sobre el intervalo Albiense medio – Cenomaniense temprano en Iberia.

Abstract

A combined sedimentological and paleosol study of the mid-Albian – earliest Cenomanian Utrillas Group in the Cuenca Basin (Eastern Iberia) has been conducted to improve knowledge on palaeoclimate. The sedimentological analysis has permitted the identification of four facies associations, which reflect the development of a braidplain system under dominantly arid climate conditions in a transgressive setting. Conversely, the multi-proxy paleosol analyses conducted indicate that periods of increased humidity, characterised by a tropical savanna climate, occurred in the basin during the deposit of the studied succession. We propose a palaeoclimatic model that accounts for the oscillations between the prevailing arid climate and seasonally humid periods based on the latitudinal shifting of the mid-Cretaceous climate belts, providing new palaeoclimatic implications about the mid-Albian – earliest Cenomanian interval.

Referencias

Bueno-Cebollada, C.A., De la Horra, R., Barrenechea, J.F., Fregenal-Martínez, M.A., Barrón, E., Meléndez, N. (2023). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 626, 111701.

Episodios de cambio ambiental acelerado durante el Evento Anóxico Oceánico del Aptiense (OAE 1a) – registro de una cuenca pelágica en el Tethys occidental

Episodes of accelerated environmental change during the early Aptian OAE 1a – insights from a pelagic basin from the western Tethys

J.M. Castro[1], C. Sequero[2], M.L. Quijano[3], G.A. de Gea[1], R. Aguado[1], B.D.A. Naafs[4] y R.D. Pancost[4]

1 Departamento de Geología y CEACTEMA, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, E-23071 Jaén, España
2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense, Madrid, España
3 Departamento de Química Orgánica e Inorgánica y CEACTEMA, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, E-23071 Jaén, España
4 Organic Geochemistry Unit, The Cabot Institute, School of Chemistry, University of Bristol, BS8 1TS, UK

Palabras clave: Aptiense, OAE 1a, Geoquímica, Cambios Ambientales.

Resumen

El Evento Anóxico Oceánico del Aptiense inferior (OAE 1a, 120 Ma) representa una perturbación importante en el ciclo global del carbono asociada con una entrada de carbono ligero al sistema climático, procedente de fuentes volcánicas y/o metanogénicas, que provocó importantes cambios ambientales, bióticos y sedimentarios. El registro global de este evento es una excursión en los valores isotópicos de carbono (CIE), que se correlaciona con el depósito generalizado de materia orgánica en las principales cuencas oceánicas (Castro *et al.*, 2021). En este trabajo integramos datos de geoquímica orgánica y elemental con estratigrafía de isótopos C, de una sucesión pelágica con registro del OAE 1a, La Frontera (cuenca subbética, SE de España), con el fin de discutir los efectos relativos de las variaciones en los aportes terrestres, la productividad primaria y el grado de oxigenación de las aguas marinas durante y después de la OAE 1a (Aguado *et al.*, 2014). Esta sección se correlaciona y compara con un registro equivalente de una sucesión cercana depositada en un contexto paleogeográfico ligeramente diferente (sección de Carbonero, Castro *et al.*, 2019), para discutir el papel relativo de los factores locales y globales sobre la señal geoquímica.

Abstract

The early Aptian Oceanic Anoxic Event (OAE 1a, 120 Ma) represents a major perturbation in the global carbon cycle associated with a light-carbon input into the climate system, from volcanogenic and/or methanogenic sources, originating significant environmental, biotic and sedimentary changes. The global signature of this event is a carbon stable isotope excursion (CIE), which correlates with the widespread massive accumulation of organic matter in all major ocean basins (Castro et al., 2021). Here, we combine new biomarker and elemental data with published high-resolution C-isotope stratigraphy, TOC content and biostratigraphy from an early Aptian pelagic succession in the western Tethys, La Frontera section (Subbetic basin, SE Spain), in order to provide new insights into the relative roles of variations in terrestrial inputs, primary productivity and degree of oxygenation of marine waters during and after the OAE 1a (Aguado et al., 2014). This section is further correlated and compared with an equivalent record from a nearby succession deposited on a slightly different palaeogeographic context (Carbonero section, Castro et al., 2019), in order to discuss the relative roles of the local vs. global controls on the geochemical signal.

Referencias

Aguado, R., et al. (2014). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 395, 198-221.
Castro, J.M., et al. (2019) *Global and planetary change* 183, 103030.
Castro, J.M., et al. (2021). *Paleoceanography and Paleoclimatology* 36, e2020PA004004.

Episodios de cambio ambiental acelerado en el Barremiense superior: registro geoquímico y paleontológico

Episodes of accelerated environmental change in the late Barremian: Geochemical and paleontological record

G.A. de Gea[1*], R. Aguado[1†], M. Company[2], J. M. Castro[1], L. O'Dogherty[3], J. Sandoval[2], M.L. Quijano[4], C. Sequero[5], S. Froehner[6] y M. Martinez[7]

1 Dpto. Geología y CEACTEMA, Universidad de Jaén. 23071 Jaén. *gadegea@ujaen.es, jmcastro@ujaen.es
2 Dpto. Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada. 18002 Granada. mcompany@ugr.es, sandoval@ugr.es
3 Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, CASEM. 11510 Puerto Real. luis.odogherty@uca.es
4 Dpto. Química Inorgánica y Orgánica y CEACTEMA, Universidad de Jaén. 23071 Jaén. lquijano@ujaen.es
5 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid. csequero@ucm.es
6 Dpto. Ingeniería Ambiental, Universidad Federal de Paraná. 81531-980 Curitiba, Brasil. froehner@ufpr.br
7 Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France. mathieu.martinez@univ-rennes1.fr

Resumen: Se estudian dos episodios de cambio ambiental acelerado (Episodio Taxy) en el Barremiense superior de varias secciones de la Cuenca Subbética. Dicho estudio ha consistido en un análisis cuantitativo de alta resolución de las asociaciones de nanofósiles, lo que ha permitido incrementar la resolución bioestratigráfica y establecer las condiciones paleoambientales asociadas al Episodio Taxy. Dentro de este episodio se han identificado dos perturbaciones en el ciclo del C y O, denominadas IFeNE (Intra-Feradianus) e ISNE (Intra-Sarasini), en relación con las cuales se han detectado importantes cambios ambientales y bióticos. El análisis combinado de los nanofósiles, isótopos de C y O, elementos mayoritarios y traza y los biomarcadores indican sendos calentamientos que tuvieron como resultado la aceleración del ciclo hidrológico, con el consiguiente aumento de aportes continentales y el incremento de la fertilización de las aguas superficiales. El origen el Episodio Taxy (IFeNE e ISNE) ha sido relacionado con factores orbitales (ciclos de gran excentricidad) y con el inicio de las fases tempranas del volcanismo en el Plateau Ontong Java.

Palabras clave: Nanofósiles calcáreos, Barremiense superior, Episodio Taxy, Cambios ambientales

Abstract: *Two episodes of accelerated environmental change (Taxy Episode) are studied in the upper Barremian of several sections of the Subbetic Basin. A high-resolution quantitative study of nannofossil assemblages has been carried out, which has provided an increase in biostratigraphic resolution and served to establish the paleoenvironmental conditions associated with the Taxy Episode. Two disturbances have been identified in the C and O cycle, named IFeNE (Intra-Feradianus) and ISNE (Intra-Sarasini), in relation to which important environmental and biotic changes have been detected. The combined analysis of nannofossils, C and O isotopes, major and trace elements, and biomarkers indicate two warming episodes during each disturbance that resulted in the acceleration of the hydrological cycle, with the consequent increase in continental inputs and the enhance in fertilization of surface waters. The origin of the Taxy Episode (IFeNE and ISNE) has been related to orbital factors (long eccentricity cycles) and to the beginning of the early phases of volcanism in the Ontong Java Plateau.*

Key words: *Calcareous Nannofossils, Upper Barremian, Taxy Episode, Environment changes*

INTRODUCCIÓN

El Cretácico inferior está marcado por breves episodios con notables cambios paleoceanográficos y paleoambientales ligados a importantes perturbaciones en el ciclo del carbono, las cuales normalmente han sido asociadas con Eventos Anóxicos Oceánicos (OAEs). Sin embargo, no todas las perturbaciones globales del ciclo del carbono y que generaron cambios ambientales acelerados estuvieron, de modo generalizado, asociadas al desarrollo de anoxia/disoxia en los océanos y, por tanto, al depósito masivo de sedimentos ricos en materia orgánica (*black shales*). Por este motivo, Fölmi (2012) introdujo el concepto de "Episodios de Cambio Ambiental" (ECCs) para describir, entre otros, los cambios ambientales acelerados ocurridos en el Cretácico. Dichos ECCs están caracterizados por unas condiciones ambientales y climáticas de efecto invernadero que afectaron a la biota marina y que dejaron su impronta geoquímica en el registro sedimentario. Las causas más aceptadas para interpretar estos ECCs son las elevadas temperaturas globales, ligadas a aumentos en la concentración de gases de efecto invernadero de origen volcanogenético (Erba et al., 2015), en concreto, coincidiendo con las fases tempranas del vulcanismo asociado a la formación del Plateau Ontong-Java (Charbonnier et al., 2018). Más recientemente, Martinez et al. (2023) señalan que varios de los ECCs del Cretácico

inferior podrían estar controlados por ciclos orbitales, en concreto, por el denominado "periodo de gran excentricidad" de la órbita terrestre (2,5 Ma de promedio).

En este trabajo presentamos las evidencias geoquímicas y bióticas de dos ECCs registrados en el Barremiense superior de varias sucesiones pelágicas de calizas margosas y margas del Dominio Subbético (Cordillera Bética). Se aportan nuevos datos geoquímicos (isótopos del C y O, elementos mayores y traza y biomarcadores) y paleontológicos para las secciones de Barranco Cavila (X.Kv2), Río Argos (X.Ag6), Cortijo del Hielo (X.HA), y La Frontera (X.F) (Fig. 1), que, en conjunto, cubren el intervalo entre la Subzona de *Gerhardtia provincialis* y la Zona de *Deshayesites forbesi* de ammonites, y las biozonas NC5E y NC6A y de nanofósiles calcáreos, propias del Barremiense superior y Aptiense inferior. El objetivo es analizar la evolución de las condiciones climáticas y ambientales, y sus efectos sobre la biota marina, durante los episodios de cambio ambiental acelerado del Barremiense superior, representados por dos excursiones negativas en las curvas de los isótopos del carbono: "Excursión Negativa Intra-Ferradianus" (IFeNE) y la "Excursión Negativa Intra-Sarasini" (ISNE), ambas incluidas en el episodio de cambio ambiental "Episodio Taxy" (Fölmi, 2012, Aguado et al., 2022).

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio paleontológico está basado en ammonites, radiolarios, foraminíferos plantónicos y, principalmente, en nanofósiles calcáreos (Aguado et al., 2022). En el

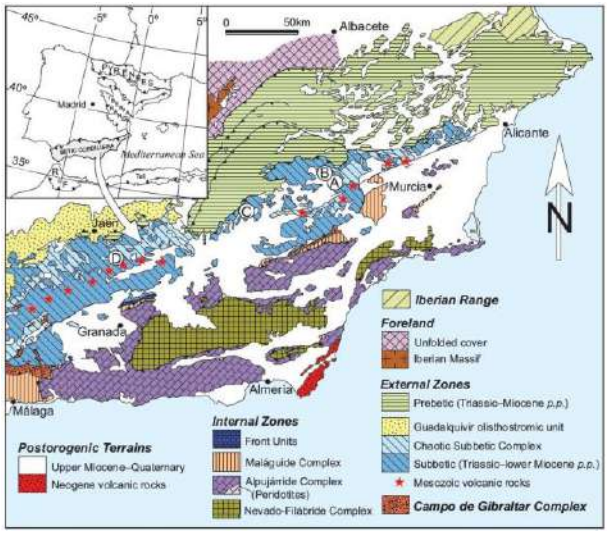


FIGURA 1. *Mapa geológico de la Cordillera Bética con la localización de las secciones estudiadas. A) Barranco de Cavila (X.Kv2). B) Río Argos-6 (X.Ag6). C. Cortijo del Hielo (H.HA). D) La Frontera (X.F.).*

estudio bioestratigráfico en las secciones X.Kv2, X.Ag6 y X.HA se correlacionaron directamente las biozonas de ammonites y nanofósiles calcáreos, mientras que en la sección X.F la correlación se llevó a cabo con los foraminíferos planctónicos. Para determinar las condiciones paleoambientales asociadas a los ECCs se ha realizado un estudio cuantitativo de los nanofósiles calcáreos. Para ello, se prepararon frotis utilizando la técnica de decantación de Geisen et al. (1999) y de cada muestra se contaron un mínimo de 700 especímenes, lo que garantiza que todas las especies con una abundancia superior al 1% han sido registradas. La abundancia relativa de cada taxón se ha expresado como un porcentaje del número total de nanofósiles contados en cada frotis. Se han llevado a cabo agrupaciones de taxones de nannofósiles para establecer la evolución de las condiciones paleoceanográficas. Igualmente se tomaron muestras de roca total, en todas las secciones, para determinar las curvas isotópicas del C y O y obtener una mejor definición de los límites de los dos ECCs. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Geociencias de la Universidad Complutense. Además, se realizaron análisis de elementos mayores y traza, en el Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada (CIC-UGR) y de biomarcadores, en el Centro de Instrumentación Científica y Técnica de la Universidad de Jaén (CICT-UJA), para determinar variaciones en la productividad, entrada continental y condiciones ambientales redox.

RESULTADOS

La bioestratigrafía está basada en el trabajo de Aguado et al. (2022), quienes incrementan la resolución de la escala bioestratigráfica basada en nanofósiles calcáreos para el tránsito Barremiense-Aptiense. En este trabajo se identifica una secuencia sucesiva de bioeventos en los nanofósiles que permiten subdividir las biozonas NC5E y NC6A en varias nuevas subzonas (Fig. 2), las cuales se correlacionaron con la zonación estándar de ammonites, foraminíferos planctónicos y radiolarios.

Los datos geoquímicos muestran dos excursiones negativas en las curvas del $\delta^{13}C$ y $\delta^{18}O$, la primera de dentro de la subzona de *Hemihoplites feraudianus* de ammonites y en la base de la Subzona NC6A1 de nanofósiles (IFeNE) y la segunda en la parte media y superior de la Zona de *Martelites sarasini* de ammonites y en la parte final de la Subzona NC6A1 y base de la biozona NC6A2 de nanofósiles (ISNE) (Fig. 2). Ambas excursiones se sitúan dentro del Barremiense superior y se corresponderían con el Episodio Taxy (Fölmi, 2012, Aguado et al., 2022). La primera representaría un nuevo EEC registrado en la cuenca pelágica del paleomargen sudibérico. Según Martinez et al. (2023), la calibración mediante astrocronología permite asignar al Episodio Taxy una duración de 1,31 Ma (incluyendo IFeNE e ISNE).

El estudio cuantitativo de alta resolución de las asociaciones de nanofósiles en torno al Episodio Taxy ha permitido identificar, en relación con los nannocónidos, los biohorizontes de su "declive" (ND) y el de "canal ancho>canal estrecho (wc>nc), los cuales se han calibrado por primera vez con la zonación estándar de ammonites para el Mediterráneo (Fig. 2). El declive de los nanocónidos a lo largo del Barremiense superior afectó principalmente al grupo de los nannoconus de canal estrecho (nc), lo que se interpreta como un deterioro en las condiciones de vida en la zona fótica inferior, el cual se produjo en dos pasos, coincidiendo

con el IFeNE y el ISNE (Fig.2). Además, los aumentos registrados en la abundancia *Rhagodiscus asper*, concomitante con el inicio de los eventos ND y wc>nc y con las excursiones negativas de los isótopos del C y O revelan significativas variaciones en las condiciones ambientales durante el depósito del intervalo estudiado. En concreto, apuntan a un incremento sustancial de la temperatura superficial de las aguas oceánicas.

El análisis elemental realizado en las secciones X.Ag6, X.Kv2 y X.HA a lo largo del Episodio Taxy (incluyendo IFeNE e ISNE) revela incrementos en los indicadores de aportes fluviales y eólicos (relaciones Mg/Al, K/Al y Zr/Al) (Fig.3). Además, los indicadores redox (U/Th, Ni/Co, V/Cr y V/Sc) indican condiciones generales de buena oxigenación en el fondo marino, a pesar de que la excursión IFeNE, en la sección X.Ag6, presenta una cantidad de materia orgánica relativamente elevada (TOC: 1,6% wt). En cuanto a los indicadores de productividad (Ba/Ca y P/Ca) se constata un cierto incremento en ambos episodios, aunque mejor definido en la IFeNE (Fig.3).

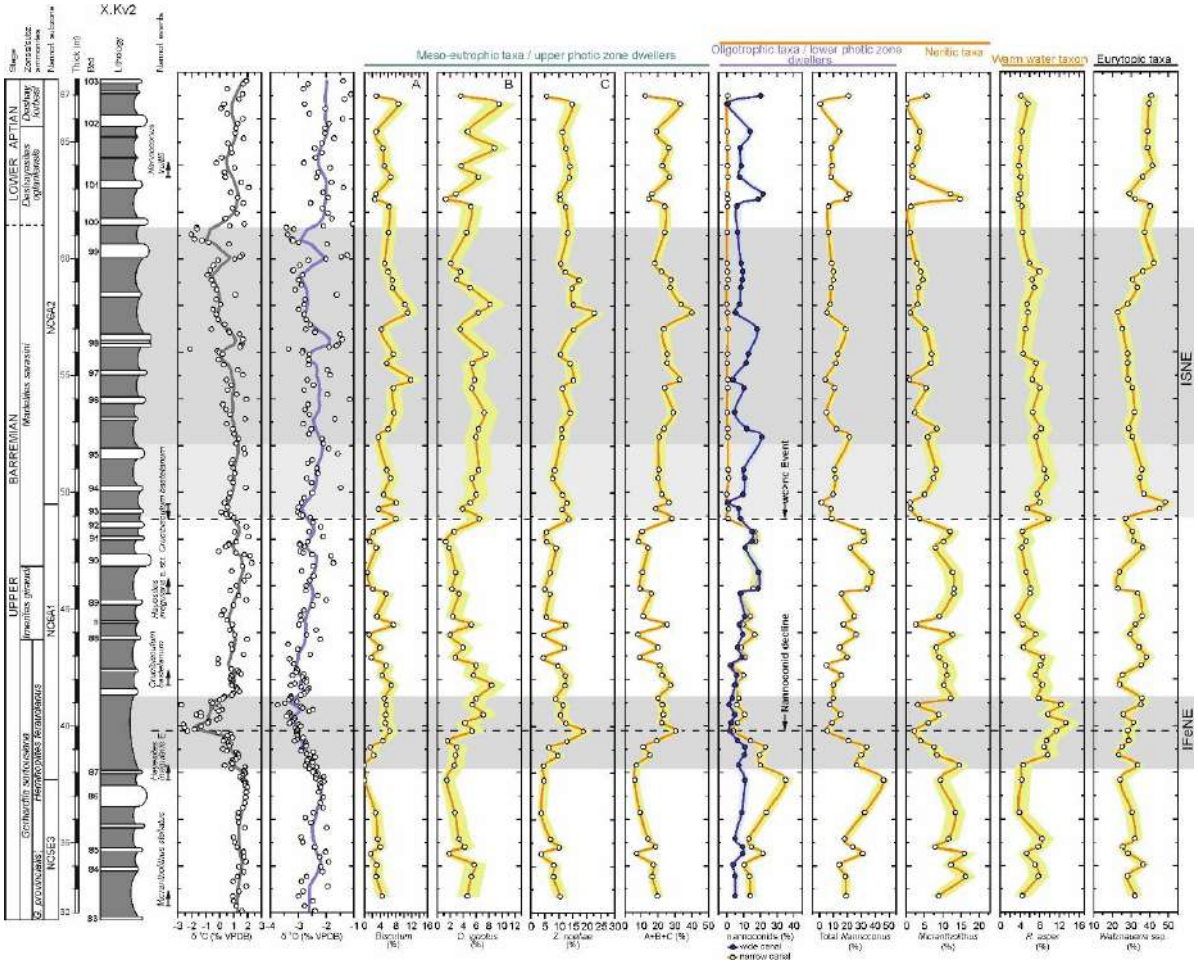


FIGURA 2. *Sección de Barranco Cavila (X.Kv2 con la bioestratigrafía de ammonites y nanofósiles, la curva de isótopos de C y O y los resultados del análisis cuantitativo de alta resolución de las asociaciones de nanofósiles.*

Las asociaciones de biomarcadores obtenidos en la sección X.Ag6, correspondientes a la IFeNE muestran aumentos en la proporción de esteranos C29/(C27+C28) y dominio de los *n*-alcanos de alto peso molecular, lo que indica una fuente continental importante de aporte de materia orgánica, con una contribución menor de fuentes marinas (Fig.3). Además, la relación esteranos/hopanos sugiere una mayor contribución de las algas en comparación con las bacterias (Fig.3). En las secciones XKv2 y X.HA no se han podido obtener datos de biomarcadores debido al bajo contenido de materia orgánica del sedimento.

DISCUSIÓN

El estudio de alta resolución de las asociaciones de nanofósiles y el incremento en la resolución de las curvas de los isótopos de C y O en las secciones X.Kv2, X.Ag6, X.HA y X.F, ha permitido datar con precisión los episodios de cambio ambiental IFeNE (Fig. 3) e ISNE (Fig.2) y determinar su duración (Aguado et al., 2022 y Martinez et al., 2023). Además, se ha determinado el índice de nutrientes (IN) y el índice de temperatura (IT), y su evolución se ha integrado con los datos de elementos mayoritarios y traza y de biomarcadores, para tratar de establecer la evolución de las condiciones paleoambientales imperantes durante cada uno de los episodios de cambio ambiental acelerado. El aumento neto en el IN en relación con la IFeNE e INSE se interpreta como incrementos en la productividad de las aguas superficiales que, además, son concomitantes con cambios sustanciales en las proporciones de nannoconus de canal ancho y de canal estrecho (moradores de la parte inferior de la zona fótica). Se ha constatado que la IFeNE coincide con el inicio del "declive" de los nannoconus (ND) y la ISNE con la crisis de los nannoconus o

"nannoconid crisis" (NC). Estos resultados son sumamente relevantes y novedosos, ya que sitúan por primera vez el biohorizonte NC "nannoconid crisis" en la Zona de *Matelites sarasini* de ammonites del Barremiense terminal, coincidiendo con la ISNE, a diferencia de las secciones italianas, en las que tradicionalmente se sitúa 0,5 m por debajo de la base del Evento Anóxico Oceánico del Aptiense inferior (OAE1a) (Erba et al 2015).

Los datos de los indicadores IT, isótopos del oxígeno, análisis de elementos mayoritarios y traza y biomarcadores son coherentes con el desarrollo de dos episodios de incremento de temperaturas (cambios climáticos), coincidentes con la IFeNE e ISNE, que provocaron un incremento en las tasas de meteorización de las aguas continentales de las áreas adyacentes a las zonas de estudio, reactivando el ciclo hidrológico y dando lugar a aumentos en las tasas de aportes continentales al océano, que favorecieron la fertilización de las aguas superficiales (incremento del indicador IN). Esto conllevaría el deterioro en las condiciones de vida en la zona fótica inferior (afectando a los nannoconus), dando lugar al ND y NC. El incremento en los aportes continentales, junto con el aumento de la productividad en las aguas superficiales, favorecieron el enterramiento de materia orgánica y el secuestro de carbono orgánico ligero en los sedimentos, dando lugar a las excursiones negativas del $\delta^{13}C$ asociadas a la IFeNE e ISNE. Ambos EECs (IFeNE e ISNE) son interpretados por la mayoría de los autores (e.g., Föllmi, 2012; Charbonnier et al., 2018) como la respuesta del Sistema Tierra a los cambios relacionados con el incremento de CO_2 de origen volcanogenético, probablemente ligado con las etapas iniciales del vulcanismo submarino en el Plateau de Ontong-Java, en el Pacífico, y cuyas fases principales desembocaron en el desarrollo de uno de los OAEs más importantes dentro del Mesozoico: el OAE 1a.

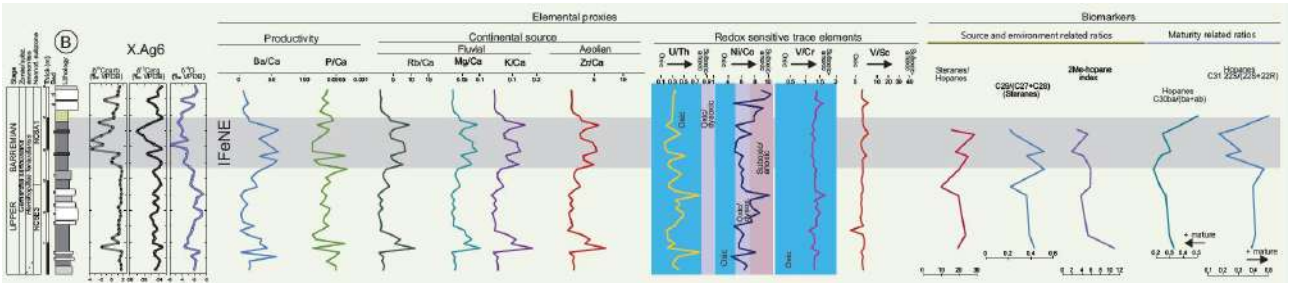


FIGURA 3. *Sección del Río Argos (X.Ag6) con las curvas de los isótopos del C y O, los indicadores del análisis elemental y los biomarcadores.*

CONCLUSIONES

Las excursiones negativas en los isótopos de C y O, las perturbaciones registradas en las asociaciones de nanofósiles y el enriquecimiento de los elementos traza y biomarcadores en varias secciones de la Cuenca Subbética (secciones X.Kv2, X.Ag6, X.HA y X.F) apuntan, colectivamente, a alteraciones climáticas asociadas a una reactivación del ciclo hidrológico relacionado con episodios de calentamiento durante el Episodio Taxy (que incluye la IFeNe e ISNE) y el incremento de la productividad orgánica en las aguas superficiales. Las edades de estas perturbaciones (~122,4 y ~122 Ma), según se deduce de la astrocronología (Martinez et al, 2023), son compatibles con las fases tempranas del vulcanismo del Plateau Ontong-Java.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución del proyecto P20_00783 (http://www.eecba.es/index.htm), financiado por la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades de la Junta de Andalucía, y de los Grupos de Investigación RNM-200 y RNM-178. Este trabajo está dedicado a la memoria de nuestro compañero Roque Aguado Merlo cuya bondad y sabiduría dejaron una marca imborrable en cada uno de nosotros.

REFERENCIAS

Aguado, R., Company, M., O'Dogherty, L., Sandoval, J. y Martinez, M. (2022): New insights into the Barremian–lower Aptian calcareous nannofossils of the Mediterranean Tethys: Chronostratigraphic and paleobiogeographic implications. *Marine Micropaleontology* 173, 102114.

Charbonnier, G., Godet, A., Bodin, S., Adatte, T., Föllmi, K.B. (2018): Mercury anomalies, volcanic pulses, and drowning episodes along the northern Tethyan margin during the latest Hauterivian-earliest Aptian. *Palaeo3*, 505, 337-350.

Erba, E., Duncan, R. A., Bottini, C., Tiraboschi, D., Weissert, H., Jenkyns, H. C. y Malinverno, A. (2015): Environmental consequences of Ontong-Java Plateau and Kerguelen Plateau volcanism. In: *The origin, evolution, and environmental impact of oceanic large igneous provinces* (C. R. Neal, W. W. Sager, eds.). Geological Society of America, 511, 271-303.

Föllmi, K.B. (2012): Early cretaceous life, climate and anoxia. *Cretaceous Research*, 35, 230-257.

Geisen, M., Bollmann, J., Herrle, J.O, Mutterlose, J. y Young, J.R. (1999). Calibration of the random settling technique for calculation of absolute abundances of calcareous nannoplankton. *Micropaleontology* 45, 437-442.

Martinez, M., Aguirre-Urreta, B., Dera, G., Lescano, M., Omarini, J., Tunik, M., O'Dogherty, L., Aguado, R., Company, M. y Bodin, S. (2023): Synchrony of carbon cycle fluctuations, volcanism and orbital forcing during the Early Cretaceous. *Earth-Science Reviews*, 239, 104356.

La estructura de la Hoya del Prado, Sierra de Javalambre, Teruel: Una caldera volcánica de colapso jurásica.

The structure of the Hoya del Prado, Sierra de Javalambre, Teruel: A Jurassic volcanic caldera of collapse.

C. de Santisteban Bové[1]* y A. Ramos Ordoño[2]

1 La Torre de Portacoeli, 282, 46118 – Serra, València. Carlos.santisteban@uv.es
2 Universidad de Alicante, Dpto de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante, España. Adria.ramos@ua.es

Resumen: La estructura de la Hoya del Prado es una depresión en materiales carbonáticos situada en la cumbre de la Sierra de Javalambre (Teruel). Tradicionalmente ha sido considerada una dolina de gran tamaño por hallarse en una zona karstificada; sin embargo, su interior contiene materiales volcánosedimentarios, además de restos de carbonatos marinos jurásicos. Está emplazada en el centro de un domo y es una depresión circular de 240 metros de profundidad y hasta 2 km 400 metros de periferia. Está estructurada en materiales jurásicos a favor de dos sistemas de fracturas: unas radiales y otras en arco y dispuestas en círculo. Hay evidencias que ambas fracturas actuaron como conductos volcánicos que facilitaron la descompresión de una cámara magmática y su colapso. En este sentido la estructura de la Hoya del Prado es una caldera volcánica jurásica desarrollada en el límite Jurásico Inferior – Jurásico Superior.

Palabras clave: Caldera Volcánica, Límite jurásico Inferior – Superior, Morfología relicta resurgida, Provincia de Teruel.

Abstract: *The structure of the Hoya del Prado is a depression in carbonatic materials located on the summit of the Sierra de Javalambre (Teruel). It has traditionally been considered a large doline because it is in a karstified area; however, its interior contains pyroclastic materials as well as remnants of Jurassic marine carbonates. It is located in the center of a dome and is a circular depression 240 meters deep and up to 2 km 400 meters periphery It is structured in Jurassic materials in favor of two systems of fractures: some radial and some arched and arranged in a circle. There is evidence that both fractures acted as volcanic conduits that facilitated the decompression of a magmatic chamber and its collapse. In this sense the structure of the Hoya del Prado is a Jurassic volcanic caldera developed in the Lower - Upper Jurassic boundary.*

Key words: *Volcanic caldera, Lower – upper Jurassic boundary, relic morphology, Teruel Province.*

INTRODUCCIÓN

La estructura de la Hoya del Prado es una depresión morfológica de planta circular situada en la cima de la Sierra de Javalambre, Sur de la provincia de Teruel. Esta sierra contiene la cumbre más alta del sector suroriental de los relieves montañosos de la Rama Castellana del Sistema Ibérico. Esta estructura está un macizo calcáreo karstificado con numerosas dolinas (Gutiérrez y Peña, 1975), algunas son de grandes dimensiones y tal vez por ello esta estructura ha sido identificada con una de ellas (Abril et al., 1978). Sin embargo, esta estructura está emplazada en el límite Jurásico Inferior – Jurásico Medio e implicada en una discordancia de extensión regional con evidencias de tectónica y volcanismo. Martínez-González *et al. (*1997) atribuyen al intervalo jurásico con manifestaciones volcánicas en esta zona una edad Toarciense- Bajociense,

El volcanismo jurásico en la Rama Castellana del Sistema Ibérico forma parte de una provincia volcánica jurásica que se extiende desde Llíria (Valencia) hasta la Sierra de Javalambre (Teruel). Está formado por centenares de afloramientos volcánicos, la mayor parte no cartografiados y que representan gran número de lugares donde se produjeron erupciones volcánicas en un ambiente de plataforma marina somera. La más numerosa concentración de estos afloramientos está en el entorno de la cima del Javalambre en donde se halla la estructura volcánica de mayores dimensiones. Valenzuela-Ríos *et. al.* (1996) citan en esta zona un espesor de materiales piroclásticos de hasta 120 metros. En el presente trabajo analizamos esta estructura volcánica a la que suponemos que se trata de una caldera de colapso.

SITUACIÓN GEOLÓGICA

La Sierra de Javalambre está formada por un macizo calcáreo de materiales jurásicos resto del denominado "Macizo Valenciano" umbral paleogeográfico que separó las subcuencas cretácicas de Peñagolosa e Íbero-Levantina, emergido a final del Jurásico. Está subdividido por una franja E-W de afloramientos triásicos, a lo largo del corredor de Manzanera a Arcos de Las Salinas, en dos sectores: Javalambre y La Salada. El Javalambre es un gran domo estructural de más de cerca de 18 km^2 de superficie en cuyo centro se halla la estructura de la Hoya del Prado. Este domo está fracturado en dos sistemas de fallas de orientación NE-SW y NW-SE, las cuales se cruzan en la zona de estudio. Estas fracturas quedan enmascaradas en una depresión morfológica circular en materiales jurásicos en donde hay otros dos tipos de fracturas: a) un sistema de fallas radiales a partir del centro de la Hoya del Prado y b) un conjunto de fallas en arco periféricas alrededor de esta estructura (Fig. 1), Estas fracturas son anteriores a las NE-SW y NW-SE ya que se hallan parcialmente fosilizadas por materiales piroclásticos y éstos intercalados entre carbonatos jurásicos.



FIGURA 1. Imagen de Google Earth de la estructura de la Hoya del Prado.
FIGURE 1. Google Earth image of the structure of the Hoya del Prado.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA HOYA DEL PRADO

La Hoya del Prado es una estructura de circular de forma troncocónica y escalonada invertida con fondo plano. El diámetro inferior es de 800 metros y el superior alcanza los 2 km 400 m. Todo el fondo está ocupado por materiales piroclásticos Esa depresión tiene 240 metros de profundidad y estuvo rellena por materiales piroclásticos en algunas zonas intercalados por carbonatos marinos (Fig. 3)

Las paredes interiores están formadas por dos anillos escalonados de bloques de carbonatos. Estos bloques están delimitados tanto por las fracturas radiales como por las fallas tangenciales en arco (Figs. 3 y 4). El borde superior de la Hoya del Prado consiste en una unidad discordante tanto sobre los carbonatos fracturados como sobre material volcánico, Tiene una disposición ligeramente inclinada con un sentido de buzamiento externo y periférico. Por estas características se han definido tres zonas morfológicas: Rolde, anfiteatro y corona.

EL ROLDE

El Rolde es una nona plana limitada por calizas de jurásicas con las cuales tiene un contacto neto y formado por planos de fractura. Los materiales que afloran en él son en su mayoría volcánicos que contienen localmente cantos de calizas eyectados recristalizados. En el sector sureste de esta zona hay desarrollado un suelo de alteración de los materiales volcánicos, mientras que a partir de la Fuente del Prado sobre este suelo hay desarrollado un tremedal (Figura 4).

ANFITEATRO

El anfiteatro es la parte más extensa de la estructura. Forma un anillo interior en pendiente, desde la cota 1.780 hasta la 1.940. Presenta dos escalones que responden a dos anillos de bloques descendidos a favor de las fallas en arco. Estas fallas han estructurado semifosas identificables por sus rellenos de piroclastos ya que fueron conductos eruptivos (Figs. 3 y 4). También es en esta zona en donde mejor se reconocen las fallas radiales, alguna de las cuales se abren en abanico hacia la corona, para desarrollar pequeñas fosas (Fig. 3d). El contacto del graderío con los materiales del rolde suele estar tectonizado, intensamente diaclasado (Fig. 3b), térmicamente alterado, y con paredes verticales. El contacto del relleno de piroclastos con la superficie del graderío muestra en algunas zonas que se trata de un relieve deposicional original, e incluso se ha conservado un deslizamiento gravitacional sindeposicional que fue enterrado (Fig. 3c). Las capas de carbonatos del anfiteatro buzan en sentido periférico de forma centrífuga. Su emplazamiento actual tuvo lugar durante la formación de la estructura conservándose en alguno de los bloques discordancias intraformacionales.



FIGURA 2. Imagen de la pendiente del anfiteatro con su estructura escalonada.
FIGURE 2. Image of the slope of the amphitheater with its staggered structure.

Fosilizando el graderío aún se encuentran restos materiales piroclásticos sobre los que se hallan un nivel

de carbonatos en disposición horizontal (Fig. 3e). Esto indica que posteriormente a la formación de la depresión ésta fue al menos parcialmente colmatada convirtiéndose en una pequeña cuenca sedimentaria.

CORONA

La corona es la parte superior de la estructura de la Hoya del Prado. Constituye un anillo en el que están las cumbres más altas de la zona a partir de la cota 1940. Está formada por una unidad de calizas discordante que cubrió completamente la estructura y dispuesta solapante sobre los materiales anteriores. Sus capas buzan externamente de forma periférica y solapan un paleo-relieve. El relleno sedimentario que debió ocupar el interior de la Hoya del Prado tuvo que alcanzar hasta la corona un espesor de 240 metros.

CONSIDERACIONES

La estructura descrita, en su conjunto, se corresponde, por el conjunto de sus materiales fracturas y rasgos morfológicos a una caldera volcánica de colapso. Se pueden reconocer en su desarrollo cuatro estadios: 1- depósito de los carbonatos pre-caldera, 2) abombamiento por la presión de una cámara magmática inferior con distensión en la bóveda, 3-distensión y fracturas en arco y radiales (fosas y semifosas), 4- Volcanismo, descompresión magmática interior y colapso, 5- Relleno de la caldera con piroclastos y calizas marina, 5- fosilización por depósitos de carbonatos del Jurásico Superior.

La situación actual se corresponde con el resurgimiento de rasgos morfológicos originales debido a la erosión. Teniendo en cuenta que se trata de una estructura poco común en carbonatos y de edad jurásica constituye un elemento relevante del patrimonio geológico con interés estratigráfico, petrológico y tectónico.

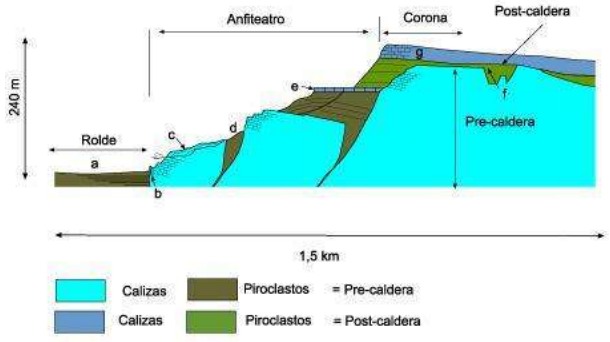


FIGURA 3. *Esquema sintético de las estructuras del margen de la Hoya del Prado.*
FIGURE 3. Synthetic scheme of the structures of the margin of the Hoya del Prado.

CONCLUSIONES

La estructura de la Hoya del Prado es una formación intrajurásica desarrollada en el límite Jurásico Inferior – Jurásico Medio y correlacionable con el estadio de y fracturación y volcanismo en la plataforma del margen Sur del Surco Ibérico. Sus rasgos morfológicos, tipo de materiales y estructura responden a una caldera volcánica de colapso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto “Extensión tectónica cenozoica en el margen suroeste del Surco de Valencia (EXTECESUVA)” (2023/00651/001) financiado por la Generalitat Valenciana.

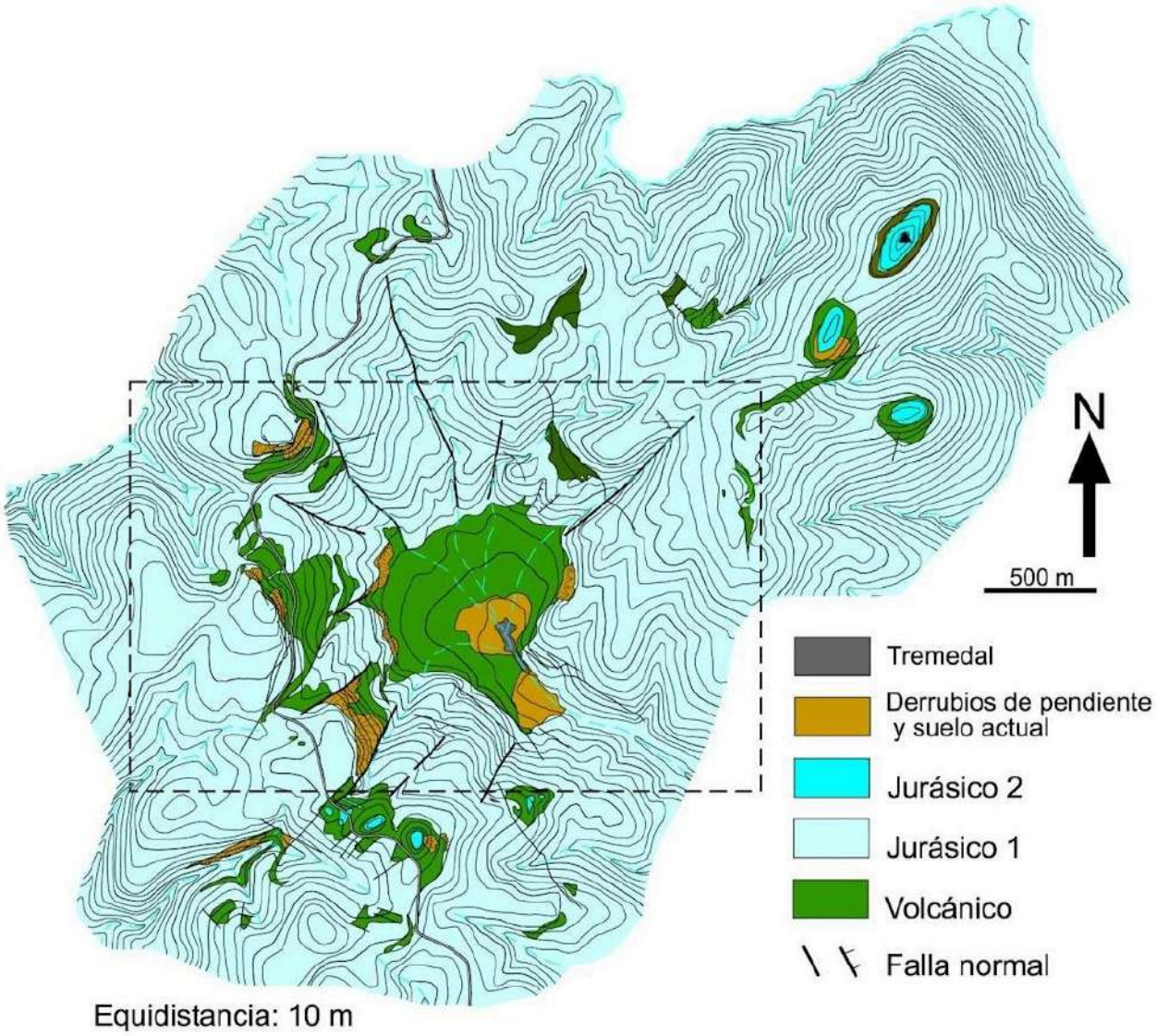
REFERENCIAS

Abril Hurtado, J., Apalategui Issa, O., Pliego Dones, D.V. y Rubio Navas, J. (1978): *Memoria y Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 613 (Camarena de la Sierra)*. IGME, Madrid.: 51 pp.

Gutiérrez Elorza, M. y Peña Monné, J. L. (1975): Karst y periglaciarismo en la Sierra de Javalambre. *Boletín Geológico y Minero*, LXXXVI, VI:561-572.

Martínez González, R. M., Lago, M., Valenzuela Ríos, J. I. y Arranz, E. (1996) Interés como patrimonio geológico de dos magmatismos mesozoicos en la Sierra de Javalambre (Teruel), *Geogaceta*, 20 (5): 1186-1188.

Valenzuela Ríos, J.I., Martínez González, R.M. y Lago, M. (1996) nota preliminar sobre la edad del paleo-volcanismo jurásico de Javalambre (Cordillera Ibérica, Teruel). Geogaceta, 19: 39-40



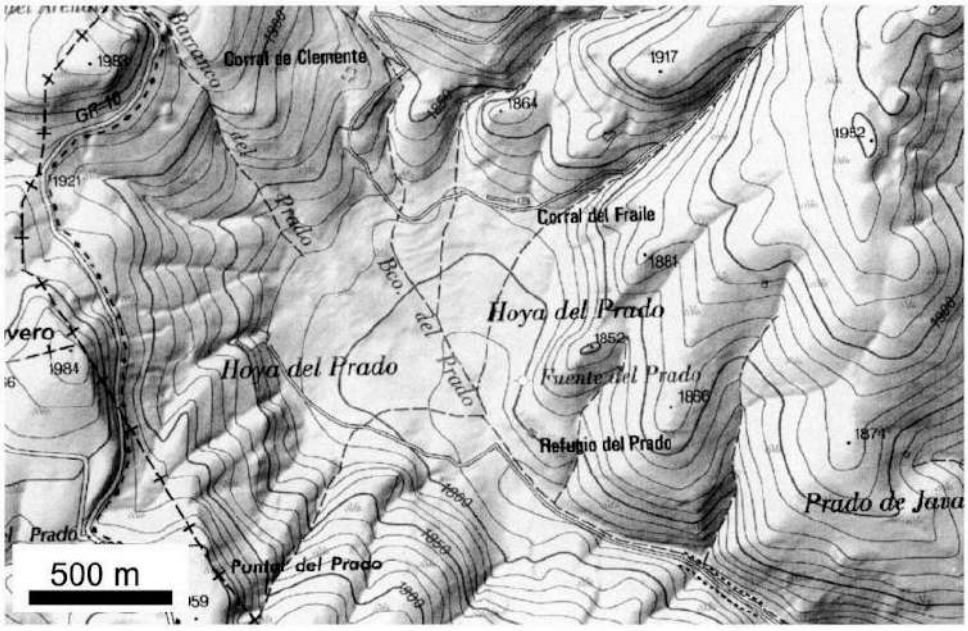


FIGURA 4. *Mapa geológico de la estructura de la Hoya del Prado. Imagen topográfica según IGN.*
FIGURE 4. *Geological map of the structure of the Hoya del Prado. Topographic image according to IGN.*

Análisis icnológico y morfológico de la discontinuidad Messiniense-Plioceno en Los Colmenares (Cuenca del Bajo Segura, SE España)

Ichnological and morphological analysis of the Messinian-Pliocene unconformity in Los Colmenares (Bajo Segura Basin, SE Spain)

D. Díez-Canseco[1], H. Corbí[1], J. Soria[1], L.A. Buatois[2] y M.G. Mángano[2]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Alicante 03690 San Vicente del Raspeig. davinia.diezcanseco@ua.es
2 Dept. Geological Sciences, University of Saskatchewan, S7N5E2, Saskatoon.

Palabras clave: discontinuidad, paleo-relieve, icnología, estudio en detalle

Resumen

Los Colmenares están localizados en el borde norte de la Cuenca del Bajo Segura (SE España) donde están preservadas una serie muy completa del Messiniense y Plioceno y la discontinuidad que los limita. En esta región, el Messiniense está constituido por facies de ambientes restringidos marinos asociados a la Crisis de Salinidad, mientras que el Plioceno está caracterizado por depósitos marinos a continentales que reflejan la reinundación del Mediterráneo y la sucesiva progradación del sistema costero. En este estudio se caracteriza en detalle la discontinuidad, la cual consiste en una suave discordancia angular con paleo-relieve a la que se superpone un retrabajo erosivo y un lag asociados a la transgresión. En términos geométricos, es una superficie inclinada con una serie de pequeños paleo-acantilados y socavaduras modelados durante la transgresión. Parte de los escarpes, habrían sido desprendidos e incorporados como bloques constituyendo junto a ostreidos y pectínidos, al lag basal transgresivo. Excavaciones, perforaciones y organismos incrustantes asociados a la discontinuidad muestran la intensa actividad biológica sobre los paleo-acantilados. Se han identificado dos icnofacies, *Glossifungites* y *Trypanites*, representando las suites de pre- y post-litificación, respectivamente. Las variaciones en el índice de bioturbación/bioerosión y en la superposición de diferentes comunidades de trazas fósiles responden principalmente al tiempo de exposición en determinadas batimetrías. El estudio en detalle realizado nos muestra una visión dinámica de la costa Pliocena durante la transgresión con una amplia resolución de los procesos bio-sedimentarios que tuvieron lugar.

Abstract

Los Colmenares is in the northern margin of the Bajo Segura Basin (SE Spain) where a complete stratigraphic section of the Messinian and Pliocene, and the intervening unconformity are preserved. In this region, the Messinian is constituted by deposits formed in restricted marine environments linked to the Salinity Crisis, whereas the Pliocene is characterized by marine to continental deposits reflecting the Mediterranean flooding and subsequent coastal progradation. In this study, the unconformity is characterized in detail, initially consisting of a gentle angular unconformity and later reworked during the transgression, resulting in the accumulation of an associated lag. The erosional surface is gently inclined with small cliffs and notches and was modulated during the transgression. Part of the escarpments was detached and incorporated as blocks together with oyster and pecten shells, representing the transgressive lag. Burrows, borings, and encrusting organisms in the unconformity show the intense biological activity above the paleo-cliffs. Two ichnofacies, *Glossifungites* and *Trypanites*, represent the pre- and post-lithification suites, respectively. The variations in the bioturbation/bioerosion index and the crosscutting relationships of the different trace-fossil suites are mainly related to the time of exposure under different bathymetry. This study provides a dynamic view of the Pliocene coast during the transgression with high resolution of the bio-sedimentary processes involved.

La sucesión siliciclástico-carbonatada roja miocena en el área de Salamanca.

The Miocene red siliciclastic-carbonate succession in the Salamanca area.

X. Domínguez Arce[1] y I. Armenteros[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37071 Salamanca. xaquindominguezarce@usal.es, ilde@usal.es

Palabras clave: Abanicos aluviales, Mioceno Inferior-Medio, Caliches, Palustre, Cuenca del Duero

Resumen

Se estudia la estratigrafía y sedimentología de la sucesión siliciclástica roja en el área de Salamanca, atribuida al Mioceno Inferior/Medio en su parte inferior (Mazo y Jiménez, 1981). Se correlaciona con las "Series Rojas" / "Unidad Roja" del margen *occidental de la cuenca Cenozoica del Duero (Corrochano et al.*, 2006). En la zona de Salamanca, su espesor máximo es de unos 70 m, distinguiéndose dos subunidades en tránsito vertical gradual. La subunidad inferior (espesor máximo de unos 20 m) está constituida por areniscas y lutitas arenosas, con intercalaciones de gravas, reconociéndose secuencias granodecrecientes y estratificaciones cruzadas. Al norte de Salamanca y hacia el techo, presenta un cuerpo calizo-dolomítico (de hasta 7 m de espesor), formado por caliches nodulares y masivos con alguna intercalación palustre hacia el techo. La subunidad superior se extiende al sur de la ciudad, y consiste en conglomerados, areniscas y lutitas arenosas de color rojo intenso, escaso ordenamiento y nula o escasa cementación carbonatada. La subunidad inferior representa un sistema de abanico aluvial canalizado que pasa distalmente (norte) a una llanura de lutítica con canales dispersos y desarrollo de caliches con episodios palustres. La subunidad superior representa el dominio de flujos no canalizados y *debris flows*. Esta investigación estuvo financiada PGC2018-094566-B-C21 y PID14713NB-100, soportada por MCIN/AEI/10.13039/ 50110001033/ y FEDER.

Abstract

The stratigraphy and sedimentology of the red siliciclastic succession in the Salamanca area, of Early/Middle Miocene age in its lower part, is studied (Mazo and Jiménez, 1981). It is correlated with the "Red Series"/"Red Unit" along the western margin of the Duero basin (Corrochano et al., 2006). In the Salamanca area, it has a maximum thickness of 70m, distinguishing two subunits in gradual vertical transit. The lower subunit reaches a maximum thickness of approximately 20 m and consists of sandstones and sandy mudstones with thin gravelly layers; fining-upward sequences and cross stratifications occur. At the top and to the north of Salamanca, it presents a limestone-dolomitic body (up to 7 m thick that gradually wedges southward; its carbonate facies are mainly nodular and massive calcretes with scarce limnic fossil remains at its upper part. The upper subunit extends to south of the city of Salamanca, and it consists of conglomerates, sandstones and sandy mudstones of intense red colour, with poor internal organization and no or scarse carbonate cementation. This latter represents channelized alluvial fan that pass distally (northward) to a mud flat with disperse channels and intense development of calcretes with scattered palustrine episodes. The upper subunit represents non-channelized flow sedimentation dominated by debris flows. This research was funded by the PGC2018-094566-B-C21 y PID14713NB-MCIN/AEI/10.13039/50110001033/ y FEDER.

Referencias

Corrochano, A., Armenteros, I. y Huerta, P. (2006) *Geo-Temas* 9, 67-70.
Mazo, A. y Jiménez, E. (1982). *Stvdia Geologica Salmanticensia* 17, 94-104

Modelización físico-química de la precipitación de carbonatos pedogénicos en un suelo tipo *Terra Rossa* desarrollado sobre calizas.

Physicochemical modelling of pedogenic carbonates precipitated in a *Terra Rossa* soil developed over limestone.

D. Domínguez-Villar[1], K. Krklec[1] y K. Matan[2]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37007, Salamanca, ddvillar@usal.es, kristina@usal.es
2 Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zagreb, Svetošimunska cesta 25, 10000, Zagreb (Croatia) kmatan@agr.hr

Palabras clave: Calcreta, caliche, calcita, monitorización, edáfico.

Resumen

En la región Mediterránea, es frecuente que sobre materiales carbonatados se desarrollen suelos tipo *Terra Rossa* que pueden tener horizontes cálcicos en su contacto con el sustrato. En este trabajo hemos estudiado un perfil edáfico de *Terra Rossa* en las inmediaciones de Šibenik (Croacia), que registra un horizonte de carbonatos pedogénicos que incluye calcita diseminada y nódulos. Los nódulos registran eventos de disolución dentro de su proceso general de crecimiento. Durante varios meses se ha medido el contenido de agua en el suelo, la temperatura y la concentración de CO_2. Estos datos se han utilizado para realizar un modelo termodinámico del índice de saturación de calcita en el agua del suelo.

Los resultados de la modelización indican variaciones a lo largo del año en la precipitación/disolución de calcita, que depende fundamentalmente de la dinámica de CO_2 del suelo y la evapotranspiración. La modelización permite cuantificar los balances de precipitación y disolución de carbonatos, y predecir la estacionalidad del registro sedimentario. La simulación del modelo apoya las observaciones petrológicas en las que se observan episodios de disolución. Este trabajo tiene importantes implicaciones en estudios que usan carbonatos pedogénicos del registro geológico para el cálculo de paleotemperaturas o cuantifican otros parámetros ambientales. Nuestro estudio sugiere que los carbonatos pedogénicos pueden representar un registro sesgado en diversos parámetros respecto al promedio anual o periodos de ciertas estaciones, ya que las dinámicas de CO_2 del suelo pueden variar localmente dando lugar a diversos episodios de crecimiento a lo largo del año.

Abstract

In the Mediterranean region, it is common the development of Terra Rossa soils over carbonate lithologies that can develop calcic horizons in the contact with the substrate. In this research we studied a *Terra Rossa* soil profile near Šibenik (Croatia), that has developed pedogenic carbonates including disseminated calcite and nodules. The nodules record dissolution events within their general growth pattern. During several months we monitored soil water content, soil temperature and soil CO_2 concentration. These data were used to develop a thermodynamic model of the calcite saturation index in the soil water.

The modelling results support varying conditions of precipitation/dissolution of calcite during the year, which depends mostly on the soil CO_2 dynamic and evapotranspiration. The model allows to quantify the balance between precipitation and dissolution of pedogenic carbonates and predict its seasonality in the sedimentary record. The model simulation supports the petrological observations that record dissolution events. This research has important implications for studies that use pedogenic carbonates in the geological record to calculate paleotemperatures or other environmental parameters. Our study suggests that pedogenic carbonates can represent a biased value of different parameters compared to their annual average or average of specific seasons, since the soil dynamics of CO_2 can vary locally resulting in several periods of sedimentary growth during the year.

Was the amplitude of continental thermal variations during glacial times similar to the one recorded in oceans? – Novel data from cave records in central Spain.

¿Fue la amplitud de las variaciones térmicas durante tiempos glaciales similar a la registrada en los océanos? – Nuevos datos a partir de registros de cuevas en el centro de España.

D. Domínguez-Villar[1], K. Krklec[1], R.L. Edwards[2], H. Cheng[3] y F.J. Sierro[1]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37007, Salamanca, ddvillar@usal.es, krklec@usal.es , sierro@usal.es
2 Department of Earth and Environmental Sciences, University of Minnesota, 116 Chuch Streeet SE, 55455 Minneapolis, MN (USA) edwar001@umn.edu
3 Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, 999 Siyuan Round South Road, 712000, Xi'an (China), cheng021@xjtu.edu.cn

Abstract: Thermal conduction dominates the temperature in Los Pilones Cave (Segovia). Cave advection is controlled by a permanent barometric gradient that prevents any seasonal impact of advection in the thermal regime. As a result, temperature in all galleries has smooth sinusoidal seasonality, where the amplitude depends on the bedrock cover. The external annual average temperature is 12.4 ºC, whereas the gallery with the minimum bedrock cover has a cave average temperature of 11.7 ºC and records the highest seasonality (2.3 ºC). In this specific site, flowstones in the cave walls record cracks that were covered with subsequent carbonate cements. Cracks were formed by seasonal freezing in this gallery, a pattern not observed in other cave sectors with thicker bedrock cover and less thermal amplitudes. Consequently, the average annual temperature for speleothems to crack was at least 10.6 ºC cooler than nowadays. U-Th dating of the flowstone and the cements supports that the freezing event/s took place sometime during last glacial cycle. Comparing this cave thermal anomaly with ocean paleotemperature reconstructions during glacial times around the Iberian Peninsula (up to 7.2 ºC) suggests that continentality in the Iberian Peninsula made glacial temperatures several degrees cooler that those recorded in the oceans.

Key words: Karst, Cave, Speleothem, Temperature, Glacial.

Resumen: *La temperatura de la Cueva de Los Pilones (Segovia) está dominada por la conducción térmica, que hace que su temperatura tenga una señal sinusoidal, y cuya amplitud depende del espesor de roca sobre la cueva. La temperatura media en el exterior es de 12,4 ºC y en la galería con el mínimo espesor de roca sobre la cueva es de 11,7 ºC, registrando la máxima estacionalidad (2,3 ºC). En este sitio, las coladas espeleotémicas de las paredes presentan fracturas cubiertas con cemento carbonático. Estas fracturas fueron causadas por heladas estacionales que no afectaron a otras galerías, ya que tienen mayor espesor de roca y menor amplitud térmica. Por consiguiente, la temperatura promedio para fracturar la colada tuvo que ser al menos 10,6 ºC inferior a la actual. Las dataciones de U-Th de la colada y su cemento confirman que la fractura se produjo en algún momento del último ciclo glacial. La comparación de la anomalía térmica de la cueva, con las reconstruidas en el océano entorno a la Península Ibérica durante la última glaciación (hasta 7,2 ºC) sugiere que la continentalidad hizo que las temperaturas en el interior de la Península Ibérica fueran varios grados más frías que las registradas en el océano.*

Palabras clave: *Karst, Cueva, Espeleotema, Temperatura, Glacial.*

INTRODUCTION

Caves tend to have a very high relative humidity and stable temperature compared to their surface. Thermal conduction is the main control of cave temperature, although ventilation regimes often cause advection introducing high-frequency variability to cave temperature signals during particular seasons. The average temperature of caves is frequently very close to the mean annual temperature above caves because of thermal conduction (Moore, 1964). Conduction transfers the external temperature signal underground by thermal diffusion until it reaches the cave. The transfer of heat by the rock is slow and progressively filters high-frequency anomalies. So, the thermal signal recorded in pure conduction systems is very smooth. Since the bedrock cover over caves represents a filter that the signal has to pass through, thicker bedrock covers imply decreased thermal anomalies recorded in caves. Below 20 meters of bedrock, caves typically do not record seasonal anomalies, whereas very shallow caves can record several degrees of seasonal anomalies (Domínguez-Villar *et al*., 2013).

However, most caves have ventilation patterns that introduce external air into caves due to air density or barometric gradients, producing a high-frequency

variability in the cave thermal signals. Although there are different ventilation regimes, enhanced ventilation often occurs during winter, introducing cold air in caves that tends to equilibrate with the cave walls temperature. Thus, very high thermal anomalies are restricted to cave entrances, although certain anomalies are typically recorded all the cave through.

REGIONAL SETTING

We have studied the temperature record of Los Pilones Cave in the municipality of Pedraza (Segovia), located at an elevation of 1070 m above sea level. This is a subhorizontal cave several hundred meters long developed in the slope of a carbonate valley (Fig. 1). The cave has a unique entrance and a main gallery with a limited number of secondary corridors. The cave thermal dynamics is dominated by thermal conduction (Domínguez-Villar *et al.*, 2023), and although the cave is well ventilated, advection introduces air already equilibrated with the host rock, making the thermal impact of advection negligible. This unusual ventilation regime is caused by its forcing mechanism, a barometric gradient with the cave exterior that is currently under investigation. This particular ventilation mechanism prevents cold external air entering the inner sectors of the cave, a very infrequent circumstance that makes this cave very special.

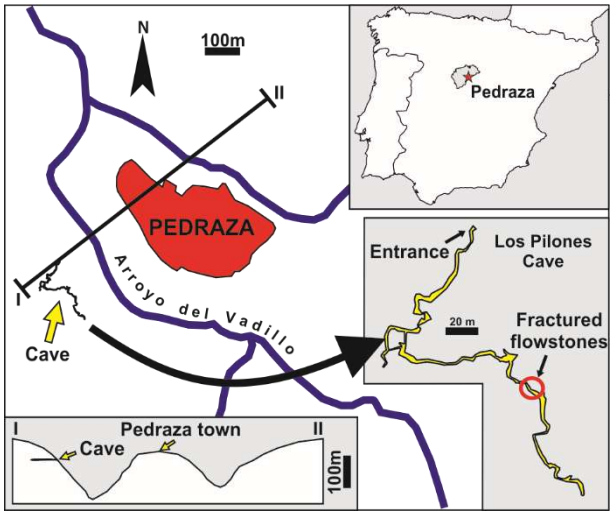


FIGURE 1. *Location of Los Pilones Cave in the vicinity of the town of Pedraza (Segovia). The lower left inset sketch shows a cross-section of the valley including the cave. The lower right inset graph shows a topographic sketch of the cave with the location of the sector where fractured flowstones are found (red circle).*

In some sectors, cave walls are covered by flowstones. However, only one particular sector of the cave shows cave flowstones having irregular crack patterns covered with subsequent speleothem material (Fig. 2). The gallery is several hundred meters from the cave entrance, and the sector is a horizontal tubular gallery with no collapses, signs of tectonic fractures or lineament features. The fractured flowstones appear along a limited portion (~ 20 m) of the gallery covering both walls of the corridor. The flowstones with cracks are typically less than 5 cm thick. Underneath the flowstone, pockets of clay sediments were found over the host rock. Patches of detrital sediments, mostly composed of clays, are commonly preserved in the irregular surfaces of gallery walls as a record of early stages of speleogenesis in this cave. The clays found beneath the flowstone likely have a similar origin that those found elsewhere in the cave walls.



FIGURE 2. *Flowstone covering a vertical portion of the cave wall. The irregular fracture pattern is obvious since carbonate cements fed by water circulating by capillarity along fractures produce a positive relief over the flowstone. Carbonate only precipitated over the surface of the flowstone, not inside the fractures.*

METHODS

Temperature was measured in the cave using Tinytag loggers (TG-4100). Loggers were calibrated in a controlled environment before being deployed in the field, which provided reproducibility of readings better than 0.05 ºC in all cases, whereas accuracy of the loggers reported by the manufacturer is 0.5 ºC. Temperature outside the cave was measured at 2 m above the ground in a relatively open space. The thermometer measuring temperature outside was placed inside a Stevenson screen, whereas in the cave, the loggers were simply placed over the ground or on platforms. Collection of speleothems was done using a coring device. Seven samples were obtained from opposite walls of the corridor to investigate variability. Speleothem sampling considered conservation issues. So, as far as it was possible, samples were collected in places with limited visibility (e.g., behind blocks or at low elevations), and preserving some of the best examples of fractured flowstones in the cave. U-Th dating of speleothems was conducted at the University of Minnesota using standard protocols (Edwards *et al.*, 1986). The dates were corrected for an assumed initial $^{230}Th/^{232}Th$ atomic ratio 4.4 $\pm 1.1 \cdot 10^{-6}$, equivalent to a material in secular equilibrium with a bulk earth $^{230}Th/^{238}U$ atomic ratio of 3.8. We used updated decay constants (Cheng *et al.*, 2013).

RESULTS

Temperature was measured from 2017 to 2021 in the cave and at its surface. Mean annual temperature above the cave was 12.4 ºC, which is very close the mean annual temperature inside the cave (Domínguez-Villar *et al*., 2023). The inner section of the cave (after a series of constraint passages near the entrance) is characterized by temperature records having smooth sinusoidal seasonal signals, which thermal amplitudes depend on the thickness of bedrock above the cave. Typically, thermal anomalies in this cave are <0.5 ºC, recording no seasonality in certain sectors of the cave, although in one specific sector seasonality exceeds 1ºC.

The sector of the cave where the fractured flowstones are found corresponds with the site where the thermal amplitudes are the highest in the cave, suggesting that the surface over this site is the closets. It is worth noticing that this site is several hundred meters away from the entrance (Fig. 1). In the site with fractured speleothems, the average cave temperature is 11.7 ºC, and the average seasonal variability is 2.3 ºC (Fig. 3). Clays were found underneath the fractured flowstones, and when sampled, clays were saturated in water. The percentage of amount of water in relation to water saturated clay samples, resulted in 55 ±3 % (n=6). This implies that more than half of the weight of the sample when collected was interstitial water contained in the clays. Cracks in the flowstone were still open, in fact, many speleothems split in pieces by the fractures when cored. Carbonate cement only occurred in the surface of the speleothem, where water that circulated through the crack by capillarity was exposed to the surface. U-Th dating of the flowstone and cements over the cracks shows that the flowstone precipitated from approximately 150 to 70 ka BP (Table I), whereas cements precipitated during a narrow timeframe of the Mid-Holocene.

DISCUSSION

Cracks similar to the ones here studied are common in cave entrances, where cold air flows inside caves, causing freezing of pore water that triggers the fracturing of speleothems. However, in Los Pilones Cave, the advection system prevents inflow of external cold air. So, high-frequency events of freezing due to income of freezing air could not cause speleothem fractures under the current cave thermal dynamics. This thermal regime has not changed for hundreds of thousands of years since it mostly depends on the cave and valley morphologies. So, the main cause for shifts in the average temperature within the cave is the change of the mean annual temperature at the surface.

Earthquakes or karst subsidence can also produce fractures in speleothems, although the speleothems cover a wide area, without any lineament and are recorded in both sides of the corridor. The gallery in this section of the cave is a simple tube of limited dimensions, a very stable morphology that prevents collapses. So, the most likely interpretation is that the temperature outside the cave decreased enough to establish freezing conditions at least during some months per year in this part of the cave. Similar fractured speleothems are only found in this sector of the cave, where the thermal seasonal anomaly is the highest. This implies that the average annual temperature outside the cave did not reach 0 ºC and that the cave sector where the fractures are found was likely only frozen seasonally.

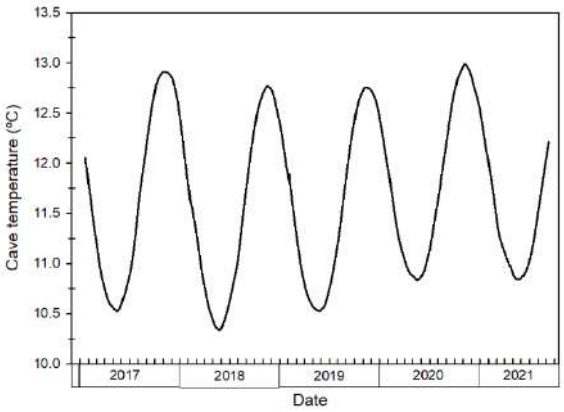


FIGURE 3. *Temperature record of the cave sector where the fractured flowstones are found. The smooth sinusoidal pattern is the result of thermal conduction dominating the thermal regime in the gallery.*

The fractures were likely the result of temperatures under 0 ºC in this sector of the cave, that froze the water contained in the clay underneath the flowstone. Volumetric changes in water caused enough pressure to fracture the thin flowstone covering cave walls. The fractures cross the entire flowstone, suggesting that the flowstone was not actively growing at the time when the freezing event/events took place. U-Th dating results provide a timeframe for the freezing conditions, which occurred after 70 ka BP and before 5 ka BP. Since the clay was saturated in water, the fractures likely contained water since their formation. However, the chemistry of the solution flowing through the cracks did not favor the formation of carbonate cements until thousands of years later. The precipitation of carbonate occurred only on the surface of the flowstone, suggesting that the degassing of a karstic solution was the trigger for calcite to precipitate. Precipitation occurred already during the Holocene, when development of a vegetation cover over the cave was likely favored compared to glacial periods, enhancing soil CO_2 production that impacted the composition of karst waters.

According to the interpretation here suggested for the fracture of these speleothems, a maximum thermal anomaly can be calculated from the coldest moment in the last glaciation and nowadays temperature. Based on the mean temperature of the studied corridor and the thermal amplitude of the studied site, we suggest that the maximum thermal anomaly since glacial times was at least 10.6 ºC. Since the rest of the cave does not show speleothems with signs of freezing, the thermal anomaly was likely not much higher than the value here reported.

Other secondary controls on cave temperature are changes in vegetation cover, latent heat fluxes in the soil, seasonal snow cover or relative humidity within the cave,

which could impact the coupling of local cave and surface temperatures (Domínguez Villar *et al.*, 2013; 2020). The impact of these secondary controls partially counteracts each other, and the real magnitude of change of those parameters through time is unknown. So, estimating the uncertainty on the thermal anomaly estimate is difficult to assess. However, all these secondary factors only modulate the main control that still is surface atmosphere temperature.

Is this magnitude of the thermal amplitude calculated from this cave in the expected range? One of the most reputed paleotemperature proxies is from alkenones (i.e., specific organic compounds produced by cocolitophorids) measured in ocean sediments. There are two outstanding records of alkenone paleotemperatures in the Iberian margins that support that the cooler periods of the last glaciation occurred during Heinrich stadials (HS). An ocean core recovered from the southern portuguese margin in the Atlantic suggests that the cooler temperature of the last glaciation occurred during the HS4, around 40 ka ago (Martrat *et al.*, 2007). On the other hand, the cooler event during the last glaciation recorded within the Alborán Sea in the Mediterranean occurred during Heinrich stadial HS2, around 24 ka ago (Martrat *et al.*, 2004). The maximum thermal anomalies comparing the cooler and recent reconstructed temperature during the last 70 ka are 7.2 ºC for the Atlantic site and 5.5 ºC for the Mediterranean site. Differences in magnitude and timing of the coldest period of the last 70 ka is not surprising, since displacement of ocean currents or changes in the seasonal productivity peaks of coccolithophorids, can impact ocean temperatures. In any case, the thermal anomaly estimated from Los Pilones Cave is around 30 to 50 % higher than the ones recorded in the ocean around the Iberian Peninsula.

CONCLUSIONS

The unusual thermal dynamics of Los Pilones Cave (Segovia) was used to interpret a fractured flowstone as an indicator of freezing conditions in the cave. The freezing had to be caused by a decrease of the average annual temperature of at least 10.6 ºC during colder event/s of the last 70 ka. This value is significantly higher than the thermal anomalies recorded in ocean records around the Iberian Peninsula. A reasonable interpretation is that the continental effect in the Iberian Peninsula caused more extreme thermal anomalies during glacial times that those recorded in the ocean around the Iberian Peninsula.

ACKNOWLEDGEMENTS

The project leading to this research has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 101030314.

REFERENCES

Cheng, H., Edwards, R.L., Shen, C.C., Polyak, V.J., Asmerom, Y., Woodhead, J., Hellstrom, J., Wang, Y., Kong, X., Spötl, C., Wang, X. and Alexander, E.C. (2013): Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 371-372: 82-91.

Domínguez-Villar, D., Fairchild, I.J., Baker, A., Carrasco, R.M. and Pedraza, J. (2013): Reconstruction of cave temperature based on surface atmosphere temperature and vegetation changes: implications of speleothem paleoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370: 158-168.

Domínguez-Villar, D., Krklec, K., López-Sáez, J.A. and Sierro, F.J. (2021): Thermal impact of Heinrich stadials in cave temperature and speleothem oxygen isotope records. *Quaternary Research*, 101: 37-50.

Domínguez-Villar, D., Krklec, K. and Sierro, F.J. (2023): Thermal conduction in karst terrrains dominating cave atmosphere temperatures: Quantification of thermal diffusivity. *International Journal of Thermal Sciences*, 189: 108283.

Edwards, R.L., Chen, J.H. and Wasserburg, G.J. (1986): ^{238}U-^{234}U-^{230}Th-^{232}Th systematics and the precise measurements of time over the past 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 81: 175-192.

Martrat, B., Grimalt, J.O., Shackleton, J, de Abreu, L., Hutterli, M.A. and Stocker, T.F. (2007): Four climate cycles of recurring Deep and Surface water destabilizations on the Iberian margin, *Science*, 317: 502-507.

Martrat, B., Grimalt, J.O., López-Martínez, C., Cacho, I., Sierro, F.J., Flores, J.A., Zhan, R., Canals, M., Curtis, J.H. and Hodell, D.A. (2004): Abrupt temperature changes in the western Mediterranean over the past 250,000 years. Science, 306: 1762-1765.

Moore, G.W. (1964): Cave temperature. *National Speleological Society News*, 22: 57-60.

Sample	^{238}U (ppb)	^{230}Th/^{232}Th (activity)	δ^{234}U (measured)	^{230}Th/^{238}U (activity)	U-Th age (yr BP uncorrected)	$\delta^{234}U_{initial}$ (corrected)	U-Th age (yr BP corrected)
CR-1	1608.2 ±5.9	105.9 ± 2.2	18.0 ± 1.9	0.0361 ± 0.0002	3859 ± 19	18.2 ± 1.9	3829 ±28
CR-4	435.9 ± 0.9	5.5 ±0.1	18.2 ± 1.6	0.0433 ± 0.0002	4663 ± 23	18.4 ± 1.6	3967 ± 492
CR-5	440.3 ± 0.4	20.1 ± 0.4	20.2 ± 1.2	0.0477 ± 0.0002	5149 ± 25	20.5 ± 1.2	4942 ± 149
CR-6	684.9 ± 0.8	85.6 ± 1.7	12.6 ± 1.3	0.0431 ± 0.0001	4667 ± 15	12.7 ± 1.3	4623 ± 35
CR-X3	206.8 ± 0.2	52.7 ± 0.1	64.0 ± 1.5	0.5142 ± 0.0013	71341 ± 292	78.1 ± 1.8	70533 ± 640
CR-X4	500.2 ± 0.8	103.2 ±2.1	22.0 ± 1.4	0.6738 ± 0.0014	116640 ± 536	30.6 ± 1.9	116075 ± 665
CR-X6	354.4 ± 0.3	1486.6 ± 29.9	85.0 ± 1.1	0.8146 ± 0.0010	146873 ± 503	128.6 ± 1.7	146829 ± 503

TABLE I. *Uranium and thorium* isotope *determinations and ratios, and U-Th ages of speleothems from Los Pilones Cave (BP= before present, where present is considered the year 1950).*

Caracterización de la Formación Areniscas de Castellón (Mioceno superior) en el Surco de Valencia. Implicaciones para el almacenamiento subterráneo de CO_2

Characterization of the Castellón Sandstones Formation (Late Miocene) in the Valencia Trough. Implications for the subsurface CO_2 storage

M. Gil-Ortiz[1], E. Gomez-Rivas[1], J. Alcalde[2], P. Cabello[3], G. Zamora[4]

1 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada. UB-Geomodels. Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 (Barcelona, Spain)
2 Geosciences Barcelona (GEO3BCN-CSIC), c/Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 (Barcelona, Spain)
3 Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. UB-Geomodels. Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 (Barcelona, Spain)
4 Repsol Exploración S.A Calle Méndez Álvaro, 44, 28045 (Madrid, Spain)

Palabras clave: Delta, Estratigrafía secuencial, Messiniense, CCS, Transición energética

Resumen

La Formación Areniscas de Castellón está formada por depósitos deltaicos correspondientes a la progradación del paleo-delta del Ebro durante el Mioceno superior. La caracterización estratigráfica y sedimentológica de estos depósitos, mediante datos de subsuelo, ha probado que esta formación estaría dominada principalmente por depósitos de frente deltaico y plataforma interna, con presencia de depósitos de llanura deltaica en la zona más próxima al actual delta del Ebro. Los patrones de apilamiento observados en pozos dentro del área de estudio, así como la evolución del quiebre entre la plataforma y el talud continental observados en sísmica, muestran una tendencia progradante para buena parte de esta formación, en contraste con la tendencia retrogradante actual del delta. Esta formación está limitada a techo por la Superficie Erosiva del Messiniense, una discordancia desencadenada por la caída del nivel del mar durante el Messiniense que favoreció la creación de un característico paleorelieve. Durante el Plioceno, tras la reconexión entre el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico, una rápida subida del nivel del mar dio lugar a la fosilización de este paleorelieve mediante la sedimentación de una potente unidad de arcillas sobre los depósitos arenosos de la Formación Areniscas de Castellón. Este paleorelieve ha preservado numerosas estructuras susceptibles de ser empleadas para la captura y almacenamiento de CO_2, lo que brinda la oportunidad de implementar una solución tecnológica a la descarbonización del cercano complejo industrial de Tarragona.

Abstract

The Castellón Sandstones Formation is formed by deltaic deposits corresponding to the Ebro's paleo-delta progradation during the Late Miocene. The stratigraphic and sedimentological characterization of these deposits, with subsurface data, has proven that this formation is mainly dominated by delta front and inner shelf deposits, with presence of delta plain deposits closer to the current Ebro Delta location. The stacking patterns observed in wells within the study area, as well as the evolution of the shelf-break observed in seismic data, show a progradational trend for most of this formation, in contrast with the present day retrogradational trend of the Ebro Delta. This formation is bounded atop by the Messinian Erosive Surface, an unconformity triggered by the sea level fall occurred during the Messinian, which favored the creation of a characteristic paleorelief. During the Pliocene, after the Mediterranean and Atlantic reconnection, a quick sea level rise fossilized this paleorelief with a thick shales unit over the sandy deposits of the Castellón Sandstones Formation. This paleorelief has preserved numerous structures that might be used for potential carbon capture and storage, providing an opportunity for the close Tarragona's industrial hub to be decarbonized with this technological solution.

¿Cómo afecta la diagénesis al aspecto en campo de las areniscas? Implicaciones para la definición de unidades litoestratigráficas.

How diagenesis affects the field aspect of sandstone? Implications for defining lithostratigraphic units.

L.González-Acebrón[1], S. Campos-Soto[1], M.I. Benito[1,2], I.E. Quijada[3] y P. Suarez-Gonzalez[1]

1 Dpto. GEODESPAL, Facultad de Ciencias Geológicas (UCM) C/Jose Antonio Novais 12, 28040 Madrid
laurgonz@ucm.es , sonia.campos.soto@ucm.es , mibenito@ucm.es , pablosuarez@ucm.es
2 Instituto de Geociencias IGEO (UCM-CSIC), C/Jose Antonio Novais 12, 28040 Madrid
3 Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo, C/Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo quijadaisabel@uniovi.es

Palabras clave: Kimmeridgiense-Titoniense**,** cuenca Suribérica, petrología y procedencia de areniscas.

Resumen

Las areniscas del Kimmeridgiense-Titoniense de la Fm. Villar del Arzobispo (*sensu* Campos-Soto *et al*., 2019), situadas al NO de la Cuenca Suribérica (provincias de Valencia y Teruel) presentan una composición arcósica. Distintas evidencias petrográficas (tipos de cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca) y geoquímicas (composición de turmalinas) indican que las áreas fuente se encontraban en el Macizo Ibérico, incluyendo tanto granitos peralumínicos (situados a más de 200 km de distancia hacia el NO de la zona de estudio) como rocas sedimentarias y metamórficas (carbonatos, cuarcitas, pizarras y esquistos de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Ibérico). Además, se detecta reciclaje de rocas carbonáticas y siliciclásticas de áreas fuente cercanas (Pérmico, Jurásico, Triásico). Las areniscas de las partes inferior a media-alta de la formación presentan más cantidad de fragmentos de roca carbonáticos, lo que provocó una precipitación de carbonato muy abundante durante la diagénesis, dando lugar a su aspecto competente en campo. Sin embargo, la parte más alta de la formación, tradicionalmente adscrita a la Fm. El Collado (Mas *et al*., 2004), tiene pocos aportes de carbonato y gran cantidad de epimatrices de kaolinita por alteración del feldespato K, lo que genera su aspecto blanquecino y deleznable. Por tanto, conviene tener precaución al definir unidades litoestratigráficas en areniscas basándose solo en su aspecto en campo, ya que puede deberse no a diferencias sedimentológicas originales si no a alteraciones durante la diagénesis.

Abstract

Sandstones of the Kimmeridgian-Tithonian Villar del Arzobispo Fm (*sensu* Campos-Soto *et al.*, 2019), located at the NW South-Iberian Basin (Teruel and Valencia provinces) are mainly composed of arkoses. Different petrographic (types of quartz, feldspar, rock fragments) and geochemical evidence (composition of tourmalines) indicate that the source areas were in the Iberian Massif, including both peraluminic granites (located more than 200 km away to the NW of the study area) and also sedimentary and metamorphic rocks (carbonates, quartzites, slates and schists from the Iberian Massif). Furthermore, recycling of carbonate and siliciclastic rocks from nearby source areas (Permian, Jurassic, Triassic) is detected. Sandstones from the lower to the middle-upper parts of the formation present higher amounts of carbonate rock fragments, which produced abundant carbonate precipitation during diagenesis, generating their competent field aspect. However, the uppermost part of this formation, traditionally assigned to the El Collado Fm (Mas *et al.*, 2004), has very low carbonate input and large amount of kaolinite epimatrix due to alteration of K-feldspar, which generated its whitish and friable appearance. Thus, care should be taken when defining sandstone lithostratigraphic units based only on field features that could be due not to original sedimentological differences, but to alterations during diagenesis.

Referencias

Mas, R., García, A., Salas, R., Meléndez, A., Alonso, A., Aurell, M., *et al*. (2004): Segunda fase de rifting: Jurásico Superior-Cretácico Inferior. En J. A. Vera (Ed.), Geología de España (pp. 503–510). Madrid: SGE-IGME.

Campos-Soto, S., Benito, M. I., Cobos, A., Caus, E., Quijada, I. E., Suarez-Gonzalez, P., Mas, J.R., Royo-Torres, R. y Alcalá, L. (2019). *Journal of Iberian Geology*, 45(3), 471-510.

Nota sobre las peculiaridades estratigráficas del Muschelkalk en el sector de La Vall d´Uixó (Sierra del Espadán, Cordillera Ibérica)

Note on the stratigraphic peculiarities of the Muschelkalk in La Vall d´Uixó area (Sierra del Espadán, Iberian Cordillera)

P. P. Hernaiz Huerta

CN IGME_CSIC. C/ Calera 1, 28760, 28760 Tres Cantos, Madrid, p.hernaiz@igme.es

Resumen: En el sector SE de la Sierra del Espadán, el Muschelkalk M2 se presenta como un delgado nivel con facies margo-dolomíticas predominantes de "tipo Almedijar". Su omisión puntual permite que, localmente, las unidades dolomíticas del M1 y del M3 inferior (M3i) formen una sucesión continua. La serie terminal del M3, por encima de la unidad M3s o Fm Pina de Montalgrao consiste en un conjunto margoarcilloso de gran espesor que incluye intervalos de dolomías tableadas y abundantes brechas calco-dolomíticas. Este conjunto se describe aquí por primera vez bajo la denominación provisional de facies o unidad "supra-Pina de Montalgrao".

Palabras clave: Muschelkalk M3, Brechas dolomíticas, La Vall d´Uixó, Sierra del Espadán

Abstract: *In the SE sector of the Sierra del Espadán, the Muschelkalk M2 appears as a thin package with predominantly marly-dolomitic facies of the "Almedijar type." Its local omission allows for the dolomitic units M1 and lower M3 (M3i) forming a continuous succession. The uppermost part of M3, above the M3s unit or Pina de Montalgrao Fm, consists of a thick marl-clay series that includes intervals of tabular dolostones and abundant dolomitic breccias. It is described here for the first time under the provisional designation of the "supra Pina de Montalgrao" facies or unit.*

Key words: *Muschelkalk M3, Dolomitic breccias, La Vall d´Uixó, Sierra del Espadán*

INTRODUCCIÓN

El sector SE de la Sierra del Espadán correspondiente a la hoja de La Vall d´Uixó (Nº 668_II) ha sido recientemente cartografiado en el contexto del proyecto de cartografía geológica a escala 1:25k que el CN IGME_CSIC está realizando en convenio con el Institut Cartogràfic Valencià (ICV) para cubrir la franja litoral de esta comunidad autónoma. Sin estudios complementarios a los propiamente cartográficos, el detalle que impone la nueva escala de trabajo ha resultado suficiente para poner de manifiesto nuevos aspectos geológicos de interés en la franja cartografiada. El proyecto tampoco incluye informes o memorias.

En el presente trabajo se describen los resultados obtenidos en la cartografía de las unidades del Muschelkalk M2 y, sobre todo, del M3, de la hoja de La Vall d´Uixó y su extensión al oeste hasta la rambla de Azuébar, tributaria del río Palancia. Estos resultados muestran peculiaridades estratigráficas de estas unidades (y de su relación con el Keuper suprayacente) no descritas hasta el momento que podrían suponer una revisión de la estratigrafía del Triásico Medio y Superior en este sector de la Cordillera Ibérica.

MARCO GEOLOGICO

La Sierra del Espadán está separada de la contigua al sur Sierra Calderona por el río Palancia. Conjuntamente conforman la terminación SE del Sector Levantino de la rama Castellana de la Cordillera Ibérica contra el litoral valenciano, constituyendo sendos dominios geológicos caracterizados por el predominio de las facies/unidades permo-triásicas clásicas (Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper). Sobre ellas se dispone muy parcialmente una cobertera jurásica esencialmente representada por sus formaciones del Jurásico Inferior y, en menor medida, del Jurásico Medio y Superior (Fig. 1).

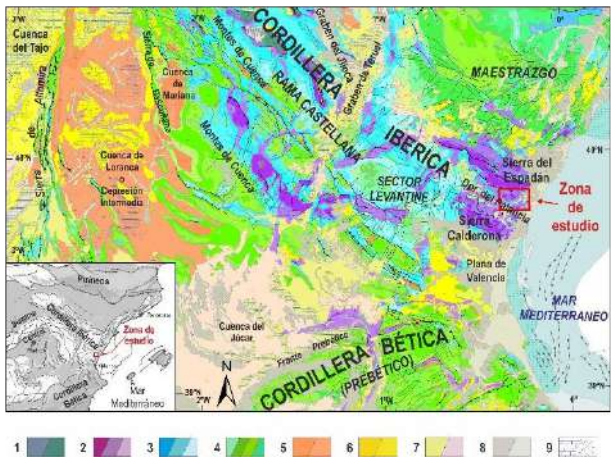


FIGURA 1. *Marco geológico de la zona de estudio (recortado y adaptado de IGME/LNEG, 2015). 1. Paleozoico; 2. Permo-Triasico; 3. Jurasico; 4. Cretácico; 5. Paleógeno; 6: Mioceno; 7: Plioceno; 8: Cuaternario; 9. Calizas/Yeso.*

El contexto geodinámico de los dominios del Espadán y Calderona está condicionado enteramente por el Ciclo Alpino, representado en la zona, de manera cronológica, por: 1) la extensión permo-triásica en la Cuenca Ibérica; 2) la compresión relacionada con la generación de la Cordillera Ibérica; y 3) la extensión neógena relacionada con la apertura del Golfo de Valencia.

La estructura general, contractiva, de estas sierras responde a una tectónica de piel gruesa caracterizada por pliegues de amplio radio y dirección NO-SE a ONO-ESE típicamente ibérica, asociados a cabalgamientos y fallas inversas que involucran al basamento tectónico formado por el Paleozoico y las unidades permo-triásicas estructuralmente solidarias (tegumento). La cobertera, cuando está presente, se interpreta como despegada principalmente a favor del Keuper y plegada de manera disarmónica respecto al basamento, a veces con imbricaciones internas. En contraste con Sierra Calderona donde la estructura es esencialmente anticlinorial, en la Sierra del Espadán algunos cabalgamientos llegan a exponer el basamento paleozoico superpuesto a diversas unidades permotriásicas.

En los sectores más próximos al litoral, la estructura contractiva dominante en ambas sierras se ve fuertemente distorsionada por la tectónica extensional neógena relacionada con la apertura del Surco de Valencia. Ésta se manifiesta principalmente en forma de una acusada red de fallas normales subparalelas a la costa que controlan el hundimiento de bloques en esa misma dirección. También es frecuente identificar fallas normales de dirección ibérica coetáneas con las anteriores.

La Figura 2 muestra el mapa geológico de la zona cartografiada y su leyenda. Las areniscas cuarcíticas del Buntsandstein B1, y la alternancia de areniscas micáceas y lutitas rojas del Buntsandstein B2 ocupan los núcleos de los anticlinales de dirección ibérica que aparecen muy distorsionados y desalineados por el efecto de las fallas normales de dirección NE-SO a NNO-SSE asociadas a la extensión neógena. En el anticlinal central, una de estas fallas permite el afloramiento de la alternancia de areniscas cuarcíticas y argilitas de tonos rojo-vino del Pérmico (Pm), infrayacentes al B1. Los flancos de los anticlinales y los núcleos de los sinclinales de enlace entre ellos están ocupados por las unidades carbonatadas o margo-carbonatadas del Muschelkalk (M1, M2 y M3). La sucesión jurásica (Jr) aflora relativamente completa, (hasta el Titoniense) pero de forma discontinua, en los dos bloques orientales, así como en varios fragmentos aislados repartidos por el resto de la zona de estudio, en este caso exclusivamente formados por sus términos basales (Jurásico Inferior). El Keuper (Kp) se suele reconocer formando retazos discontinuos en su base.

La estratigrafía de la zona cartografiada se completa con unos depósitos detríticos y margosos supuestamente pertenecientes al Mioceno-Plioceno (M-Pl) que culminan en calizas masivas o groseramente estratificadas con gasterópodos del Mioceno Superior-Plioceno; y con una amplia red de abanicos aluviales (Qaa) atribuibles al Pleistoceno y otros depósitos cuaternarios de entidad menor (Q).

ANTECEDENTES SOBRE LA ESTRATIGRAFÍA DEL MUSCHELKALK EN LA ZONA DE ESTUDIO

Tras revisar la propuesta estratigráfica previamente establecida por López-Gómez y Arche (1992) para el conjunto de la C. Ibérica, la nomenclatura de las unidades permo-triásicas en la región se debe a Garay (2001). Esta última es la que se ha utilizado en la cartografía que el CN_IGME está realizando para el ICV, así como en trabajos derivados de ésta (Hernaiz Huerta 2022; 2024). Los detalles estratigráficos de las unidades permo-triásicas distintas del Muschelkalk, y del Jurásico o Terciario, quedan fuera del alcance de este trabajo y se pueden consultar en cualquiera de las referencias citadas.

Garay (2001) denominó Fm Dolomías de L´Oronet al primer tramo carbonatado del Muschelkalk (M1). Consiste en una sucesión de dolomías bien estratificadas en bancos gruesos de típicos tonos marrones y ocres que incluye tramos de dolomías y calizas tableadas localmente alternantes con margas. Garay (2001) identificó cinco miembros en esta formación de los cuales, el miembro intermedio de margas bioturbadas de Sagunto, de apenas 4-6 m de espesor, sirve de nivel de referencia dentro de la serie. En la zona de estudio el espesor de esta formación puede variar entre 50 y 100 m.

La Fm Azuébar (Garay 2001) corresponde al tramo incompetente del Muschelkalk (M2) claramente intercalado entre las formaciones carbonatadas del M1 y del M3. Su espesor en la zona de estudio oscila entre los 10 y 30-40 m, pero puede desaparecer localmente por un adelgazamiento extremo y acuñamiento. Está formada por arcillas, limolitas y arenas margosas de típicos tonos amarillentos, algunas veces blanquecinos por alteración y más localmente rojizos, que intercalan capas centimétricas de arenas margosas, calizas dolomíticas, y dolomías de igual coloración. Garay (2001) se refirió a estas litofacies como de “tipo Almedijar”, por su parecido a las previamente descritas en esta la localidad de la Sierra del Espadán relativamente próxima a la zona de estudio. Otros afloramientos de esta unidad sin embargo presentan litofacies más parecidas al “tipo Chelva” con arcillas y arcillas margosas de tonos rojizos dominantes, en las que se supone que puede haber yesos.

Sobre la unidad anterior, Garay (2001) distinguió dos formaciones que, por orden estratigráfico, denominó Fm Cirat y Fm Pina de Montalgrao. La primera la hizo equivaler al M3 característico de calizas grises tableadas y para la segunda reconoció su equivalencia con las “Capas de Royuela” de sectores occidentales de la C. Ibérica, asignándole una nueva sigla (M4) dentro del Muschelkalk. En la nueva cartografía ejecutada en la zona se ha preferido mantener a estas dos unidades dentro del M3, asignándose la primera a un M3 inferior (M3i) y la segunda a un M3 superior (M3s).

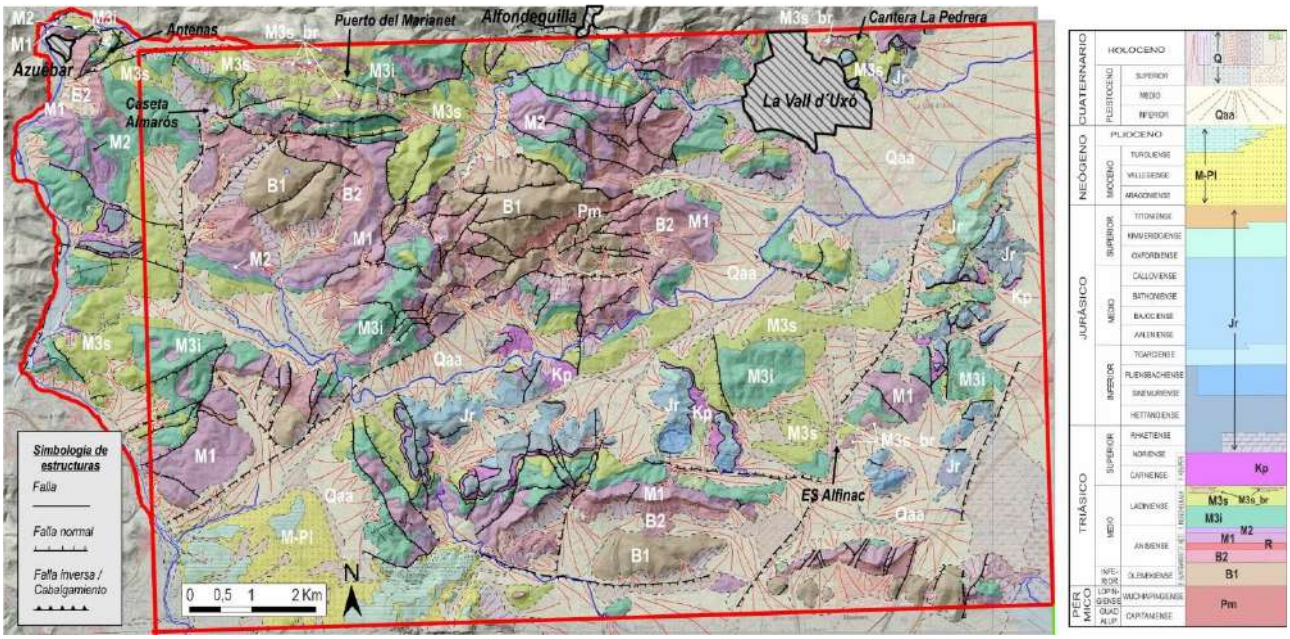


FIGURA 2. *Mapa geológico y leyenda de la zona de estudio, adaptado de Hernaiz Huerta (2023). La línea roja señala los límites de la zona de estudio y de la hoja 1:25k. Las siglas utilizadas en la leyenda y en el mapa son las mismas que se mencionan en el texto.*

La Fm Cirat consiste en una monótona sucesión de dolomías grises (gris oscuro en corte fresco) laminadas o ligeramente onduladas dispuestas en capas de orden centimétrico (≈ 8-10 cm) con esporádicas intercalaciones de margas. Su espesor en la zona cartografiada varía entre 50 y 80 m. Concordante y transicional sobre ella, la Fm Pina de Montalgrao aflora sistemáticamente con unas facies muy características formadas por una alternancia centimétrica de capas de dolomías margosas y margocalizas de tonos rosáceos, areniscas arcillosas de grano fino y limolitas margosas de tonos amarillentos, a veces rojizos, y margas laminadas blanquecinas. Hacia techo estas últimas son predominantes y suelen incluir intercalaciones del resto de las litologías mencionadas. Según Garay (2001) esta unidad pasa transicionalmente hacia techo al Keuper y así lo describe en su corte tipo.

RESULTADOS

Peculiaridades del M2 en la zona de estudio

En la zona de estudio el M2 aflora como un delgado nivel incompetente en facies de "tipo Almedijar" separando los tramos carbonatados del M1 y del M2. Algunos de sus afloramientos incorporan parcialmente la apariencia de las facies de "tipo Chelva" pero contrariamente a lo que ocurre en Sierra Calderona (Garay, 2001; Hernaiz Huerta, 2022), en ninguno de ellos se han encontrado yesos.

La omisión de esta unidad por un rápido adelgazamiento se observa bien en los relieves que rodean la localidad de Azuébar. Tanto en el corte de la carretera a la salida del pueblo en dirección a Alfondeguilla como en los escarpes que se sitúan al sur del mismo se puede seguir cartográficamente el progresivo acuñamiento de esta unidad, de tal forma que el escarpe sobre el que se sitúan las antenas al este del pueblo está exclusivamente formado por una sucesión continua de dolomías bien estratificadas. Esta serie de M1+M3i (en su conjunto, también adelgazada) está limitada a muro por las facies Röt (R) que culminan la unidad del Buntsandstein B2, y a techo, por la Fm Pina de Montalgrao (M3s) que se corta en la parte alta de la carretera de acceso a dichas antenas. Situaciones similares a ésta se han observado en el monte que se localiza al sur de la Caseta de Almarós y en la sucesión dolomítica sobre que se han desarrollado las famosas Cuevas de La Vall d´Uixó en el tramo de la carretera de salida de esta localidad hacia Alfondeguilla, donde el M2 está reducido a la mínima expresión.

Peculiaridades del M3 en la zona de estudio: las facies "supra Fm Pina de Montalgrao" (o "supra M3s")

Las Fms Cirat (M3i) y Pina de Montalgrao (M3s) se reconocen bien, con las facies descritas en párrafos precedentes, por toda la zona cartografiada conformando la parte alta de la sucesión del Muschelkalk. Sin embargo, las facies descritas de la Fm Pina de Montalgrao no culminan esta sucesión sino que a ellas les siguen otras masivas eminentemente margoarcillosas, frecuentemente abigarradas y de tipo "keuperoide" que albergan frecuentes niveles de dolomías tableadas similares a las del M3i y, sobre todo, abundantes niveles de brechas calcáreas y dolomíticas, a veces carniolares (unidad M3s_br en la cartografía y leyenda de la Fig. 2), que son las que dan identidad a esta parte terminal de Muschelkalk en esta zona. No se ha reconocido ninguna intercalación o niveles de yesos. El contacto de estas facies masivas margoarcillosas con las infrayacentes bien estratificadas, siempre presentes, de la Fm Pina de Montalgrao, no se ha cartografiado pues es un contacto muy gradual y difícil de establecer debido al carácter incompetente de ambas series y la fuerte tectonización. Por esta razón, de momento, se ha optado por incluir estas facies dentro del conjunto de la unidad M3s, aunque en ella sí se han diferenciado los tramos de brechas que forman cuerpos de notable espesor y con suficiente entidad cartográfica (M3s_br). De forma provisional e

informal, aquí se van a denominar como facies "supra-Pina de Montalgrao" (Fig. 3).

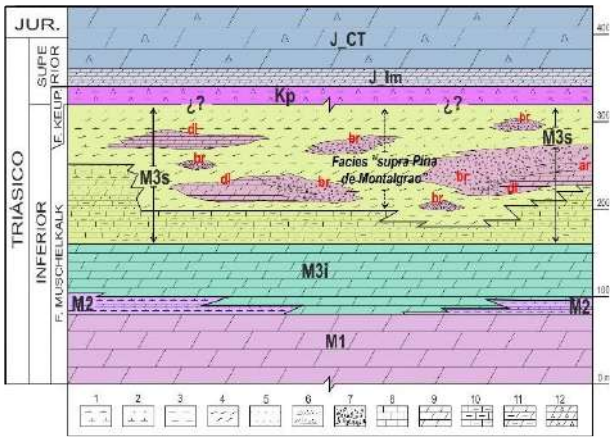


FIGURA 3. *Esquema estratigráfico idealizado del Muschelkalk de la zona de estudio. Los espesores son aproximados. Las siglas son las mismas que se utilizan en la leyenda y el mapa de la Figura 2. J Im: Fm Imón; J CT: Fm Cortes de Tajuña. Las abreviaturas en rojo indican litologías dentro de la unidad M3s_br: dl, dolomías; br, brechas; ar: areniscas y microconglomerados. Leyenda litológica: 1, margas; 2, margas dolomíticas; 3, arcillas y limos, 4, arcillas y margas abigarradas; 5, arenas y areniscas; 6, areniscas y microconglomerados canalizados; 7, brechas calco-dolomíticas; 8, calizas; 9, dolomías; 10, calizas margosas; 11, dolomías margosas; 12, carniolas*

Estas facies "supra-Pina de Montalgrao" afloran por toda la zona de estudio, pero son especialmente abundantes a lo largo de una franja sinclinal o sinclinorial de dirección E-O y anchura kilométrica que discurre aproximadamente entre Alfondeguilla y Azuébar en la parte NO de la hoja. La carretera entre estas dos localidades y una pista que discurre a distinto nivel en paralelo a ésta ofrecen magníficos afloramientos de la unidad. Un lugar clave desde el punto de vista cartográfico es el puerto del Marianet. Allí se toca el contacto entre las dolomías tableadas de Cirat (M3i) y la serie margocalcárea y dolomítica bien estratificada de la Fm Pina de Montalgrao (M3s). Desde allí, en dirección a Azuébar, se puede seguir la evolución de ésta última unidad a las facies margoarcillosas abigarradas masivas que se sitúan a techo. En la misma carretera y en las pistas que por ambas laderas suben a los montes colindantes se cortan profusamente estas facies y algunas de las potentes (>> 10-20 m) intercalaciones de dolomías tableadas y de brechas que se han representado en la cartografía.

Otros afloramientos significativos donde se pueden observar bien estas facies margoarcillosas masivas son los taludes de la estación de servicio de L´Alfinac al este de la autopista A7 (PK 289) y la cantera de La Pedrera situada muy próxima al NE del casco urbano de la Vall d´Uixó. En esta última, además de la extraordinaria exposición de un potente nivel de brechas situado por encima de las arcillas y margas abigarradas, éstas últimas también incluyen un nivel de 5-10 m de espesor de arenas y microconglomerados principalmente cuarcíticos, dispuestos en cuerpos canalizados, que otorgan aún mayor peculiaridad, si cabe, a esta unidad (Fig. 3). Por su naturaleza incompetente es difícil calcular el espesor de este conjunto, pero en el citado sector NO de la zona de estudio se estima bastante superior a los 200 m. La serie infrayacente de Pina de Montalgro también es especialmente potente en este sector, superando ampliamente los 100 m.

La denominación en el presente trabajo de la facies margoarcillosa masiva "supra-Pina de Montalgrao" hace referencia a su inequívoca posición estratigráfica por encima de la Fm Pina de Montalgrao y su adscripción cartográfica dentro de esta unidad es provisional. Una alternativa es su adscripción al Keuper, con el que mantiene aparentes similitudes. Al respecto, es preciso indicar que, en la zona de estudio, cuando el Keuper aflora en la base de la sucesión Jurásica, lo hace con sus características propias, diferentes de las arriba descritas para la unidad margoarcillosa masiva, y con las habituales intercalaciones de yesos, que son muy escasas o inexistentes en ésta última.

Para su adscripción definitiva a la parte terminal del M3, al Keuper o, eventualmente a otra unidad, será necesario realizar trabajos adicionales como, por ejemplo, las dataciones palinológicas y/o las correlaciones isotópicas de oxígeno ($\delta^{18}O$) y azufre ($\delta^{34}S$) en rocas calco sulfatadas practicadas por Ortí et al. (2022) en todas las formaciones margoarcillosas de la región, pero siempre sobre muestras tomadas en unidades debidamente ubicadas en su posición estratigráfica. Para ello muy probablemente será necesaria una revisión cartográfica exhaustiva de la región.

REFERENCIAS

Garay, P. (2001): *El dominio triásico Espadán-Calderona. Contribución a su conocimiento geológico e hidrogeológico*. Tesis Doctoral, U. de Valencia, 692pp.

Hernaiz Huerta, P.P. (2022): *La estructura de Sierra Calderona (SE de la C. Ibérica): El colapso extensional neógeno de un edificio Permo-Triásico y Jurásico estratigráficamente complejo.* Guía de campo de la XXXIII Reunión de la Comisión de Tectónica, SGE, Madrid.

Hernaiz Huerta, P.P. (2023): Mapa geológico a escala 1:25.000 de la hoja de La Vall d´Uixó (668 II). En: *Proyecto de actualización de la Cartografía Geológica a escala 1:25k en el ámbito litoral de la Comunidad Valenciana (ICV_CN IGME, en elaboración) https://icv.gva.es/va/geocv25*.

Hernaiz Huerta, P. P. (2024): The geology of Sierra Calderona (SE Iberian Cordillera, Spain), a review. Results of a new 1:25.000 scale geological mapping. *Journal of Maps, in press*

IGME/LNEG (2015): *Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias a escala 1:1.000.000*. IGME, Madrid.

López-Gómez, J. y Arche, A. (1986): Estratigrafía del Pérmico y Triásico en facies Buntsandstein y Muschelkalk en el sector SE de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica (prov. de Cuenca y Valencia). *Estudios Geológicos*, 42, 259-270.

Ortí, F., Pérez-López, A., Pérez-Valera, F. y Benedicto, C. (2022): Isotope composition (δ34S, δ18O) of the Middle Triassic-Early Jurassic sulfates in eastern Iberia. *Sedimentary Geology,* 431, 106104.

El registro sedimentario de la laguna de Caballo Alba (Segovia)

Sedimentary record of the Caballo Alba lake (Segovia)

P. Huerta[1], I. Armenteros[1], C. Recio[1], A. Rodríguez-Berriguete[2], R. Martín-García[2]. P. Carrasco[3] J. Carrasco[3]

1 Dpto. Geología, Universidad de Salamanca, Pza. de la Merced S/N 37008 Salamanca. phuerta@usal.es; ilde@usal.es; crecio@usal.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense de Madrid, C/ Jose Antonio Novais, 12. Ciudad Universitaria. 28040 - MADRID rebecm05@ucm.es; arberriguete@ucm.es
3 Dpto. Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Avd/Hornos Caleros, nº 50 05003 Ávila retep@usal.es; tgeofisicas@gmail.com

Palabras clave: lago alcalino**,** carbonatos continentales, cuenca del Duero, Cuaternario, dolomita.

Resumen

Se describe un testigo extraído de las partes centrales de la laguna de Caballo Alba (Segovia). El testigo Alba-1 tiene una longitud de 3,6 m. Los depósitos más recientes (0-0,8 m) consisten en margas grises con granos de tamaño arena compuestos por cuarcita, cuarzo, feldespato y plagioglasa y esmectita e illita como principales minerales de la arcilla. Sobre estos aparecen unos tapetes microbianos actuales que contienen carbonatos magnésicos como Nesquehonita e Hydromagnesita (Cabestrero y Sanz-Montero, 2018). De 0,8 a 1,2 m se aprecia una capa de color crema con bioturbación y brechificación constituida por margas dolomíticas. De 1,2 a 1,6 m se registran margas grises de composición similar a las margas grises descritas anteriormente. De 1,6 a 3,6 m aparecen areniscas de color rojo, que hacia su parte superior son más grisáceas y arcillosas con moteado hidromórfico. Contienen granos de cuarzo y feldespato, cantos dispersos de cuarcita, bioturbación de raíces, nódulos de calcita y dolomita. La fracción arcillosa está dominada por illita y esmectita. El testigo registra la existencia de depósitos aluviales con edafización en el Pleistoceno Superior (66,5 ±8,4 ka) que dan paso a depósitos dolomíticos lacustres durante el Holoceno Medio (Norgripiense). La dolomita procede probablemente de la transformación de minerales precursores magnesianos.

Abstract

This work describes a core extracted from the central parts of Caballo Alba lake (Segovia). The Alba-1 core has a length of 3.6 m. The most recent deposits (0-0.8 m) consist of gray marls with sand-sized grains composed of quartz, feldspar, and plagioclase, and smectite and illite as the main clay minerals. Above these deposits, there are present day microbial mats containing magnesian carbonates such as Nesquehonite and Hydromagnesite (Cabestrero and Sanz-Montero, 2018). From 0.8 to 1.2 m, a cream-colored layer of dolomitic marls with bioturbation and brecciation is observed. From 1.2 to 1.6 m, occurs gray marls of similar composition to the marls at the top of the core. From 1.6 to 3.6 m, there are red-colored sandstones, which towards their upper part become more grayish and clayey with evidence of hydromorphism. The red sandstones contain quartz and feldspar grains, scattered quartzite pebbles, root bioturbation, calcite and dolomite nodules. The clay fraction is dominated by illite and smectite. The core records alluvial sedimentation affected by pedogeneis during the Upper Pleistocene (66.5 ± 8.4 ka) which evolves into lacustrine dolomitic deposits during the Middle Holocene (Norgripian). Dolomite probably comes from the transformation of magnesian mineral precursors.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los proyectos de investigación: PGC2018-094566-B-C21 y PID2022-14713NB-I00 financiados por el MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/ y FEDER “Una manera de hacer Europa”.

Referencias

Cabestrero, Ó. y Sanz-Montero, M.E. (2018). *Journal of Paleolimnology*, 59, 139-157.

Secuencias lacustres de alta frecuencia en la formación cretácica de El Castellar (subcuenca de Galve) y su caracterización temporal

High-frequency lacustrine sequences in the Cretaceous El Castellar Formation (Galve sub-basin) and their temporal constraint

N. Illueca, A. R. Soria y C. L. Liesa

GEOTRANSFER, Departamento de Ciencias de la Tierra-IUCA, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.

Palabras clave: lago, secuencia de somerización, control climático, ciclicidad.

Resumen

El análisis estratigráfico y sedimentológico de un perfil de la Formación el Castellar (Castillo de Aliaga) en la subcuenca de Galve ha permitido diferenciar 3 asociaciones de facies principales: lago somero de baja energía, lago mixto siliciclástico-carbonatado y lago de alta energía. El análisis secuencial ha permitido identificar secuencias sedimentarias lacustres de tres órdenes de magnitud diferentes (secuencias elementales, parasecuencias y sets de parasecuencias). Estas secuencias se caracterizan por una brusca profundización del medio seguida de una progresiva somerización, con periodos de exposición subaérea, bioturbación y brechificación de los sedimentos. Su continuidad y recurrencia a lo largo del perfil y su correlación con los ciclos orbitales inferidos previamente en la sección han permitido hacer una interpretación del intervalo temporal de cada orden secuencial. Las secuencias elementales, con espesores de entre 1 y 5 m, se componen de una o dos asociaciones de facies y se interpretan como relacionadas con el ciclo de precesión larga (~22,4 ka). Las parasecuencias (10-17 m) se componen de sucesiones de 4 ó 5 secuencias elementales, y se asocian con el ciclo de excentricidad corta (~95 ka), correspondiendo, por tanto, a secuencias de quinto orden. Por último, los sets de parasecuencias (~50 m) están formados por conjuntos de 4 parasecuencias que se relacionan con el ciclo de excentricidad larga (~405 ka) y, por tanto, a secuencias de cuarto orden. Las secuencias se interpretan como resultado, a diferentes escalas temporales, de oscilaciones en el nivel del lago y/o variaciones en el aporte detrítico asociadas a cambios climáticos, con periodos de mayor y menor humedad en el medio, inducidos por variaciones de insolación controladas por la órbita de la Tierra.

Abstract

The stratigraphic and sedimentological analysis of a section of the El Castellar Formation (Castillo de Aliaga) in the Galve sub-basin has allowed us to distinguish three main facies associations: low-energy shallow lake, mixed siliciclastic-carbonated lake, and high-energy lake. The sequential analysis has made it possible to establish lacustrine sedimentary sequences of three different orders of magnitude (elementary, parasequences and parasequence sets). These sequences are characterised by a sharp deepening followed upward by a progressive shallowing, with periods of subaerial exposure, bioturbation and brecciation of the sediments. Their recurrency and continuity throughout the section and their correlation with the orbital cycles previously inferred in the section have allowed us to interpret the time lapse for each type of sequence. The elementary sequences, 1 to 5 m thick, are composed of one or two facies associations, and are interpreted as related to the long precession cycle (~22.4 ky). The parasequences, 10 to 17 m thick, are composed of successions of 4 or 5 elementary sequences, and are associated with the short eccentricity cycle (~95 ky), so they belong to fifth-order sequences. Finally, the parasequence sets, ~50 m thick, are composed of 4 parasequences, and are related to the long eccentricity cycle (~405 ky) and, therefore, to fourth-order sequences. The sequences are interpreted as the result, on different time scales, of oscillations in the lake level and/or variations in the detrital supply. These variations are interpreted as associated with climate changes, with periods of greater and lesser humidity in the environment, induced by variations in insolation controlled by the Earth's orbit.

Caracterización mineralógica y geoquímica de los suelos externos de la Gruta de las Maravillas. Datos preliminares de la dinámica de crecimiento carbonatado actual y respuesta hidrológica de la cueva.

Mineralogical and geochemical characterization of the external soils of the Gruta de las Maravillas. Preliminary data on the current carbonate growth dynamics and hydrological response of the cave.

C. Jiménez de Cisneros[1], A. González-Ramón[2], M. López-Chicano[3], A. Peña[1], F.J. Jiménez -Espejo[1] y W. Martín-Rosales[3]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT-CSIC), Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla (Granada)
concepcion.cisneros@csic.es; arancha.peras@gmail.com; francisco.jimenez@csic.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo, 18006 Granada
antonio.gonzalez@igme.es
3 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n 18071, Granada
mlopezc@ugr.es; wmartin@ugr.es

Palabras clave: Gruta de las Maravillas, geoquímica, suelo, carbonatos, aguas de goteo

Resumen

El estudio de la cobertera edáfica existente sobre las cuevas permite caracterizar y comprender la dinámica del ecosistema subterráneo. El suelo actúa como un regulador de los procesos que ocurren tanto en el exterior como en el interior de las cavidades, modificando la retención o filtración de agua y proporcionando material arcilloso, nutrientes. Todos estos aspectos son fundamentales para el desarrollo de microorganismos y la precipitación carbonatada en el interior de las cuevas. En este trabajo se realiza la caracterización mineralógica y geoquímica del suelo externo de la Gruta de las Maravillas, así como el análisis de sus características bioquímicas. Además, se estudia la precipitación carbonatada actual recogida durante un año en soportes artificiales situados en áreas estratégicas de la cueva. Los análisis isotópicos del carbonato y del agua de goteo en cada punto de estudio, así como la composición isotópica del agua existente en los *gours*, permiten evaluar las fases cristalinas predominantes, la dinámica de precipitación actual y la respuesta hidrológica de la cueva.

Abstract

The study of the existing soil cover over the caves allows us to characterize and understand the dynamics of the subterranean ecosystem. The soil acts as a regulator of the processes occurring both outside and inside the cavities, modifying the retention or filtration of water and providing clay material and nutrients. All these aspects are fundamental for the development of microorganisms and carbonate precipitation inside the caves. In this work, the mineralogical and geochemical characterization of the external soil of the Gruta de las Maravillas is carried out, as well as the analysis of its biochemical characteristics. In addition, the current carbonate precipitation collected during one year in artificial supports located in strategic areas of the cave is studied. Isotopic analyses of the carbonate and drip water at each study point, as well as the isotopic composition of the water in the gours, allow us to evaluate the predominant crystalline phases, the current precipitation dynamics and the hydrological response of the cave.

Referencias

Jiménez de Cisneros, C., Peña, A., Caballero, E. and Liñán Baena, C. 2021. *International Journal of Environmental Research* https://doi.org/10.1007/s41742-020-00278-x
López-Chicano, M., Martín-Rosales, W. y Vadillo, I. 2010. En: *III Congreso Español de sobre Cuevas y Turísticas*. 143-158.

Calcium carbonate biomineralisation in plant roots: outstanding examples from Marina Baixa, Alacant.

Biomineralización de carbonato cálcico en raíces de plantas. Ejemplos actuales en suelos de la Marina Baja, Alicante.

A. Košir[1] and A. Martín-Pérez[1]

1 Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Ljubljana, Slovenia, andreamp@zrc-sazu.si, adrijan@zrc-sazu.si

Key words: plant roots, biomineralisation, soil carbonate.

Abstract

Calcium carbonate precipitation in and around roots of vascular plants is one of the fundamental mechanisms of biogenic calcrete formation. Adaptational strategies of some Mediterranean plants growing in calcareous soils with low (and seasonal) water and nutrient availability include production of immense amounts of secondary soil carbonate formed through biologically-controlled intracellular mineralization of specialized fine roots. Calcified roots have been studied in present-day calcareous soils from xerophyte-dominated semiarid environments of the Province of Alicante. We show that architectural, morphological and physiological traits, inferred from (i) micromorphology of calcified roots, (ii) their relationship with substrate and (iii) their geochemical signatures, are in agreement with a hypothesis that intracellular $CaCO_3$ accumulation, coupled with proton extrusion and rhizosphere acidification, represent an efficient nutrient-acquiring mechanism, and strongly accelerate weathering. Modern examples are compared with possible analogues in the stratigraphic record.

Resumen

La precipitación de carbonato cálcico alrededor y en el interior de las raíces de plantas vasculares es uno de los principales mecanismos de formación de calcretas biogénicas. Las estrategias de adaptación de algunas plantas mediterráneas que crecen en suelos calcáreos, con una baja e irregular disponibilidad de agua y nutrientes, incluyen la producción de enormes cantidades de carbonatos pedogénicos formados por la mineralización intracelular biológicamente controlada de raíces finas especializadas.

Se han estudiado raíces calcificadas en suelos actuales de ambientes semiáridos dominados por xerofitas de la provincia de Alicante. Basándonos en la micromorfología de las raíces calcificadas, su relación con el sustrato y sus rasgos geoquímicos, interpretamos que la acumulación intracelular de $CaCO_3$, junto con la extrusión de protones y una acidificación de la rizosfera, representan un eficiente mecanismo de adquisición de nutrientes y aceleran fuertemente la meteorización. Los ejemplos modernos estudiados se comparan con posibles análogos en el registro estratigráfico.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto J1-50028, financiado por la Agencia Eslovena de Investigación e Innovación (ARIS)

Reconstrucción paleoambiental de una plataforma carbonatada-siliciclástica mixta del Cenomaniense-Coniaciense de los Pirineos (margen norte del Macizo de Bortziriak – Cinco Villas)

Paleoenvironmental reconstruction of a Cenomanian-Coniacian mixed carbonate-siliciclastic platform of the Pyrenees (northern Bortziriak – Cinco Villas massif margin)

M. Ladron de Guevara[1], A. Bodego[1], A. Aranburu[1], L. Damas Mollá[1], J.A. Uriarte[1], L. Troya[2], S. Alcorta[3], J.M. Iturralde[4], E. Iriarte[5] y I. Antigüedad[1]

1 Hidro-Ingurumen Prozesuen ikertaldea (IT-1678/22), Geologia Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU. Sarriena auzoa z/g, 48940 Leioa martin.ladrondeguevara@ehu.eus
2 Departament de Paleontologia, Museu de Ciències Naturals de Barcelona, Passeig Picasso s/n, 08003 Barcelona
3 Department of Environmental Geosciences (alumni), Faculty of Environmental Sciences, ČZU, Kamýcká 129, 16500 Praha
4 Departamento de Ciencias de la Tierra (alumni), Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza
5 Laboratorio de Evolución Humana, Departamento de Historia, Geografía y Comunicación – Laboratorio de isótopos estables IsoTOPIK, Universidad de Burgos, Plaza Misael Bañuelos s/n, 09001 Burgos

Palabras clave: análisis de facies, Cretácico Superior, sedimentología, tectónica, post-rift.

Resumen

La combinación entre la transgresión marina del Cretácico Superior y la coetánea relativa disminución de la actividad tectónica extensional, dio lugar al desarrollo de amplias rampas carbonatadas en los márgenes del rift pirenaico cretácico. No obstante, la unidad Calizas de Sara (Cenomaniense-Coniaciense), que aflora discontinuamente en el margen norte del macizo de Bortziriak-Cinco Villas (Pirineos occidentales), es un ejemplo de un sistema de plataforma carbonatada-siliciclástica mixta desarrollado en un margen de cuenca relativamente estrecho. La integración de observaciones sedimentológicas y petrográficas ha permitido la identificación de 14 facies sedimentarias que se agrupan en cinco asociaciones de facies y que se relacionan con diversos ambientes sedimentarios costeros y relativamente profundos. Las agrupaciones identificadas representan depósitos distales de abanicos deltaicos, depósitos transicionales de laguna, depósitos de caída de rocas derivados de acantilados y canales submarinos de plataforma interna, depósitos arrecifales de plataforma externa y depósitos hemipelágicos y calciturbidíticos de talud a cuenca. La disposición espacial de las litofacies evidencia una distribución en mosaico de los cinturones de facies a lo largo de una costa rocosa escarpada e irregular. Los datos muestran que la mezcla composicional contemporánea de sedimento estuvo condicionada por el aporte episódico y catastrófico de sedimento siliciclástico hacia un sistema arrecifal marino-somero retrogradante dominado por metazoos (corales y rudistas) debido a la interacción de la subida del nivel del mar y el abrupto paleorelieve modelado durante el *rifting*.

Abstract

The marine transgression that occurred during the Late Cretaceous, combined with the coeval relative decrease in the extensional tectonic activity, resulted in the generation of wide carbonate ramps in the margins of the Cretaceous Pyrenean rift. Nevertheless, the Sara limestone unit (Cenomanian-Coniacian), which outcrops discontinuously in the northern margin of the Bortziriak-Cinco Villas massif (western Pyrenees), is an example of a mixed carbonate-siliciclastic platform system developed on a relatively narrow basin margin. The integration of sedimentological and petrographic observations allowed the identification of 14 sedimentary facies grouped in five facies associations that are related with diverse coastal to offshore sedimentary environments. The identified facies associations represent distal fan-delta deposits, fan-delta to platform transition lagoonal deposits, inner platform cliff-derived rockfall and submarine channel deposits, outer platform reefal deposits and slope to basin hemipelagic and calciturbiditic deposits. The spatial arrangement of the lithofacies evidences a mosaic-like distribution of the facies belts along a steep and irregular rocky coast. Data reveal that contemporaneous compositional mixing of sediment was conditioned by the episodic and catastrophic input of siliciclastic sediment into a metazoan-dominated (corals and rudists) retrograding shallow marine reefal system due to the interaction of the rising sea level and the rift-inherited abrupt palaeorelief.

Arquitectura de facies de la sucesión lacustre-palustre de Peña Adrián (Mioceno Superior, Cuenca Miranda-Trebiño, NE Iberia).

Facies architecture of the lacustrine-palustrine succession of Peña Adrián (Late Miocene, Miranda-Trebiño Basin, NE Iberia).

Z. Larena[1], X. Murelaga[1], C. Arenas[2] y J.I. Baceta[1]

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 48080 Bilbao. zurine.larena@ehu.eus, juanignacio.baceta@ehu.eus, xabier.murelaga@ehu.eus
2 Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza. carenas@unizar.es

Palabras clave: Mioceno Superior, carbonatos lacustres-palustres, Cuenca Miranda-Trebiño.

Resumen

El estudio estratigráfico y sedimentológico de los depósitos lacustres y palustres del Mioceno superior de Peña Adrián (Burgos) revela el desarrollo de un humedal carbonatado representativo del último estadio de sedimentación expansiva en la cuenca continental de Miranda-Trebiño (región Vasco-Cantábrica). La sucesión estudiada alcanza un espesor de 60 m y comprende cuatro asociaciones de facies principales: 1) aluvial (conglomerados, areniscas y lutitas rojas de margen de cuenca), 2) palustre (margas y calizas bioturbadas y edafizadas), 3) lacustre abierto (calizas tableadas wackestone y pack-grainstone con abundante contenido bioclástico) y 4) lacustre restringido (calizas mud-wackestone con marcas de raíces y escasos bioclastos). Una de las características principales de la sucesión es la gran abundancia de gasterópodos, principalmente del género *Mercuria* (Larena *et al*., 2023). La arquitectura de facies, los datos de composición-textura e isótopos estables permiten inferir un modelo de sedimentación correspondiente a un sistema lacustre somero y de baja pendiente con desarrollo de acumulaciones bioclásticas retrabajadas (barras) en las zonas abiertas centrales, rodeadas de una orla palustre definida por una intensa colonización vegetal, localmente concentrada en horizontes con importante alteración diagenética. La sucesión vertical de facies revela una progresiva expansión del sistema lacustre que culminaría con una fase final comparativamente rápida de colmatación y desecación.

Abstract

The stratigraphic and sedimentological study of the lacustrine and palustrine deposits of the Late Miocene of Peña Adrián (Burgos) reveals the development of a carbonate wetland representative of the last stage of expansive sedimentation in the continental Miranda-Trebiño basin (Basque-Cantabrian region). The studied succession has a maximum thickness of 60 m and comprises four main facies associations: 1) alluvial (basin margin conglomerates, sandstones and red lutites), 2) palustrine (bioturbated and edafized marls and limestones), 3) open lacustrine (mud-wackestone and pack-grainstone limestones with a high bioclast content) and 4) restricted lacustrine (mud-wackestone limestones with abundant root traces and sparse bioclasts). On of the main characteristics of the succession is the great abundance of gastropods, mainly of the genus *Mercuria* (Larena *et al*., 2023). The facies architecture, compositional-textural features and stable isotope data allow the establishment of a sedimentation model corresponding to a shallow, gently-dipping lake system with development of reworked bioclastic accumulations (bars) across the open central zones, surrounded by a palustrine fringe characterized by intense plant colonization, locally concentrated in horizons with significant diagenetic overprint. The vertical facies pattern reveals a progressive expansion of the lake system, culminating with a comparatively faster final stage of lake contraction and desiccation.

Referencias

Larena, Z., Sanjuan, J., Pascual, A., Larraz, M., Valenzuela, A., Arenas, C., Murelaga X. y Baceta, J.I. (2023). *Geogaceta*, 74, 83-86. https://doi.org/10.55407/geogaceta98198

La transición marino-continental en los sondeos Asträin y Guenduláin (Navarra, cuenca de antepaís Surpirenaica); resultados iniciales

The marine-continental transition at the Asträin and Guenduláin boreholes (Navarre, South Pyrenean foreland basin); initial results

J.C. Larrasoaña[1,2], J.M. León[3], P. Sierra-Campos[1], G. Bernaola[4], E. Barrón[5], M. Montes[6], A. Luzón[7], E. Bellido[6], P. Calvín[1] y E.L. Pueyo[1]

1 CN IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza, 50059 Zaragoza. jc.larra@igme.es, p.sierra@igme.es, p.calvin@igme.es, unaim@igmes.es
2 Dpto. Ciencias & INAMAT^2, Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, Navarra.
3 Dpto. Obras Públicas, Gobierno de Navarra, 31002 Pamplona, Navarra. jmb.leon.zudaire@navarra.es
4 Dpto. Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad del País Vasco, 48013 Bilbao, Vizcaya. gilen.bernaola@ehu.eus
5 CN IGME, CSIC, 28003 Madrid. e.barron@igme.es
6 CN IGME, CSIC, 28760 Tres Cantos, Madrid. m.montes@igme.es, e.bellido@igme.es
7 Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza. aluzon@igme.es

Palabras clave: cuenca de antepaís Surpirenaica, Cuenca del Ebro, Priaboniense, continentalización, cronología.

Resumen

La continentalización de la cuenca de antepaís Surpirenaica representa uno de los eventos más importantes acaecidos durante el Cenozoico en el NE de la Península Ibérica, ya que marca la desconexión de la cuenca con el Océano Atlántico y el nacimiento de la Cuenca del Ebro. Los datos cronoestratigráficos disponibles en la actualidad sugieren una continentalización muy rápida y prácticamente isócrona ocurrida durante el Priaboniense (ca. 36 Ma) como respuesta al levantamiento tectónico del sector más noroccidental de la cuenca. El carácter progradante de las facies transicionales que afloran en dicha zona parece sugerir, por el contrario, un evento diacrónico. La resolución de estas cuestiones no ha podido ser abordada debido a la naturaleza evaporítica de la secuencia transicional aflorante en dicho sector, que ofrece condiciones de afloramiento muy pobres y la ausencia de un marco cronoestratigráfico preciso. En este trabajo se presentan los resultados iniciales de los sondeos Asträin y Guenduláin, que han sido realizados en colaboración entre el Gobierno de Navarra y el CN IGME-CSIC con el fin de paliar estas limitaciones. Entre los resultados preliminares destaca la identificación de una discordancia angular en la parte más alta de la secuencia marina, cuya presencia supone la primera evidencia del cierre de la cuenca por causas tectónicas.

Abstract

The continentalization of the South Pyrenean foreland basin represents one of the most important events occurred during the Cenozoic in the NE Iberian Peninsula, since it marks the disconnection of the basin from the Atlantic Ocean and the birth of the Ebro basin. Available chronostratigraphic data suggest a very rapid and mainly isochronous continentalization occurred during the Priabonian (ca. 36 Ma) in response to tectonic uplift in the northwesternmost sector of the basin. The prograding character of the transitional facies observed in this sector of the basin seems to suggest, on the contrary, a diachronic event. Addressing these questions has been prevented by the evaporitic nature of the transitional sedimentary sequence in the westernmost sector of the basin, which offers very poor outcrop conditions as well as the lack of an accurate chronostratigraphic framework. This work introduces the initial results of the Asträin and Guenduláin boreholes, which have been drilled in collaboration between the IGME-CSIC and the Government of Navarra in order to overcome such limitation. Among the most relevant preliminary results stems the identification of a angular discordance in the uppermost part of the marine sequence, whose presence would attest to the closure of the basin in response to tectonic processes.

Relación entre los Conglomerados de Sant Miquel de Montclar (Eoceno, margen SE de la cuenca del Ebro) y las unidades estratigráficas adyacentes.

Relations among the Sant Miquel de Montclar conglomerates (Eocene, SE margin of the Ebro basin) and adjoining units.

M. López-Blanco[1,2], N. Carrera[1,2], P. Arbués[1,2], E. Beamud[2,3], M. Garcés[1,2], M.A. Marín[2,4], Ll. Cabrera[1,2], E. Roca[1,2], O. Ferrer[1,2], O. Gratacos[1,2].

1 Dpto. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, UB. 08028 Barcelona. m.lopezblanco@b.edu
2 Institut UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, UB. 08028 Barcelona.
3 Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB GEO3BCN. 08028 Barcelona.
4 SLB, Abingdon Technology Center, OX14 4RU Milton, United Kingdom

Palabras clave: Eoceno, Abanico aluvial, Discordancia, sintectónico,

Resumen

Los conglomerados de Sant Miquel de Montclar constituyen una de las unidades aluviales adosadas al margen SE de la cuenca del Ebro (NE de España) formados durante el levantamiento contractivo paleógeno de las proto-Cadenas Costeras Catalanas. Los trabajos realizados durante el siglo pasado interpretaban la estructura de dichos conglomerados como una discordancia progresiva con una discordancia angular sintectónica interna resultante de su deposición simultánea al levantamiento del bloque del Gaià. En cartografías geológicas, la base de esta unidad conglomerática se delineaba como una superficie de discordancia. Recientes trabajos de cartografía detallada de campo a escala 1:5.000 apoyados por fotointerpretación han servido de base para una nueva interpretación estructural y de su relación estratigráfica con las unidades adyacentes. Así, algunas geometrías originalmente interpretadas como discordancias basales e internas, abanicos de capas y truncaciones han sido reinterpretadas como discordancias asociadas a depósitos más recientes, pliegues menores que provocan relaciones angulares en las trazas cartográficas y fallas transversales al frente contractivo de este sector de las proto-Cadenas Costeras Catalanas. Esta reinterpretación no descarta el carácter sintectónico de los conglomerados de Sant Miquel de Montclar ya que existen otras discordancias intraformacionales totalmente coherentes con un plegamiento sinsedimentario. Mediante la cartografía geológica también se ha constatado que su base es heterócrona y que los niveles inferiores de esta unidad son equivalentes laterales de la formación Riu de Boix y los depósitos marinos más altos del grupo Santa María, situando la base de los conglomerados de Sant Miquel de Montclar dentro del cron C16n.

Abstract

The Sant Miquel de Montclar conglomerates constitute one of the alluvial units attached to the SE margin of the Ebro basin (NE Spain) formed during the contractive uplift of the proto-Catalan Coastal ranges during the Paleogene. The work carried out in the area in the last century interpreted the structure of these conglomerates as a progressive unconformity with an internal angular syntectonic unconformity resulting from deposition during the uplift of the Gaià block. In geological maps, the base of this conglomeratic unit was attributed to an unconformity. Recent detailed field mapping at a 1:5,000 scale, supported by photointerpretation, is the basis for a new interpretation of the basal contact of these conglomerates and their relations with adjacent units. Thus, geometries originally interpreted as internal unconformities, fan-shaped strata successions and truncations have been now interpreted as unconformities associated with more recent deposits, minor folds that cause angular relationships in the mapping traces and faults transverse to the Catalan Coastal ranges contractive front. This re-interpretation does not rule out that these conglomerates are syntectonic, since intraformational unconformities consistent with a simultaneous folding are also present. It has also been confirmed that the base of these conglomerates is heterochronous and that the lower levels of the unit are laterally equivalent to the Riu de Boix formation and the uppermost marine deposits of the Santa María group, placing the base of these conglomerates within chron C16n.

The Middle Eocene Climatic Optimum (MECO) in the South-Pyrenean Foreland Basin (NE Spain): Stratigraphic record and effects in a Source to Sink transect.

El Óptimo Climático del Eoceno Medio (MECO) en la cuenca de antepaís surpirenaica (NE de España): Registro estratigráfico y efectos en una transecta "source to sink".

M. López-Blanco[1,2], M. Garcés[1,2], L. Valero[1,2], E. Beamud[2,3], P. Arbués[1,2], A. Vinyoles[1,2], R. Silva-Casal[1,2]

1 Dpto. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, UB. 08028 Barcelona. m.lopezblanco@b.edu
2 Institut de Recerca UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, UB. 08028 Barcelona.
3 Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB GEO3BCN. 08028 Barcelona.

Abstract: The central area of the Eocene South-Pyrenean foreland basin includes excellent and continuous outcrops. These allow the study of correlatable stratigraphic intervals along the same clastic sediment distribution system. This work shows the record of the MECO (Middle Eocene Climatic Optimum) in 8 correlatable logs, 6 of them with precise magnetostratigraphic dating and belonging to different areas of the clastic system (alluvial, fluvial, transitional and marine) and to remote shelf areas of this one. The expression of the MECO global warming-cooling event translates into an asymmetric sequence of advance-retreat of the clastic systems. This trend can be interpreted as associated with both "upstream" controls related to variations in the hydrological cycle and sediment flow and "downstream" controls linked to eustatic variations that would give rise to a cycle of variation in accommodation rates.

Key words: MECO, Eocene, Pyrenees, Magnetostratigraphy, Source-to-sink.

Resumen: *La zona central de la cuenca de antepaís surpirenaica eocena incluye afloramientos excelentes y continuos que permiten el estudio de intervalos estratigráficos correlacionables pertenecientes a distintas zonas del mismo sistema de distribución de sedimentos clásticos. En este trabajo se muestra el registro del MECO (Óptimo climático del Eoceno medio) en 8 secciones correlacionables, 6 de ellas con datación magnetoestratigráfica precisa y pertenecientes a diferentes zonas del sistema clástico (aluvial, fluvial, transicional y marino) y a zonas de plataforma alejadas de éste. La expresión del evento de calentamiento-enfriamiento global del MECO se traduce en una secuencia asimétrica de avance-retroceso de los sistemas clásticos. Esta tendencia es interpretable como asociada tanto a controles "upstream" relacionados con variaciones en el ciclo hidrológico y el flujo de sedimento como a controles "downstream" ligados a variaciones eustáticas que darían lugar a un ciclo de variación de las tasas de acomodación.*

Palabras clave: *MECO, Eoceno, Pirineos, Magnetoestratigrafía, Source-to-sink.*

INTRODUCTION

The Middle Eocene Climatic Optimum (MECO) represents a warming episode (Bohaty and Zachos, 2003) within the long-term Eocene cooling trend- from the latest Palaeocene-early Eocene *hothouse* Earth towards a *coolhouse* Earth culminated by significant polar glaciation by the earliest Oligocene. The age of the MECO event is well constrained within magnetic chron C18, starting in C18r and with the warming peak right after the C18n.2n base (Westerhold and Röhl, 2013, Westerhold et al. 2020). The MECO shows a progressive warming trend during approximately 400-kyr, followed by an abrupt cooling in less than 100-kyr.

GEOLOGICAL SETTING

The South-Pyrenean foreland basin (SPFB) shows in relatively short distance the source to sink transition among different sedimentary systems and environments (alluvial, fluvial, deltas, deep marine, even carbonate platform) (Fig.1). Thus, this basin is an ideal area to study the record and effects of climatic variations in time equivalent successions covering different parts of a sedimentary system.

The SPFB was developed from upper Cretaceous to Miocene as a response to the load generated by the Pyrenean structuration. During Bartonian the basin was E-W elongated and clastic sediments derived from the Pyrenean range (to the North) mostly travelled westwards, where the marine part of the basin (Ainsa and

Jaca) was located (Fig.1). The basin infill for the Bartonian shows an overall regressive trend punctuated by minor transgressive periods.

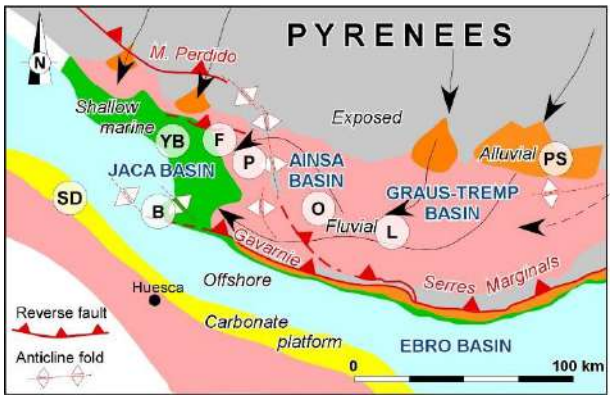


FIGURE 1. *Paleogeographic map of the SPFB during early Bartonian. PS: Pobla de Segur, L: Lascuarre, O: Olsón, P: Planiello, F: Fiscal, YB: Yebra de Basa, B: Belsué, SD: Santo Domingo. (modified from Garcés et al., 2020)*

RESULTS

Recent magnetostratigraphic works developed in the Paleogene of the SPFB by the University of Barcelona/ GEO3BCN team provided a very valuable dataset of stratigraphic logs including strata during C18r and C18n that record the MECO event, including its peak just before the C18r-C18n boundary. A correlation between these logs provides a precise source to sink section from proximal alluvial to marine settings (Fig. 2) enabling the recognition of the sedimentary signals caused by the MECO.

In proximal alluvial environments (Pobla de Segur section), the MECO-related succession shows an initial progressive advance of the coarse-grained alluvial facies onto distal fine-grained deposits and a later retraction of these alluvial systems. The maximum advance of the coarse-grained units is nearly coincident with the C18r-C18n boundary.

In distal alluvial to fluvial plain areas (Lascuarre, Olsón and Planiello) the MECO interval is characterized by the presence of channel fill units alternating with floodplain fines with a general coarsening-upwards trend, later evolving to fining-upwards. Around the C18r-C18n boundary (MECO peak) the fluvial beds are amalgamated sheets traceable for kilometers, even tens of kilometers (e.g, Olsón sheet). These units are not unique in the succession, but previous and later sheets are not as prominent and continuous.

In transitional areas (Fiscal) the general shallowing upwards trend shows the transition from deep marine to fluvial strata. However, this transition is marked by the abrupt and erosive base of a shallow marine unit which correlates to proximal areas with a sheet-like fluvial channel bed located a few meters below the C18r-C18n boundary in Planiello. Above that shallow marine unit and after a muddy lower delta plain interval, there is a sandy fluvial channel unit traceable for more than 10 km to the Planiello section where this sheet-like unit stands 10 m above the C18r-C18n boundary. This succession is covered by a 60 m thick muddy fluvial plain succession also traceable for more than 10 km.

In fully marine environments (Yebra de Basa and Belsué) the C18r-C18n boundary is associated to the Sabiñanigo sandstone, a relatively thin coarse-grained shallow marine sandstone wedge deposited above and below two thick and widespread deep marine muddy intervals. Recent work by Peris Cabré et al., (2023) shows negative excursions of $\delta^{18}O$ values very close above the C18n-C18r boundary, interpreting the regressive peak (remarkable at Yebra de Basa section) as related to the MECO climatic signal.

In the Santo Domingo range, there are MECO outcrops not belonging to the Pyrenean provenance clastic sediment routing system. During early Bartonian shallow marine carbonate platforms developed at the forebulge of the basin and isolated from the northern clastic systems by a deeper marine trough. In this succession, the carbonate platform units include a widespread fine-grained clastic interval deposited above a shallowing-upwards ramp succession. Provisional magnetostratigraphic data show a polarity change from reversal to normal near the base of and within that clastic interval which we identify as the C18r-C18n boundary. Coincident with the clastic interval, stable isotopes (Garcés et al., 2023) shows negative excursions both in $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ values similar to other time-equivalent sections (e.g. Bohaty and Zachos, 2003). Accordingly, these peaks are interpreted as the isotopic expression of the MECO, this supported by chronostratigraphic constraints.

DISCUSION

A common signature along the South-Pyrenean sediment routing system is the progradation of the clastic system, reaching a maximum (grain size, energy of the environment, maximum regression, etc..) close to the C18n-C18r boundary. This is expressed by the expansion of alluvial fans, development of amalgamated sheet fluvial sandstone units or maximum progradation of deltaic systems. After this maximum, there is a rapid retraction of the clastic systems (retrogradation of the alluvial fans, decreasing even disappearance of channel fill deposits in fluvial environments and transgressive events in marine sections). The Santo Domingo sections, even not in the Pyrenean clastic routing system also show an increase of the clasticity of the succession. In this case, a clastic wedge interrupting the shallow marine carbonate deposition.

Using classic sequence stratigraphy models, the observed pattern could be interpreted as related to a sequence boundary associated to a relative sea-level fall and the associated systems tracts. The progradational (in fluvial areas) and shallowing upwards trends within a normal regression (in coastal and shallow marine) below the widespread fluvial sheets could be attributed to a Highstand systems tract. The erosional sharp and locally unconformable base of the fluvial sheets could be interpreted as a subaerial unconformity related to a relative sea-level fall. The fluvial sheets themselves could be the infill of an incised valley (Lowstand systems tract) during the initial relative sea-level rise in a period

of low-accommodation (High amalgamation systems tract). The highly progradational deltaic units in marine areas could represent the Lowstand systems tract and the deepening and transgressive trend above, a Transgressive systems tract. The income of clastics in southern margin carbonate platforms could be also interpreted to the effect of rejuvenation of drainage systems in response to a relative sea level fall supplying detrital grains in a previously non-clastic area.

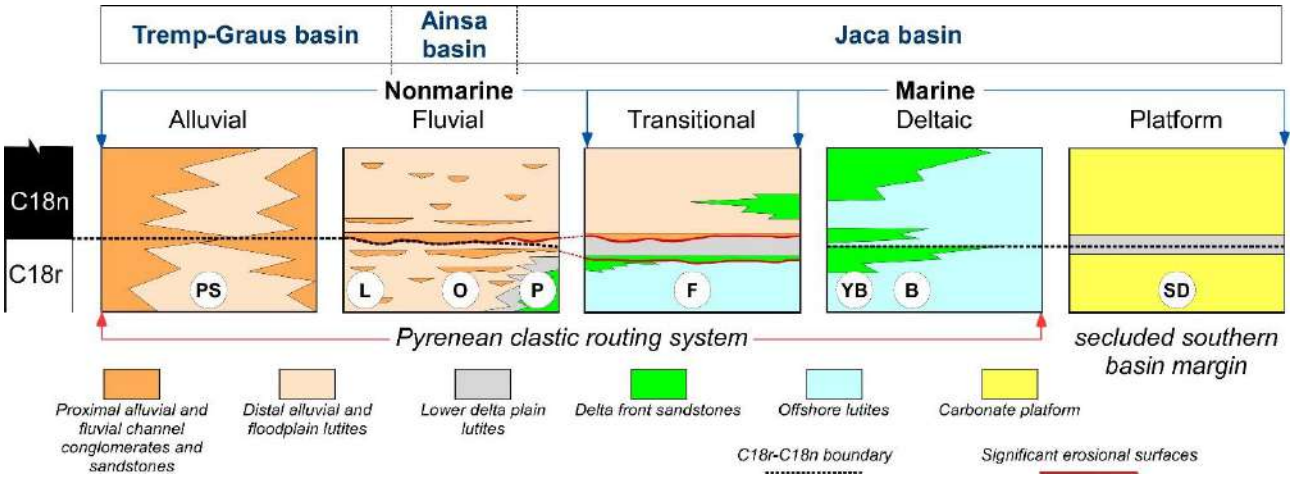


FIGURE 2. *Diagram representing the depositional architecture in different areas of the source to sink transect, including facies distribution, correlation timelines and location of the C18r-C18n boundary where recorded. The position of the different logs is labelled as in Figure 1.*

Apart from the classic sequence stratigraphic interpretation, recent works in the area propose climatic-related sediment flux variations for the features observed related to the MECO peak. Sharma et al., (2023) interpret the fluvial sheets as driven by enhanced sediment flux due to increased precipitation in the catchment area. Peris et al., (2023) interpret the system progradation at the peak of the MECO as an effect of an enhanced hydrological cycle that favoured sediment production and transport. This increased precipitation would have an effect also in the catchment area, increasing sediment production and resulting in alluvial fan progradation as observed in Pobla de Segur area. A climatic signal would affect the whole Pyrenean sediment clastic routing system and also other areas disconnected to it as is the forebulge shallow marine platforms, where increased precipitation would result in a relatively short lapse of clastic supply.

The South-Pyrenean tectonostratigraphic scenario with low to moderate accommodation rates in Tremp-Graus and Ainsa and high accommodation rates in northern Jaca basin during early Bartonian (Vinyoles et al., 2021, López-Blanco et al., 2021) played an important role in the different depositional styles developed in both areas. Low accommodation values in areas of overfilled accommodation would have promoted incision and bypass favouring the amalgamated style of the fluvial sheets in Tremp-Graus and Ainsa. The high rates of sediment bypass in Tremp-Graus and Ainsa would feed areas of underfilled accommodation, as Jaca basin, favouring the development of outstanding prograding deltaic wedges (Sabiñánigo sandstone).

CONCLUSIONS

The MECO event has been recorded along the clastic sediment routing system of the South-Pyrenean foreland basin and in Pyrenean areas out of the main sediment fairway.

The stratigraphic record is characterized by an asymmetrical sequence of advance-retreat of the clastic systems. There is a lower progradation of the detrital systems (alluvial, fluvial and deltaic) followed by a sudden retraction marked by a transgressive event in marine areas.

The MECO peak, located close above the C18r-C18n boundary, is represented by the maximum progradation of alluvial units, wide fluvial sheet sandstones and conglomerates, extensive delta front wedges, and detrital intervals intercalated in carbonate platforms.

The origin of the observed architectural and sedimentological characteristics seems to fit with both downstream (relative sea level variations) and upstream (clastic sediment flux) controls consistent with the warming to cooling cycle associated to this climatic event.

However, the exact stratigraphic position of both, the outstanding amalgamated fluvial sheets or maximum regression in the deltaic wedges, may not be controlled just by the MECO peak. These features are probably also modulated by high-frequency cycles overimposed on larger-scale trends as the 700kyr MECO cycle.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research has been funded by the project PID2019-106440GB-C21 (Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) and supported by the Research Group 2021 SGR 00076 “Geodinàmica i Anàlisi de Conques”.

REFERENCES

Bohaty, S. M., and Zachos, J. C. (2003): Significant Southern Ocean warming event in the late middle Eocene. *Geology*, 31(11): 1017-1020.

Garcés, M., López-Blanco, M., Valero, L., Beamud, E., Oliva, B., Vinyoles, A. and Cabrera, L. (2020): Sedimentary trends, shifts and breaks across the South-Pyrenean Foreland System. *Marine and Petoleum Geology*, 113: 104105.

Garcés, M., López-Blanco, M., Silva, R., Juvany, P., Arbués, P., Pueyo, E. and Beamud, E. (2023): The record of the Middle Eocene Climate Optimum in the carbonate platforms of the South Pyrenean Basin (Santo Domingo, External Sierras). En: *EGU General Assembly 2023*, EGU23-8739.

López-Blanco, M., M., Garcés, M., Arbués, P., Valero, L., Vinyoles, A., Silva-Casal, R. Beamud, E. (2021): Evolución de las tasas de sedimentación a lo largo de una cuenca de antepaís y sus dominios tectonosedimentarios: Eoceno, Cuenca de antepaís surpirenaica (Tremp-Graus-Ainsa-Jaca). En: *GEO-TEMAS 18: Resúmenes X Congreso Geológico de España*. 162-162.

Peris, S., Valero, L., Spangenberg, J., Vinyoles, A., Verité, J., Adatte, T., Tremblin, M., Watkins, S., Sharma, N., Garcés, M., Puigdefàbregas, C. and Castelltort, S. (2023): Fluvio-deltaic record of increased sediment transport during the Middle Eocene Climatic Optimum (MECO), Southern Pyrenees, Spain. *Climate of the Past*, 19, 533–554.

Sharma, N., Whittaker, A., Watkins, S., Valero, L., Verité, J., Puigdefàbregas, C., Adatte, T., Garcés, M., Guillocheau, F. and Castelltort, S. (2023): Water discharge variations control fluvial stratigraphic architecture in the middle Eocene Escanilla formation, Spain. *Scientific Reports*, 13: 6834.

Vinyoles, A., López-Blanco, M., Garcés, M., Arbués, P., Valero, L., Beamud, E., Oliva-Urcia, B. and Cabello, P. (2021): 10 Myr evolution of sedimentation rates in a deep marine to non-marine foreland basin system: Tectonic and sedimentary controls (Eocene, Tremp–Jaca Basin, Southern Pyrenees, NE Spain). *Basin Research*, 33(1): 447-477.

Westerhold, T., and U. Röhl (2013): Orbital pacing of Eocene climate during the Middle Eocene Climate Optimum and the chron C19r event: Missing link found in the tropical western Atlantic. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14: 4811–4825.

Westerhold, T., Marwan, N., Drurym, A.J., Diederik Liebrand, D., Agnini, C., Anagnostou, E., Barnet, J.S.K., Bohaty, S.T., De Vleeschouwer, D., Florindo, F., Frederichs, T., Hodell1, D.A., Holbourn, A.E., Kroon, D., Lauretano, V., Littler, K., Lourens, L.J., Lyle, M., Pälike, H., Röhl, U., Tian, J., Wilkens, R.H., Wilson, P.A, Zachos, J.C. (2020): An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369, 1383–1387.

Quimioestratigrafía (isótopos de Re-Os) y cicloestratigrafía del Sondeo del Cau (SE España) – el OAE 1a - Aptiense – Tethys Occidental

Chemostratigraphy (Re-Os isotopes) and cyclostratigraphy of the Cau Core (SE Spain) – the OAE 1a - Aptian – Western Tethys

R. Martínez-Rodríguez[1,2], S. Batenburg[3], D. Selby[4], J. M. Castro[1], G. A. de Gea[1], L. M. Nieto[1], P. A. Ruiz-Ortiz[1], S. Robertson[5]

1 CEACTEMA and Geology Department, University of Jaén, Campus Universitario, 23071 Jaén, Spain rodrigue@ujaen.es
2 GEODESPAL Department (Geodynamics, Stratigraphy and Paleontology), Faculty of Geological Sciences, Complutense University, Madrid, C/ José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid, Spain. rafaelma@ucm.es
3 Facultat de Ciencies de la Terra, Universitat de Barcelona, Martí i Franques, 08028 Barcelona, Spain
4 Department of Earth Sciences, Durham University, Durham, DH1 3LE, United Kingdom
5 Department of Earth Sciences, University of Oxford, South Parks Road, Oxford OX1 3AN, UK

Palabras clave: Isótopos de Re-Os; Astrocronología; OAE 1a; Aptiense; Cambio Global

Resumen

La mayor erupción volcánica del planeta en los últimos 200 Ma formó la Gran Provincia Ígnea (GPI) del Ontong Java Plateau (OJP), la más extensa del planeta Tierra, la cual se planteaba hasta ahora como la principal causa del Evento Anóxico Oceánico del Aptiense inferior (OAE 1a). Recientemente, se ha propuesto un nuevo modelo de edad para el emplazamiento del OJP (Davidson *et al.*, 2023) que pone en duda que el magmatismo del OJP sea el causante principal del OAE 1a, así como la principal fuerza que lo mantiene en el tiempo. Esta comunicación presenta una quimioestratigrafía basada en isótopos de Re-Os y una cicloestratigrafía de una sección de referencia mundial para el Aptiense inferior, y en concreto para el OAE 1a, como es el Sondeo del Cau (SE España). El inicio de la principal excursión no radiogénica en los isótopos de Os que se produjo 120 ka después del inicio de OAE 1a todavía plantea dudas sobre el evento desencadenante de OAE 1a, que precede al inicio del vulcanismo a gran escala. Los datos de alta resolución del Sondeo de Cau proporcionan más información sobre las limitaciones temporales del OAE 1a y otros eventos paleoclimáticos del Aptiense.

Abstract

The largest volcanic eruption on the planet in the last 200 Ma formed the Large Igneous Province (LIP) of the Ontong Java Plateau (OJP), the largest on planet Earth, which until now was proposed as the main cause of the early Aptian Oceanic Anoxic Event (OAE 1a). Recently, a new age model for the emplacement of the OJP has been proposed (Davidson et al., 2023) that casts doubt that the magmatism of the OJP is the main cause of the OAE 1a, as well as the main force that maintains it over time. This communication presents a chemostratigraphy based on Re-Os isotopes (Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021) and the cyclostratigraphy (Martínez-Rodríguez *et al.*, 2024) of a world reference section for the lower Aptian, and specifically for the OAE 1a, such as the Cau Core (SE Spain). The onset of the main non-radiogenic excursion in Os isotopes occurring 120 ka after the onset of OAE 1a still raises questions about the triggering event of the OAE 1a, preceding the onset of large-scale volcanism. The high-resolution data from the Cau Core provide further insights into the temporal constraints of the OAE 1a and other Aptian paleoclimatic events.

Referencias

Davidson, P.C., Koppers, A.A.P., Sano, T. y Hanyu, T. (2023). *Science*, *https://doi.org/10.1126/science.ade8666*

Martínez-Rodríguez, R., Selby, D., Castro, J. M., de Gea, G. A., Nieto, L. M., y Ruiz-Ortiz, P. A. (2021). *Global and Planetary Change*, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103652

Martínez-Rodríguez, R., Batenburg, S. J., Castro, J. M., de Gea, G. A., Nieto, L. M., Ruiz-Ortiz, P. A., y Robinson, S. (2024). *Global and Planetary Change*, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104361

Impacto del guano de murciélago sobre carbonato espeleotémico: nuevos datos experimentales

Impact of bat guano on carbonate speleothems: new experimental data

R. Martínez-Rodríguez [1,2], M.B. Muñoz-García[1], A. Molero[1,3], X. Arroyo[4], J. Martín-Chivelet[1,3] y A.I. Ortega[5]

1 Departamento of Paleontología, Estratigrafía y Geodinámica (GEODESPAL), Facultad of Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 28040, Spain rafaelma@ucm.es
2 Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA), Universidad of Jaén, Campus Universitario, Jaén, 23071, Spain rodrigue@ujaen.es
3 Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), c/ José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid, Spain
4 Unidad de Técnicas Geológicas, CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueología, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain
5 Centro Nacional de Investigación Sobre Evolución Humana (CENIEH), Paseo de la Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain

Palabras clave: Guano de murciélago, karst, carbonato espeleotémico, fosfatos, paleoambiente

Resumen

Se presenta un estudio sobre excrementos de quirópteros, tanto subfósil (Cueva Mayor, Karst de la Sierra de Atapuerca), como reciente (Cueva de Don Juan, Valencia). El guano se ha caracterizado mediante microscopio petrográfico y fluorescente, difracción de rayos-X (DRX), espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR), microscopio electrónico de barrido (MEB) y análisis de Carbono Orgánico Total (TOC). El experimento consiste en someter muestras de espeleotemas calcíticos de características conocidas al guano de murciélago, bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, simulando distintos regímenes kársticos, y observar qué fases minerales precipitan, así como la tasa de corrosión. El objetivo es conocer mejor el proceso de formación de láminas negras en este tipo de espeleotemas, caracterizando su mineralogía y observando los procesos de precipitación de fosfatos que alteran el proceso de disolución en un ambiente ácido. La estimación temporal de los hiatos que el guano puede producir en las estalagmitas es de suma importancia para las interpretaciones paleoambientales y paleoclimáticas que se realizan a partir de las dataciones radiométricas.

Abstract

We report a communication focused on guano of chiroptera, both subfossil (Galería de las Estatuas, Cueva Mayor), and recent (Cueva de Don Juan, Valencia). The bat guano has been characterized by optical petrographic and fluorescent microscopy, X-ray diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscope (SEM) and Total Organic Carbon (TOC). The experiment consists of subjecting samples of calcitic speleothems of known characteristics to bat guano, under controlled conditions of humidity and temperature, simulating different karstic regimes, and observe what mineral phases precipitate, as well as the corrosion rate. The objective is to better understand the process of formation of dark horizons in this type of speleothems, characterizing their mineralogy and observing the phosphate precipitation processes that alter the dissolution process in an acidic environment. The temporal estimation of the hiatuses that guano can produce in stalagmites is of utmost importance for paleoenvironmental and paleoclimatic interpretations made from radiometric dating.

Relaciones entre subsidencia, sedimentación y edafogénesis en el Plioceno de la Cuenca de Madrid (Colmenar de Oreja, SE Madrid).

Relationships between subsidence, sedimentation and soil formation in Pliocene deposits of the Madrid Basin (Colmenar de Oreja, SE Madrid).

R. Martín-García[1], L. González-Acebrón[2], A. Rodríguez-Berriguete[1], A. Martín-Pérez[3], A. Košir[3] I. Armenteros[4], P. Huerta[4].

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense de Madrid, C/ Jose Antonio Novais, 12. Ciudad Universitaria. 28040 - MADRID rebecamg@ucm.es; arberriguete@ucm.es
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, C/ Jose Antonio Novais, 12. Ciudad Universitaria. 28040 – MADRID lgcebron@geo.ucm.es
3 Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Ljubljana, Slovenia, andreamp@zrc-sazu.si; adrijan@zrc-sazu.si
4 Dpto. Geología, Universidad de Salamanca, Pza. de la Merced S/N 37008 Salamanca. ilde@usal.es phuerta@usal.es

Palabras clave: Plioceno; deformación sinsedimentaria; edafogénesis y calcreta

Resumen

En la Mesa de Ocaña en la Cuenca de Madrid las calizas miocenas de la Unidad Superior presentan evidencias de karstificación y deformación. Sobre esta unidad, en algunas cubetas o depresiones formadas por la deformación de las calizas se acumulan rellenos de sedimentos clásticos de color rojo atribuidos al Plioceno. Estos rellenos muestran un dispositivo de abanico de capas que sugieren que la deformación de estos es sincrónica con la sedimentación. Los rellenos llegan a acumular unos 20 m de lutitas y areniscas rojas entre las que se intercalan varias capas de calcretas nodulares con abundantes rizocrecciones. Hacia la parte superior del relleno y hacia los límites de la depresión estas calcretas son laminadas, representando estadios más maduros. Fuera de las depresiones, sobre las calizas karstificadas, las calcretas alcanzan estadios más evolucionados que las anteriores, desarrollándose niveles de calcretas brechificadas constituidas por fragmentos de costras laminares. Se interpreta que mientras en las zonas de los rellenos las calcretas tienen un desarrollo incipiente debido a la sucesiva acumulación de sedimento, fuera de estas zonas la superposición continuada de procesos edáficos debida a la escasa sedimentación favorece el desarrollo de calcretas maduras.

Abstract

At the Ocaña Mesa in the Madrid Basin, the Miocene limestones of the Upper Unit show evidence of karstification and deformation. On top of this, in some depressions formed by the deformation of the limestones, red clastic deposits attributed to the Pliocene accumulated. These deposits display growth-strata patterns, suggesting that the deformation of the limestones was coeval with the sedimentation. The succession consists of up to 20 meters of red mudstones and sandstones, intercalated with several layers of nodular calcretes with abundant rhizocretions. Towards the upper part of the succession and towards the limits of the depression, these calcretes become more mature, developing laminar calcretes. Outside the depressions, on the karstified limestones, the calcretes reach more evolved stages occurring as brecciated calcretes constituted by fragments of laminar calcretes. It is interpreted that, while in the areas of the fillings, the calcretes have an incipient development due to the successive accumulation of clastic sediment, outside these areas, the continued overlap of pedogenic processes, due to the limited sedimentation, promotes the development of mature calcretes.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los proyectos de investigación: PID2022-14713NB-100 financiados por el MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/ y FEDER “Una manera de hacer Europa”.

Paleocauce del Mijares. Posible almacén geológico *offshore* en la plataforma marina de Castellón.

Paleochannel of the Mijares. Possible offshore geological storage on the Castellón marine platform.

J. F. Mediato[1], J. García-Crespo[1], P. Fernández-Canteli[1], I. Moreno-González[1], E. Berrezueta[1]

1.Instituto Geológico y Minero de España. (CN IGME-CSIC), Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid - jf.mediato@igme.es

Palabras clave: Paleocauce, almacén geológico, Plioceno, estratigrafía secuencial, sísmica

Resumen

La llanura costera de Castellón y su amplia plataforma marina son el resultado del relleno detrítico de una cuenca extensional, que se formó durante la apertura del Surco de Valencia a partir de fallas normales neógenas de direcciones NNE-SSO y NNO-SSE. La parte continental de la cuenca está rellena por depósitos aluviales y fluviales y se extiende hacia el este a una plataforma marina muy ancha que termina en un sistema deltaico con una tendencia general progradante. El proceso metodológico seguido abordó el estudio de los perfiles sísmicos de la exploración petrolera de los años 70 del siglo XX. Su interpretación muestra claramente dos conjuntos, limitados por una superficie erosiva de edad Messiniense: las formaciones de Arenas de Castellón y Arenas del Ebro. Dentro de este último paquete, se distinguen desde el Messiniense hasta la actualidad numerosas discontinuidades asociadas a las variaciones eustáticas que se han ido produciendo a lo largo de su formación. La discontinuidad UPR (Upper Pliocene Regional discontinuity), en el límite Plioceno-Cuaternario, está representada por un nivel erosivo asociado a una importante caída eustática. En ella podemos observar un amplio canal erosivo de hasta 20 km de ancho y más de 100m de potencia, que se extiende de oeste a este, encajado en los depósitos de plataforma y talud del plioceno y que está sellado en su techo por las facies progradantes del talud. Esta estructura, teniendo en cuenta la información disponible, se considera susceptible de ser utilizada como almacén de gases, ya sea H_2 o CO_2.

Abstract

The coastal plain of Castellón and its extensive marine platform are the result of the detrital infilling of an extensional basin, which formed during the opening of the Valencia Trough from Neogene normal faults with NNE-SSO and NNO-SSE orientations. The continental part of the basin is filled with alluvial and fluvial deposits and extends eastward to a very wide marine platform that ends in a deltaic system with a general progradational trend. The methodological process followed addressed the study of seismic profiles from oil exploration in the 1970s. Their interpretation clearly shows two sets, bounded by an erosive surface of Messinian age: the Castellón Sands and the Ebro Sands formations. Within this latter package, numerous discontinuities associated with eustatic variations have been distinguished from the Messinian to the present. The UPR (Upper Pliocene Regional discontinuity), at the Pliocene-Quaternary boundary, is represented by an erosive level associated with a significant eustatic fall. We can observe a wide erosive channel up to 20 km wide and over 100 m thick, which extends from west to east incised into Pliocene platform and slope deposits and is sealed at its roof by the progadational facies of the slope. This structure may be susceptible to be used as a storage facility for gases, either H_2 or CO_2.

Evaluación de las facies Buntsandstein para Almacenamiento geológico de CO_2 en la Cuenca del Ebro.

Buntsandstein facies evaluation for CO_2 geological storage in the Ebro Basin

J. F. Mediato [1], J. García-Crespo[1], R. de la Horra[2], P. Fernández-Canteli[1], J. Martínez-Martínez[1], I. Moreno.González[1], D. Marcos[2], M. Rueda [2], E. Berrezueta[1], D. García-Fernández[3]

1.Instituto Geológico y Minero de España. (CN IGME-CSIC), Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid - jf.mediato@igme.es
2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Fac. de CC. Geológicas, Universidad Complutense, C/ José Antonio Nováis, 12, 3ª planta, Of. 1C, 28040 Madrid - rhorraba@ucm.es
3 Repsol Exploración S.A Calle Méndez Álvaro, 44, 28045 (Madrid, Spain). david.garcia.fv@repsol.com

Palabras clave: CO_2, almacenamiento, Buntsandstein, estratigrafía, sedimentología.

Resumen

El proyecto PilotStrategy (https://pilotstrategy.eu/) tiene como objetivo evaluar las posibilidades de almacenamiento geológico de CO_2 en el área de Lopín, 40 Km al sureste de la ciudad de Zaragoza, Cuenca del Ebro. La estructura geológica consiste en una serie de *horst* y *grabens* (Ayala *et al*., 2023) que contienen un acuífero salino triásico a profundidades apropiadas para mantener el CO_2 en estado supercrítico. Este acuífero está formado por las facies Buntsandstein de las que los afloramientos más cercanos se encuentran en el Anticlinal de Montalbán (N de Teruel). El objeto de este trabajo es mostrar la distribución de las facies del Buntsandstein con el propósito de determinar cuáles son las unidades más propicias para la inyección y almacenamiento del CO_2 por sus características petrofísicas, porosidad y permeabilidad. Para ello se ha contado con un testigo de un sondeo profundo cercano a la estructura de almacenamiento (sondeo Chiprana-1) y los análogos de campo de Peñarroyas y Torre de Arcas. La combinación de herramientas tradicionales como es el levantamiento de columnas, junto al apoyo de fotogrametría o análisis radiométrico ha permitido distinguir las unidades con mejores características para el almacenamiento geológico de CO_2.

Abstract

The PilotStrategy Project (https://pilotstrategy.eu/) aims to evaluate the CO_2 storage suitability in the Lopín area, 40 Km SE of Zaragoza city (Spain) in the Ebro basin. In the area of interest horst and graben structure was described by Ayala *et al*. 2023. This structuration includes a deep Triassic saline aquifer, deep enough to keep the CO_2 in supercritical conditions. This aquifer is composed of the Buntsandstein facies whose nearest outcrops are located in the Montalban's anticline (N of Teruel province). The goal of this work is to show up the Buntsandstein facies distribution and eventually evaluate the characteristics of the appropriate ones for CO_2 injection and storage, according to their petrophysical characteristics (porosities and permeabilities). A preserved core from a nearby exploratory well (Chipriana-1) and the analogous outcrops (Peñasrroyas and Torre de las Arcas) have been studied. Therefore, the combined approach of this study includes field stratigraphic sections, photogrammetric surveys and radiometric surveys. Finally, we have been able to characterize the best facies for long term deep CO_2 storage.

Referencias

Ayala, C., Benjumea, B., Mediato, J. F., García-Crespo, J., Clariana, P., Soto, R., Rubio, F., Rey-Moral, C., Pueyo, E. L., Martín-León, J., García, A. G., Fernández-Canteli, P., Martínez-Orio, R. 2022. Developing a new innovative methodology to integrate geophysical techniques into characterization of potential CO_2 storage sites: Lopín structure (southern Ebro Basin, Spain). Geological Society, London, Special Publications, 528 (1). https://doi.org/10.1144/SP528-2022-70

Silicificación de madera en el Estefaniense superior del Pirineo suroriental

Wood silicification in the upper Stephanian of the south-eastern Pyrenees

E. Onetti[1], I. Cantarero[1], A. Tosal[2], C. Martín-Closas[2] y A. Travé[1]

1 Dpt. Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), 08028 Barcelona. e.onettimarti@student.utwente.nl, cantarero@ub.edu, atrave@ub.edu
2 Dpt. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), 08028 Barcelona. atosal@ub.edu, cmartinclosas@ub.edu

Palabras clave: Madera silicificada, diagénesis, Erillcastell, Carbonífero superior, Pirineos

Resumen

El relleno de la cuenca carbonífera de Erillcastell, en el Pirineo SE, comprende una sucesión de unidades aloestratigráficas con facies fluvio-lacustres, de abanico aluvial y rocas volcánicas. Se encuentran restos de madera silicificada únicamente en depósitos de relleno de canal fluvial y de *debris flow*. En las facies fluvio-lacustres se encuentran además cementos y nódulos de siderita. Los valores de $\delta^{18}O$ de la siderita indican un origen pedogenético, y el $\delta^{13}C$ podría sugerir la combinación de carbono del CO_2 derivado del suelo con carbono de origen volcánico y/o metanogénico. La silicificación de la madera comprendió diferentes estadios diagenéticos, comenzando por la mineralización de las paredes celulares, del lumen y de las cavidades de descomposición con cuarzo y calcedonia. En estadios posteriores, se formaron cementos de megacuarzo rellenando fracturas y reemplazando la madera silicificada. La microscopía de catodoluminiscencia apunta a una misma procedencia para todos los cementos silíceos, probablemente un fluido meteórico alcalino y rico en sílice, producto de la meteorización de las rocas volcánicas. La interacción con la materia orgánica acidificaba el fluido y facilitaba la precipitación de sílice, pero este proceso competía con la precipitación de siderita en microambientes reductores y ricos en CO_2. En el entorno fluvio-lacustre, la madera fue silicificada en el fondo de meandros abandonados antes de o durante su entierro superficial. En cambio, la presencia de madera silicificada en los conglomerados aluviales podría ser consecuencia de la remobilización de la madera ya silicificada desde otro emplazamiento, o bien resultado de la interacción entre los sedimentos y el agua poral en el propio depósito.

Esta investigación fue financiada por el proyecto DGICYT PID2021-122467NB-C22 y el grupo de investigación de “Geologia Sedimentària” (2021 SGR-Cat 00349).

Abstract

The infill of the Late Carboniferous basin of Erillcastell, SE Pyrenees, comprises a succession of allostratigraphic units containing fluvio-lacustrine facies, alluvial fan facies, and volcanoclastic rocks. Silicified wood remains are only found associated with fluvial channel and debris flow deposits. Siderite cements and nodules occur in the fluvio-lacustrine facies. The siderite’s $\delta^{18}O$ indicates a pedogenic origin, whereas $\delta^{13}C$ values may suggest the mixing of carbon from soil-derived CO_2 and carbon from methanogenic and/or volcanic origins. Wood silicification involved different diagenetic stages, starting with quartz and chalcedony mineralization of cell walls, lumina and rot cavities. In later stages, megaquartz cemented fractures and replaced silicified wood. Cathodoluminescence microscopy shows that all silica cements likely shared the same origin, probably a meteoric, alkaline, silica-rich fluid formed by weathering of volcanoclastic rocks. Interaction with organic matter acidified the fluid and facilitated silica cementation, but it might have competed with siderite cementation in areas where low Eh and high CO_2 prevailed. In the fluvio-lacustrine environment, driftwood became silicified at the bottom of abandoned meanders before or during shallow burial. The occurrence of silicified wood in alluvial conglomerates could be explained by the remobilisation of previously silicified wood from their original location, or the interaction between sediments and pore water in the debris flow deposit.

Cambios ambientales registrados en sedimentos del océano profundo del Noroeste del Atlántico asociados al incremento de icebergs de los últimos 50 años

Environmental changes recorded in deep-sea sediments of the Northwestern Atlantic associated with the increase of icebergs over the last 50 years

I. Pérez-Rodríguez[1]*, E. Papachristopoulou[2], C. Orejas[3], J. Wharton[2], y D. Thornalley[2]

1 Centro Oceanográfico de Vigo, Instituto Español de Oceanografía IEO-CSIC, Vigo, 36202, Pontevedra, irene.perez@ieo.csic.es
2 Department of Geography, University College London WC1E 6BT, UK
3Centro Oceanográfico de Gijón, Instituto Español de Oceanografía IEO-CSIC, Gijón 33212, Asturias

Palabras clave: sedimentos transportados por hielo, indicadores paleoceanográficos, foraminíferos, Atlántico Noroeste.

Resumen

Cada año, numerosos icebergs cruzan el Atlántico Noroeste aportando a extensas áreas del océano agua dulce y fría, además de sedimentos y nutrientes. El incremento en la cantidad de icebergs registrados en las últimas décadas (Bigg *et al.*, 2014) podría modificar estos parámetros en una región clave por su importancia en la regulación del clima a escala global (Thornalley *et al.*, 2018). En este estudio hemos analizado un testigo de sedimentos extraído a 1450m de profundidad, al este de la isla de Terranova. Los análisis muestran un aumento en la cantidad de sedimentos transportados por icebergs durante las últimas 5 décadas, al mismo tiempo que se registran importantes cambios en las comunidades de microfósiles. Así, se observan incrementos relativos de los organismos de esqueleto silíceo, tanto plantónicos como bentónicos, y alteraciones en las asociaciones de foraminíferos bentónicos. Nuestros resultados sugieren que la creciente llegada de icebergs estaría induciendo modificaciones en 1) la productividad primaria, 2) el tipo de nutrientes que llega al fondo marino, y, 3) potencialmente, las características hidrográficas de las masas de agua de la zona.

Abstract

Numerous icebergs cross the Northwest Atlantic each year, supplying to vast ocean areas fresh and cold water, as well as sediments and nutrients. The increase in observed icebergs in recent decades (Bigg *et al*., 2014) could alter these parameters in a region crucial for its role in global climate regulation (Thornalley et al., 2018). In this study, we analysed a sediment core extracted at 1450m water-depth, to the east of the island of Newfoundland. The analyses show an increase in the amount of ice rafted debris over the last 5 decades, concurrently with significant changes in the microfossil communities. Specifically, relative increases in siliceous skeletal organisms, both planktonic and benthic, are observed, along with alterations in benthic foraminifera associations. Our findings suggest that the increasing arrival of icebergs may induce shifts in 1) primary productivity, 2) type of nutrients reaching the seafloor, and 3) potentially, hydrographic characteristics of the water masses of the area.

Referencias

Bigg, G.R., Wei, H.L., Wilton, D.J., Zhao, Y., Billings, S.A., Hanna, H. y Kadirkamanathan, V (2014). *Proceedings of the Royal Society*, doi: 1 0.1098/rspa.2013.0662

Thornalley, D.J., Oppo, D.W., Ortega, P., Robson, J.I., Brierley, C.M., Davis, R., Hall, I.R., Moffa-Sanchez, P., Rose, N.I., Spooner, P.T., Yashayaev, I., y Keigwin, L.D. (2018). *Nature*, doi: 10.1038/s41586-018-0007-4

La superficie de rubefacción asociada a la discordancia angular intra Ediacárica en el límite meridional de la actual Zona Centroibérica.

The rubefaction surface associated to the intra-Ediacaran angular unconformity at the southern limit of the current Central Iberian Zone

A. P. Pieren[1], M. Rodríguez-Martínez[1,] S. López Andrés[2]

1 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid. apieren@ucm.es; martarm@geo.ucm.es
2 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid. antares@ucm.es

Palabras clave: Ediacárico, Cadomiense, Paleoalteración, Zona Centroibérica, Badajoz.

Resumen

El registro sedimentario Ediacárico-Terreneuviense de la parte meridional de la Zona Centroibérica del Macizo Ibérico se depositó en una cuenca de trasarco en el margen occidental de Gondwana (Fuenlabrada *et al.* 2020). El Supergrupo Alcudiense inferior-Domo Extremeño (Álvaro *et al.* 2019), compuesto por sedimentos principalmente turbidíticos, sufrió un laxo plegamiento no esquistoso Cadomiense. En discordancia angular y erosiva se apoyan los materiales del "Alcudiense superior", depósitos continentales y/o litorales, de borde de cuenca, actualmente al N del batolito varisco de los Pedroches (Pieren, 2000). El período durante el cual se produjo la exposición subaérea y posterior erosión se puede estimar a partir del contenido en zircones de las areniscas entre los 560 y 550 Ma. En este trabajo se profundiza en el significado de la intensa superficie de paleoalteración y rubefacción que afecta bajo la discordancia cadomiense al Supergrupo Alcudiense inferior-Domo Extremeño en diversas localidades (Badajoz y Ciudad Real) y su importancia en las reconstrucciones paleogeográficas.

Abstract

The Ediacaran-Terreneuvian sedimentary record of the southern part of the Central Iberian Zone of the Iberian Massif crop out in a back-arc basin on the western margin of Gondwana (Fuenlabrada *et al.* 2020). The Lower Alcudian-Extremadura Dome Supergroup (Álvaro *et al.* 2019), composed of mainly turbiditic sediments, underwent a smooth non-schistose Cadomian folding. An angular and erosive unconformity occurs below the "Upper Alcudian" rocks, corresponding to continental and/or littoral deposits, at the edge of the basin, to the N of the Variscan Los Pedroches batholith (Pieren, 2000). The period during which subaerial exposure and subsequent erosion occurred can be estimated from the zircon content in the sandstones between 560 and 550 Ma. This paper explores into the significance of the intense surface of paleoalteration and rubefaction that affects the Lower Alcudian Supergroup-Extremaduran Dome rocks in several localities (Badajoz and Ciudad Real provinces) and its importance in paleogeographic reconstructions.

Referencias

Álvaro, J. J., Cortijo, I., Jensen, S., Lorenzo, S., Palacios, T. and Pieren, A.P. (2019). Updated stratigraphic framework and biota of the Ediacaran and Terreneuvian in the Alcudia-Toledo Mountains of the Central Iberian Zone, Spain. *Estudios Geológicos*, 75 (2), e093.

Fuenlabrada J.M., Arenas R., Rojo-Pérez E., Sánchez Martínez S., Díez Fernández R., Pieren A.P., Pereira M.F., Chichorro M. y Silva J.B. (2020) Geochemical and isotopic (SmeNd) provenance of Ediacaran-Cambrian metasedimentary series from the Iberian Massif. Paleoreconstruction of the North Gondwana margin. *Earth-Science Reviews*, 201. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103079.

Pieren Pidal, A.P. (2000). Las sucesiones ante ordovícicas de la región oriental de la provincia de Badajoz y área contigua de la de Ciudad Real. PhD, Universidad Complutense, Madrid; eprint: http://eprints.ucm.es/5512/

Naturaleza del basamento y fisiografía de cuenca como factores de control en la variabilidad sedimentaria y petrológica de areniscas marino-someras transgresivas (Eoceno superior, Cuenca del Ebro).

Basement nature and basin physiography controlling sedimentary and petrologic variability of shallow-marine transgressive sandstones (upper Eocene, Ebro Basin).

M. Poyatos-Moré[1], D. Gómez-Gras[1], J. Fusté[1], O. Fité[1], M. Rambla[1], N. Guerrero[1], M. Díaz[1], X. Solé[1] y C. Puigdefàbregas[1]

1 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Vallés, Barcelona. miquel.poyatos@uab.cat

Palabras clave: basamento, areniscas, marino-somero, transgresivas, Cuenca del Ebro.

Resumen

La Formación Areniscas de Folgueroles, del Eoceno superior de la Cuenca del Ebro, es parte de una sucesión de facies aluviales a marino-someras, depositadas sobre un alto de basamento alterado. Para su caracterización, se han medido 12 series estratigráficas, que se han muestreado y correlacionado a lo largo de 10 km. La unidad tiene 6-80 m de potencia, y su composición es dominantemente granítica, con componentes metamórficos y sedimentarios menores. Muestra 3 subunidades cartografiables: 1) areniscas de grano fino-medio, con estratificación cruzada de pequeña escala, abundante glauconita y bioclastos; 2) areniscas de grano medio-muy grueso, con estratificación cruzada planar, tangencial o en surco de gran escala; 3) areniscas de grano muy fino bioturbadas. La superficie erosiva y unidad inferior se interpretan como resultado de una reducción en el balance acomodación/aporte sedimentario, seguida de un aumento de acomodación y desarrollo de las unidades media y superior, más extensas, depositadas a lo largo de una línea de costa de alta energía, con retrabajamiento costero de las facies aluviales adyacentes. La sucesión estudiada termina en *onlap* sobre el basamento granítico/metamórfico Paleozoico hacia el sureste, y sobre un paleorelieve karstificado Triásico hacia el suroeste, donde las Areniscas de Folgueroles son sustituidas por calcarenitas bioclásticas. Esto sugiere que el desarrollo de las Areniscas de Folgueroles fue controlado por la naturaleza y tipo de basamento, ya que sólo se observan en aquellas zonas cercanas a donde el basamento granítico fue expuesto en superficie. El fuerte retrabajamiento a lo largo de la línea de costa que sugieren sus estructuras fue probablemente el resultado de un estrechamiento de la cuenca, constreñida por los cabalgamientos pirenaicos al norte, y los altos de basamento al sur.

Abstract

The Folgueroles Sandstone Formation, from the upper Eocene of the Ebro Basin, is part of an alluvial to shallow-marine succession, which overlies a weathered basement high. For its characterization, 12 sedimentary logs were measured, sampled, and correlated across 10 km. The unit is 6-80 m thick, and its composition is dominantly granitic, with minor metamorphic and sedimentary components. It includes 3 mappable packages: 1) fine/medium-grained sandstones, with small-scale cross bedding, abundant glauconite and reworked bioclasts; 2) medium/very coarse-grained sandstones, with large-scale planar, tangential and trough cross-bedding; 3) fine-grained bioturbated sandstones. We interpret the basal erosive surface and lower package formed during a reduction in the accommodation/sediment supply ratio, followed by an increase in accommodation and development of the intermediate and upper packages, more extensive, and deposited along a dominantly high-energy coastline, with alongshore reworking of nearby alluvial deposits. The studied succession onlaps the Paleozoic granitic/metamorphic basement to the southeast, and a Triassic karstified paleorelief to the southwest, where the Folgueroles Sandstones are replaced by bioclastic calcarenites. This suggests the development of the Folgueroles Sandstones was controlled by the basement configuration, as they are only found near the areas where the weathered granitic basement was exposed. The strong alongshore reworking suggested by their sedimentary structures was possibly resulting from a narrowing of the basin, constricted by the Pyrenean frontal thrust in the north, and the basement highs in the south.

Análisis estratigráfico de una sucesión mixta clástica-carbonatada en una cuenca Paleógena controlada por la tectónica (Este de Omán)

Stratigraphic analysis of a mixed clastic-carbonate succession in a tectonically-controlled Paleogene basin (Eastern Oman)

M. Poyatos-Moré[1], I. Midtkandal[2], V. Vicedo[3], R. Robles-Salcedo[3], P.T. Osmundsen[4] and A. Braathen[2]

1 Departamento de Geologia, Universidad Autónoma de Barcelona, Cerdanyola del Valles, Barcelona. miquel.poyatos@uab.cat
2 Department of Geociencias, University of Oslo, Oslo, Norway
3 Museo de Ciencias Naturales de Barcelona, Barcelona, Spain
4 NTNU, Trondheim, Norway

Palabras clave: estratigrafía, tectónica, sucesión mixta clástica-carbonatada, Paleógeno, Omán.

Resumen

En este estudio presentamos el análisis estratigráfico y estructural de una sucesión Paleógena mixta clástica-carbonatada en la cuenca de Ibra, ubicada en el este de las Montañas de Omán. El depocentro se extiende a lo largo de 375 km², y expone una sucesión sedimentaria de más de 1.5 km de espesor. La sucesión empieza con capas rojas del Cretácico superior (Fm Qalah) dispuestas de forma discordante sobre la Ofiolita de Semail, y que muestran una variación lateral de espesor (de pocos m a decenas de m) debido a su acumulación en mini-cuencas extensionales. La unidad superior tiene más de 200 m de espesor, y la forman calizas de plataforma interna del Paleoceno superior (Fm Jafnayn), que pasan vertical y lateralmente a calcarenitas y calizas margosas de *lagoon*, y en algunas zonas terminan en *onlap* sobre el basamento ofiolítico. En el norte del depocentro la serie del Paleoceno superior está truncada por más de 600 m de areniscas deltaicas de grano grueso, del Eoceno inferior, que forman una discordancia angular de bajo ángulo. En el sureste, la sucesión está expandida y bien preservada en un monoclinal de bloque superior asociado a una falla extensional de gran escala; en esta zona las calizas del Paleoceno superior pasan verticalmente a margas de *lagoon* seguidas de más de 500 m de calizas bioclásticas y calcarenitas del Eoceno inferior (Fm Seeb), en las que se observan discordancias progresivas. Éstas están sucedidas por depósitos siliciclásticos costeros, que pasan lateral y verticalmente a depósitos carbonatados/evaporíticos (Fm Rus). Este estudio propone por primera vez un marco tectono-estratigráfico para el depocentro de Ibra, en el que se identifican patrones estructurales, como despegues extensionales y pliegues asociados, que sugieren una reactivación tectónica durante del Paleoceno-Eoceno, afectando a plataformas carbonatadas, que recibían materiales siliciclásticos de unidades más antiguas, expuestas en relieves cercanos.

Abstract

In this study we present the stratigraphic and structural analysis of a Paleogene mixed clastic-carbonate succession in the Ibra Basin, located in the eastern Oman Mountains. The depocentre extends over 375 km^2 and exposes a >1.5 km-thick sedimentary succession. The succession starts with upper Cretaceous red beds (Qalah Fm) which sit unconformably over the Semail Ophiolite, and show lateral thickness changes (from few m to tens of m) due to their accumulation in extensional minibasins. The overlying unit is less than 200 m-thick, and it is composed by upper Palaeocene inner-platform limestones (Jafnayn Fm), grading vertically and laterally into lagoonal marly limestones and calcarenites, in some places onlapping the ophiolitic basement. In the north of the depocentre, the upper Paleocene is truncated by more than 600 m of early-Eocene coarse-grained deltaic sandstones, forming a low-angle angular unconformity. In the southeast, the succession is expanded and well preserved in a hanging-wall monocline associated with a large-scale extensional fault; in this area the upper Palaeocene limestones grade vertically into lagoonal marlstones and to more than 500 m of lower Eocene bioclastic limestones and calcarenites (Seeb Fm), which display progressive unconformities. These are vertically replaced by siliciclastic-dominated coastal deposits, passing laterally/vertically into carbonate/evaporitic deposits (Rus Fm). This study proposes for the first time a tectono-stratigraphic framework for the Ibra depocentre, in which structural patterns, such as extensional detachments and associated folds, suggest a tectonic reactivation during the Palaeocene-Eocene, affecting carbonate platforms with siliciclastic material partly sourced by older unroofed units from nearby uplifting terrains.

Caracterización de diques clásticos en la Formación Allen (Cretácico Superior) de la Cuenca Neuquina (Argentina)

Clastic dykes characterization in the Allen Formation (Upper Cretaceous) of the Neuquén Basin (Argentina)

M. Pozo[1], T. Musso[2,3], G. Pettinari[2,3], M. Hernández[2,4] y A. Martínez[5]

1 Departamento de Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049, Madrid, España. manuel.pozo@uam.es
2 Departamento de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina. gisela.pettinari@probien.gob.ar; telma.musso@probien.gob.ar; marianohz@gmail.com
3 Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Energías Alternativas, PROBIEN (CONICET-UNCo), Universidad Nacional Del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina.
4 Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Centro Regional Gral. Roca, Río Negro, Argentina.
5 Tolsa Minerales La Patagonia S.A., Parque Industrial, Cinco Saltos 8303, Río Negro, Argentina. alexis.martinez@tolsa.com

Palabras clave: bentonitas, diques clásticos, Cretácico.

Resumen

Una de las características de la Formación Allen en la cuenca Neuquina (Argentina) es la existencia de importantes yacimientos de bentonita de interés económico. Las capas de bentonita y facies asociadas se presentan cortadas por diques clásticos que presentan espesores que oscilan entre 1 y 10 cm. Se ha estudiado la mineralogía y textura de 6 diques clásticos en tres canteras de bentonita en las proximidades del Lago Pellegrini. El estudio mineralógico indica que los diques presentan un contenido en filosilicatos (minerales de la arcilla y micas) que superan el 30%, con contenidos en cuarzo variables que pueden ocasionalmente alcanzar el 52% y en menor contenido (hasta 21%) feldespatos con predominio de las plagioclasas sobre el feldespato potásico. En indicios (<5%) se han identificado clinoptilolita-heulandita, cristobalita, yeso y calcita. El mineral de la arcilla predominante es esmectita alumínica. El estudio petrográfico muestra una textura claramente clástica con diversos tipos de inclusiones, localmente orientación de componentes, detectándose la presencia de minerales pesados como turmalina, zircón y apatito, en algunas muestras la presencia de bioclastos circulares y porosos que se han interpretado como diatomeas. Se propone un modelo genético para explicar el origen y deformación de los diques clásticos dentro del contexto sedimentológico. La comparación con las características de las rocas encajantes afectadas por los diques indicaría que el relleno de los mismos se desarrolla predominantemente en la vertical con sentido descendente, cortando a las bentonitas y facies asociadas.

Abstract

One of the characteristics of Allen Formation located in Neuquén Basin (Argentina) is the existence of important bentonite deposits of economic interest. The bentonite beds and associated facies are cut by clastic dykes with thicknesses ranging from 1 to 10 cm. Six clastic dykes have been textural and mineralogically studied in three bentonite quarries in the vicinity of Pellegrini Lake. The mineralogical study indicates that the dykes have a phyllosilicate (clay minerals and micas) content exceeding 30%, with variable quartz contents that can occasionally reach 52% and a lower content (up to 21%) of feldspars with a predominance of plagioclase over potassium feldspar. In trace amounts (<5%) clinoptilolite-heulandite, cristobalite, gypsum and calcite have been identified. The predominant clay mineral is Al-smectite. The petrographic study shows a clearly clastic texture with different types of inclusions and locally component orientation, detecting the presence of heavy minerals such as tourmaline, zircon and apatite, in some samples the presence of circular and porous bioclasts that have been interpreted as diatoms. A genetic model is proposed to explain the origin and deformation of the clastic dykes within the sedimentological context. Comparison with the features of the host rocks affected by the dykes could indicate that the infilling of the dykes develops predominantly vertically downwards, cutting the bentonites and associated facies.

Resedimentación en taludes carbonatados en un contexto tectónicamente activo (Prebético Mioceno, Cordillera Bética, S España)

Carbonate slope re-sedimentation in a tectonically-active setting (Miocene Prebetic, Betic Cordillera, S Spain)

Á. Puga-Bernabéu[1], T. Alberjón-Peñas[1], S. García-Pozo[1], J. Aguirre[1], J.C. Braga[1]

1 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18002 Granada. angelpb@ugr.es; tomasalberjon@ugr.es; sergiogpozo@correo.ugr.es; jaguirre@ugr.es; jbraga@ugr.es

Palabras clave: Plataforma carbonatada, arquitectura estratigráfica, megabrecha, canales submarinos, Castril

Resumen

Los carbonatos redepositados que afloran en el área de Castril (provincia de Granada, sur de España) reflejan el colapso de un margen de plataforma carbonatada que tuvo lugar en la Zona Prebética de la Cordillera Bética durante el Langhiense-Tortoniense temprano, el cual constituye un periodo de importante levantamiento tectónico de la cordillera. Se han identificado tres unidades redepositadas a partir de la cartografía geológica, levantamiento de secciones estratigráficas, fotogrametría con dron y análisis de macro y microfacies. La unidad inferior corresponde a una megabrecha calcárea de >100 m de espesor situada discordantemente sobre las margas del basamento Cretácico. La unidad intermedia tiene un espesor de hasta 25 m e incluye 1) packstones de grano fino y medio con centenares de metros de continuidad lateral y 2) packstones de grano medio y rudstones de grano fino con cantos y bloques en la base organizados en cuerpos canalizados de varias decenas de metros de anchura y varios metros de potencia. La unidad superior alcanza los 300 m de espesor e incluye margas con intercalaciones de material redepositado similar al de las unidades inferior e intermedia.

El principal episodio de colapso del margen de la plataforma se interpreta como una avalancha de rocas submarina originada en un margen de plataforma litificado de fuerte pendiente. Posteriormente, el depósito tuvo lugar en abanicos al pie del talud y canales submarinos sellados por sedimentos hemipelágicos con remobilización intermitente. La existencia de un margen de acreción litificado y de fuerte pendiente probablemente precondicionó los materiales para su colapso debido al movimiento de fallas y actividad sísmica.

Abstract

The resedimented carbonates exposed in the Castril area (Granada province, S Spain) reflect the collapse of a carbonate platform margin that took place in the Prebetic Zone of the Betic Cordillera during the Langhian-early Tortonian, a period of important tectonic uplift of the Cordillera. Three main redeposited units were identified based on fieldwork mapping, stratigraphic logging, drone photogrammetry and macro- and microfacies analyses. The lower unit is a >100 m thick calcareous megabreccia lying unconformably over the Cretaceous marls of the basement. The middle unit is up to 25 m thick and consists of 1) fine- to medium-grained packstones laterally continuous over several hundreds of metres and 2) channelized medium-grained packstones and fine-grained rudstones with basal cobbles and boulders arranged in sedimentary bodies tens of metres wide and several metres thick. The upper unit is up to 300 m thick and includes marls with intercalated redeposited materials similar to those of the lower and middle units.

The main episode of margin collapse is interpreted as a submarine rock avalanche originating from a steep, lithified carbonate platform margin. Subsequent deposition occurred in submarine slope aprons and channels sealed by hemipelagic sedimentation punctuated with sediment remobilization similar to previous events. A high-relief and lithified accretionary margin likely preconditioned the materials to fail due to fault movements and seismic shocks.

Modelos deposicionales de estrechos dominados por mareas en la Cordillera Bética

Depositional models of tidal-dominated straits in the Betic Cordillera

Á. Puga-Bernabéu[1], F. Sola[2] y J.C. Braga[1]

1 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18002 Granada. angelpb@ugr.es; jbraga@ugr.es
2 Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, 04120 Almería. fesola@ual.es

Palabras clave: estrechos, estratificación cruzada de gran escala, dinámica sedimentaria, expansión de flujo, sedimentos mixtos carbonatados-siliciclásticos

Resumen

Los estrechos son sistemas deposicionales angostos limitados por áreas emergidas que conectan cuencas más amplias. La circulación de agua y corrientes en los estrechos está impulsada por diferentes procesos, de los cuales las mareas dejan la impronta más notoria en el registro sedimentario. A pesar de ello, los modelos sedimentarios de estrechos dominados por la acción mareal en el registro fósil son escasos. Los estrechos que se formaron en la Cordillera Bética durante el Neógeno desempeñaron un papel fundamental en el intercambio de masas de aguas entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo, pero también hubo estrechos que conectaron otras cuencas más pequeñas en un régimen micromareal.

Los depósitos mixtos carbonatados-siliciclásticos de los estrechos de Zagra (Tortoniense inferior) y Río Alías (Plioceno inferior) registran el efecto de la amplificación de las corrientes mareales debido a la reducción de la sección transversal, el cual dio lugar a acumulaciones potentes de cuerpos con estratificación cruzada de gran escala (hasta 30 m de altura) formados principalmente por la migración en sentido opuesto de dunas con crestas ligeramente sinuosas simples y compuestas. La distribución de facies a lo largo de estos dos estrechos indica una variabilidad espacial de ambientes de depósito que difiere de los modelos clásicos establecidos para los estrechos mareales en el registro fósil, especialmente debido a la existencia de depresiones a lo largo de los estrechos. La expansión de flujo debido al desconfinamiento dio lugar a la formación de "deltas ligados a constricciones". El aumento de la sección transversal de los estrechos dio lugar a la deceleración de las corrientes mareales sobre las depresiones, donde la energía de las corrientes se atenuaba y no se generaron dunas. En ambos estrechos, el levantamiento tectónico progresivo de la región dio lugar a su reducción y cierre.

Abstract

Straits are narrow depositional systems flanked by emergent land areas that connect wider basins. Water circulation and currents in straits can be driven by different processes of which tides are the most common process identified in their sedimentary record, although sedimentary models for ancient tidal-dominated straits are still relegated to a limited number of examples. Straits formed in the Betic Cordillera during the Neogene played an important role in the water exchange between the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea, but they also connected smaller basins under a microtidal regime.

The mixed carbonate-siliciclastic deposits of the lower Tortonian Zagra Strait and the Lower Pliocene Río Alias Strait record the effect of tidal current amplification due to the restriction of the cross-sectional area, producing thick accumulations of large cross-stratified bodies up to 30 m thick formed mainly by the opposite migration of three-dimensional simple and compound dunes. Facies distribution along both straits displays a spatial environmental variability that somehow differs from the classic model for ancient tidal-dominated straits, particularly due to deep-water depressions along the straits. Flow expansion due to unconfinement led to the deposition of 'constriction-related deltas'. Enlargement of the cross-sectional strait area led to tidal current deceleration over the depression where tidal current energy was attenuated and dunes were not generated. Progressive tectonic uplift led to the depletion and closure of both straits.

La actividad paleosísmica del yacimiento de las Hoyas, Cretácico Inferior (Cuenca, España)

Paleoseismic activity of the Las Hoyas site, Lower Cretaceous (Cuenca, Spain)

M.A. Rodríguez-Pascua[1], J.F. Mediato[1], A.D. Buscalioni[2] y J. Marugán Lobón[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003-Madrid,. España. r.perez@igme.es; jf.mediato@igme.es
2 Departamento Biología, Universidad Autónoma de Madrid, CIPb, 28049-Madrid, España. delgadinab@gmail.com; jesus.marugan@uam.es

Palabras clave: medio palustre, deformación sinsedimentaria, sismita, Cretácico Inferior, Las Hoyas.

Resumen

Las excepcionales condiciones de afloramiento y conservación del yacimiento paleontológico de Las Hoyas (Barremiense) han permitido identificar un total de 11 estructuras de deformación sinsedimentaria que se han interpretado como sismitas. Estas se localizan dentro de los 8 m de columna sedimentaria que contiene los primeros metros de serie donde se encuentran gran parte de los frentes de excavación. La buena conservación de las laminaciones asociadas a los tapetes microbianos que se desarrollaron en este medio acuático han facilitado la observación de estas deformaciones. Estas sismitas están constituidas fundamentalmente por niveles de mezcla (*mixed layers*) y deslizamientos subacuáticos (*slumps*) que afectaron a los tapetes microbianos que recubrían la superficie del fondo del humedal en el momento en el que se generaron. Además, también se han observado 8 niveles con estructuras asociadas a deformación frágil y 5 con deformación dúctil-frágil, constituidos por fallas normales y *loop bedding*. Estas deformaciones no se han podido definir como sismitas, pero si indican la importante actividad tectónica a la que estaba sometida esta cuenca sedimentaria. Estas sismitas y estructuras de deformación ahora también forman parte de la rica historia geológica de este yacimiento paleontológico.

Abstract

The exceptional outcrop and preservation conditions of the palaeontological site of Las Hoyas (Barremian) have made it possible to identify 11 soft-sediment deformation structures (SSDS) that have been interpreted as seismites. These are located within the 8 m of sedimentary record containing the beginning of the palustrine record where the excavation fronts are located. The good preservation of the laminations, associated with the microbial mats that developed in this aquatic environment, has facilitated the observation of these SSDS. These seismites are mainly mixed layers and underwater slumps, that affected the microbial mats that covered the surface of the bottom of the wetland at the time they were generated. In addition, 8 levels with SSDS associated with brittle deformation and 5 with brittle-ductile deformation, consisting of normal faults and loop bedding, have also been observed. These deformations could not be defined as seismites, but they do indicate the important tectonic activity to which this sedimentary basin was subjected. These seismic and deformation structures are now also part of the rich geological history of this palaeontological site.

Procedencia y evolución de los sistemas sedimentarios en el extremo oeste de la cuenca de Jaca-Pamplona (Eoceno medio- Mioceno inferior)

Provenance and evolution of the sedimentary systems in the western margin of the Jaca-Pamplona basin (middle Eocene-lower Miocene)

M. Roigé[1], X. Coll[1], D. Gómez-Gras[1], A. Teixell[1], D. Stockli[2], S. Boya[1], M. Poyatos-Moré[1] y J. Fusté[1]

1 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain
2 The University of Texas at Austin, Department of Geological Sciences, Austin, TX 78712, USA

Palabras clave: petrografía, procedencia, Pirineos, área fuente, análisis de cuencas.

Resumen

Durante el Eoceno, la cuenca de Jaca-Pamplona (cuenca Surpirenaica) registra el abandono de la sedimentación marina y su paso a condiciones plenamente continentales que dominan en el resto de la sucesión sedimentaria hasta el Mioceno inferior. La sedimentación continental se produce en un momento clave de evolución de la cuenca, como es la interrupción de su conexión con el océano Atlántico, y en los estadios finales de su relleno sedimentario, fuertemente controlado por la tectónica del orógeno pirenaico.

Con el objetivo de identificar las señales de procedencia de los distintos sistemas sedimentarios del Eoceno medio al Mioceno inferior de esta cuenca, presentamos nuevos datos sobre las características composicionales de estos depósitos. Para conseguirlo, hemos realizado un estudio multi-método, en el que hemos combinado el análisis petrográfico de las areniscas con el análisis geocronológico y termocronológico de los circones detríticos contenidos en los depósitos clásticos. Los resultados indican la existencia de áreas fuentes con características bien diferenciadas que permiten identificar las siguientes señales de procedencia: (1) sistema axial con área fuente situada en el Pirineo central, (2) sistema transversal con área fuente en el Pirineo occidental-central, y (3) sistema transversal con área fuente en los macizos Vascos. Estas señales de procedencia permiten establecer la evolución de las áreas fuente en el tiempo, así como la dinámica de los distintos sistemas sedimentarios durante las fases finales de relleno y exhumación de la cuenca.

Abstract

During the Eocene, the Jaca-Pamplona basin (South Pyrenean basin) records the abandonment of the marine sedimentation and its replacement by full terrestrial environments, which prevail until early Miocene times. The terrestrial sedimentation takes place in a crucial stage of the basin evolution, as it is the interruption of its connection with the Atlantic Ocean, and the final stages of basin infill, highly controlled by the tectonics of the Pyrenean orogen.

We present new compositional data of these deposits with the purpose of identifying the provenance signatures. To achieve this goal, we have performed a multi-method approach consisting on combining sandstone petrography with geochronological and thermochronological analysis in the detrital zircon populations contained in the clastic deposits. The results have allowed to identify several distinct source areas with the following provenance signatures: (1) an axially drained system fed from source areas located in the central Pyrenees, (2) a transverse drained system with source areas located in the west-central Pyrenees, and (3) a transverse drained system derived from source areas located in the Basque massifs. These provenance signatures allow to infer the source areas evolution during time, as well as the dynamics of the sedimentary systems during the last stages of infill and exhumation of the South Pyrenean basin.

Caracterización, evolución e interacción de áreas fuente en la cuenca de Tremp-Graus durante el Eoceno inferior (Pirineos)

Characterization, evolution and interaction of source areas from the Tremp-Graus basin during the early Eocene (Pyrenees)

M. Roigé[1], D. Gómez-Gras[1], J. Fusté[1], M. Poyatos-Moré[1], S. Boya[1], C. Puigdefàbregas[2] y A. Teixell[1]

1 Departament de Geologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain
2 Departament of de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès, S/N, 08028, Barcelona, Spain

Palabras clave: procedencia, petrografía, sistemas sedimentarios, Pirineos, sedimentología.

Resumen

La cuenca Surpirenaica central es ampliamente conocida por la calidad de su registro sedimentario, el cual permite investigar las relaciones entre la tectónica, la sedimentación y el clima en un contexto tectónico compresivo. Uno de los sectores de esta cuenca, conocida como cuenca de Tremp-Graus, registra la interacción de diferentes sistemas sedimentarios axiales y transversales en su tránsito de ambientes continentales a marinos someros y finalmente turbidíticos profundos (cuencas de Aínsa y Jaca) durante el Eoceno inferior.

En este estudio presentamos nuevos resultados petrográficos de estos sistemas sedimentarios que permiten establecer la evolución de las distintas áreas fuente pirenaicas e identificar las señales de procedencia asociadas a ellas. Estos resultados indican la presencia de tres áreas fuente principales que aportan sedimento de forma diferencial tanto en el tiempo como en el espacio. La caracterización de estas tres áreas fuente se establece a partir de tres petrofacies principales, las cuáles permiten distinguir un área fuente dominada principalmente por materiales siliciclásticos del Paleozoico, otra área fuente dominada por materiales de la cobertera Mesozoica y rocas carbonáticas Paleozoicas, y un área fuente con granitos del Paleozoico y rocas de la cobertera Mesozoica y Cenozoica.

La caracterización de estas señales de procedencia en los distintos sistemas aluviales más proximales permite identificar la preservación y transmisión de estas señales a sus equivalentes más distales, y de esta manera permite establecer como los diferentes sistemas axiales y transversales confluyen e interaccionan durante la evolución de la cuenca de Tremp-Graus.

Abstract

The South Pyrenean central basin is widely known by the quality of its sedimentary record, which allows to investigate the interaction between tectonics, sedimentation and climate in a compressive setting. The Tremp-Graus basin constitutes a portion of the South Pyrenean basin, and records the interaction between different axial and transverse sedimentary systems which evolve from terrestrial to shallow-marine and finally deep-water environments (Aínsa and Jaca basins) during the early Eocene.

In this work we provide new sandstone petrography results of these sedimentary systems, which allow to determine the evolution of the Pyrenean source areas and to identify their associated provenance signatures. The results indicate the existence of three main source areas whose relative contribution to the basin changes through time and space. The characterization of the three source areas is defined by three main petrofacies, which allow to distinguish a source area dominated by Paleozoic siliciclastic rocks, another source area dominated by Mesozoic sedimentary cover rocks and Paleozoic carbonate rocks, and a source area mainly constituted by Paleozoic granites and Mesozoic and Cenozoic cover rocks.

The characterization of these provenance signatures in the several proximal alluvial systems allows to identify the preservation and propagation of the signal downdip, and thus determine how the different axial and transverse systems merge and interact during the evolution of the Tremp-Graus basin.

Análisis de las facies deltaicas del complejo del Sant Llorenç del Munt (Eoceno, cuenca del Ebro, NE de España) como análogos para el almacén de CO_2 e H_2 verde: resultados preliminares

Analysis of the deltaic facies analysis of the Sant Llorenç del Munt complex (Eocene, Ebro basin, NE Spain) as analogues for CO_2 and green H_2 storage: preliminary results

E. Rua-Alkain[1], M. Douet[1], L.M. Yeste[2], M. López-Blanco[1,3], C. Viseras[2] y P. Cabello[1,3]

[1] Dept. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. eruaalka7@alumnes.ub.edu, mdouetga7@alumnes.ub.edu; m.lopezblanco@ub.edu, pcabello@ub.edu
[2] Sedimentary Reservoir Workgroup (SEDREGROUP). Dpto. Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada. lmyeste@ugr.es, viseras@ugr.es
[3] UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona

Palabras clave: Petrología, porosidad, areniscas, delta, almacenamiento CO_2 + H_2.

Resumen

El proyecto coordinado SOSGAS (Impacto de la heterogeneidad sedimentaria de reservorios en el geo-almacenamiento SOStenible de GAS), de las Universidades de Barcelona y Granada, tiene por objetivo explorar propiedades geológicas particulares que están relacionadas con la inyección de CO_2 y H_2 verde en almacenes geológicos naturales. Para ello, es necesario evaluar la calidad del reservorio, sus propiedades petrofísicas y su historia diagenética. En este trabajo presentamos un análisis preliminar de la calidad de las areniscas del frente deltaico (principal candidato a roca almacén) y plataforma mixta en el análogo de reservorio correspondiente al abanico costero de Sant Llorenç del Munt (Eoceno, Cuenca del Ebro). Se han estudiado 10 láminas delgadas bajo microscopio óptico correspondientes a muestras de rocas en diferentes posiciones estratigráficas, con el fin de evaluar cómo varían espacialmente las propiedades petrológicas y la porosidad óptica según su carácter proximal o distal, tanto en cortejos regresivos como en transgresivos. Este análisis será completado con el estudio de muestras de subsuelo de sondeos perforados tras el afloramiento previstos en el marco del proyecto SOSGAS. Los resultados obtenidos servirán como datos de entrada en la construcción de modelos estáticos 3D que capturen de forma detallada y realista las propiedades petrofísicas en este tipo de reservorios y que sirvan de base para la modelización dinámica de inyección de CO_2 y de H_2.

Abstract

The coordinated project SOSGAS (Impact of reservoir sedimentary heterogeneity on sustainable gas geo-storage), led by the Universities of Barcelona and Granada, aims to explore specific geological properties related to the injection of CO_2 and green H_2 into natural geo-storage sites. To achieve this, it is necessary to evaluate the reservoir's quality, its petrophysical properties, and its diagenetic history. In this work, we present a preliminary analysis of the quality of sandstones from the delta front (the main candidate rock for storage) and the mixed platform in the reservoir analogue of the Sant Llorenç del Munt fan delta complex (Eocene, Ebro Basin). Ten thin sections corresponding to rock samples from different stratigraphic positions have been studied under an optical microscope in order to evaluate how petrological properties and optical porosity vary spatially according to their proximal or distal character, both in regressive and transgressive systems tracts. This analysis will be complemented with the study of subsurface samples from borehole drilling behind the outcrop, as planned within the framework of the SOSGAS project. The results obtained will be used to build 3D static models that capture in detail and realistically the petrophysical properties in this type of reservoirs, serving as a basis for the dynamic modeling of CO_2 and H_2 injection.

Análisis de las condiciones paleoambientales en los yacimientos de huevos de dinosaurio del las Sierras Exteriores

Analysis of paleoenvironmental conditions of the dinosaur egg clutches in the External Sierras

C. Sanz-Ascaso[1], B. Bauluz[1], M. Moreno-Azanza[1] y L. Ezquerro [1,2]

1 Grupo Aragosaurus-IUCA, Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España

Palabras clave: paleosuelos, minerales de la arcilla, saurópodo titanosaurio, facies Garum, Loarre

Resumen

En los últimos años se han encontrado varias nidadas de huevos de saurópodo de titanosaurio en las facies Garum de edad Maastrichtiense-Daniense de las Sierras Exteriores, especialmente en los alrededores de la Sierra de Loarre (Aragón). En toda el área, los sedimentos que engloban a los huevos consisten en lutitas pedogenizadas de color rojizo con intercalaciones de calizas blancas y areniscas parduscas.

El estudio se centró en el análisis, desde un punto de vista multidisciplinar, de uno de estos afloramientos, el yacimiento de Collada Tallada, para interpretar las condiciones paleoambientales y su relación con el comportamiento de los dinosaurios en la nidificación. Se levantó y muestreó un perfil estratigráfico detallado de la sucesión sedimentaria para caracterizar los horizontes pedogénicos. También, se realizó una descripción detallada de las características pedológicas, microscopía óptica, FESEM y difracción de rayos X para establecer con mayor precisión el grado de pedogénesis y los minerales de la arcilla (K, Sm, Ill, I/S).

El ambiente sedimentario corresponde a sistemas fluviales con extensas llanuras de inundación, donde se formaron paleosuelos por exposición subaérea y, localmente, existían lagos efímeros de agua dulce. Se han descrito oxisoles, gleysoles, protosoles y vertisoles en suelos con buen drenaje, moderado o pobre. Los diferentes tipos de paleosuelos junto con la mineralogía de las arcillas reflejan alternancias de períodos húmedos y secos en climas cálidos que permitieron la pedogenización. Además, este estudio sugiere que los huevos y nidadas de los dinosaurios no estarían permanentemente cubiertos por una capa de agua, ya que nunca parecen relacionados con facies encharcadas, convirtiéndose en la hipótesis más probable de que se pusieran durante periodos secos.

Abstract

In recent years, several titanosaur sauropod egg clutches have been found in Garum facies of Maastrichtian-Danian age from the External Sierras, especially around Sierra de Loarre (Aragón). Troughout the area, the egg-bearing sediments consist of reddish pedogenized lutites with intercalations of white limestones and brownish sandstones.

The study was focused on the multidisciplinary analysis of one of this outcrops, Collada Tallada site, to interpret the palaeoenvironmental conditions for correlating with the dinosaur nesting behavior. A detailed stratigraphic profile of the sedimentary succession was logged and sampled to characterize the pedogenic horizons. Thorough description of the pedological features, optical microscopy, FESEM and X-ray diffraction were made for establishing the pedogenesis degree and clay minerals more precisely.

The sedimentary environment corresponds to fluvial systems with extensive floodplains, where palaeosols were formed by subaerial exposure and, locally, ephemeral freshwater lakes appeared. Oxisols, gleysols, protosols and vertisols have been described on well, moderately to poorly drained soils. The different types of palaeosols together with the clay mineralogy reflect alternations of wet and dry periods in warm climates that allowed the pedogenization. Furthermore, this study suggests that the dinosaur eggs and clutches would not be permanently covered by a sheet of water, as they never appear related to waterlogged facies, becoming the most likely hypothesis their laid during dry periods.

Corredores marinos en el Jurásico: comparación de registros sedimentarios en EEUU y la Ibérica.

Jurassic seaways: comparing sedimentary records in USA and Iberia.

C. Sequero[1], L. Ezquerro[1, 2], R. Coimbra[3], E. Puértolas-Pascual[2], S. Riechelmann[4], R. Hoffmann[4], M. Moreno-Azanza[2]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España
2 Grupo Aragosaurus-IUCA, Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España
3 GeoBioTec, Departmento de Geociências, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal
4 Ruhr-Universität Bochum, Institute for Geology, Mineralogy and Geophysics, Universitätsstrasse 150, D-44801 Bochum, Alemania

Palabras clave: Jurásico, corredores marinos, análisis de facies, isótopos estables de carbono y oxígeno

Resumen

Durante el Jurásico Medio-Superior, al oeste de Norteamérica, existió un extenso mar epicontinental conocido como el corredor the Sundance (representado en la Fm. Sundance), que conectaba al norte con el proto-océano Pacífico. Al mismo tiempo, al noreste de Iberia, el corredor de Soria conectaba las cuencas Vasco-Cantábrica e Ibérica. La coexistencia de ambos corredores marinos, contextos escasos durante el Jurásico, ofrece una oportunidad excelente para su comparación. Este trabajo presenta un estudio en detalle de dos secciones estratigráficas de la Fm. Sundance en la cuenca de Bighorn (norte de Wyoming), combinando análisis sedimentológicos y geoquímicos. Esta unidad, que alcanza aquí 90 m de espesor, está representada en su mayoría por intervalos margosos con abundancia local de belemnites y ostras, que representan ambientes de *offshore*; alternando con areniscas y calcarenitas con estratificación cruzada que abarcan desde el ambiente de *shoreface* hasta el intermareal. En el corredor de Soria, se describe en cambio una sedimentación carbonatada y siliciclástica con desarrollo puntual de arrecifes, así como la presencia tanto de ammonites como de belemnites. Los análisis de isótopos estables de carbono y oxígeno en los 8 especímenes mejor preservados de belemnites y ostras de niveles distintos de la Fm. Sundance, han revelado un rango de valores similar a los del océano Tetis para el mismo periodo. Esto indica que el corredor de Sundance mostraba aún una conexión amplia con el proto-océano Pacífico, lo que demuestra una cierta similitud con el corredor de Soria en términos de conectividad oceánica.

Abstract

During the middle-late Jurassic, a long epicontinental sea known as Sundance Seaway (represented in the Sundance Fm.), occupied the western margin of North America, connected with the proto-Pacific Ocean to the north. At the same time, in the northeast Iberia, the Soria Seaway connected the Basque-Cantabrian and Iberian Basins. The coexistence of both seaways, which were rare during the Jurassic, provides an excellent opportunity for comparison. This work presents a high-resolution analysis of two stratigraphic sections of the Sundance Fm. in the Bighorn Basin, north of Wyoming, by combining sedimentological and geochemical studies. This unit, -reaching here 90 m thick-, is mainly represented by marls with local abundance of belemnites and oysters, which correspond to offshore domains; alternating with cross-stratified sandstones and calcarenites representing from shoreface to intertidal environments. The Soria Seaway instead encompasses carbonate and siliciclastic deposits with local reefs, and common presence of both ammonites and belemnites. Carbon and oxygen stable isotope analyses were performed to the best-preserved 8 belemnite and oyster specimens taken from different levels in the Sundance Fm. Both revealed similar values to those documented for coeval open-ocean Tethyan data. This indicates that, at this time, the Sundance Seaway was still open connected to the proto-Pacific Ocean, showing a certain similarity with the Soria Seaway in terms of ocean connectivity.

Composición isotópica del agua de cristalización de yesos Messinienses del promontorio Balear y su relación con la Cuenca de Sorbas.

Isotopic composition of the hydration water of the Messinian gypsum from the Balearic promontory and its relationship with the Sorbas Basin.

N. Sierra-Ramírez[1], J. Tur-Piedra[2], E. Gomez-Rivas[1], J. García-Veigas[3], E. Playà[1] y L. Gibert[1]

1 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n, Distrito de Les Corts, 08028 Barcelona, España. nuriasierra97@ub.edu, e.gomez-rivas@ub.edu, eplaya@ub.edu, lgibert@ub.edu.
2 Enginyeria civil i ambiental, Edifici D 2, Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España. jose.tur@up.edu
3 CCiTUB, Serveis Cientificotècnics, Universitat de Barcelona, 08028, Barcelona, España. garcia_veigas@ub.edu

Resumen: El sondeo "Llano de Palma 27" se sitúa en el margen de la Cuenca de Palma de Mallorca. Este sondeo corta los yesos Messinienses de Sant Jordi, formados por una alternancia de yesos seleníticos y margas, con una potencia total de 90 metros. Para este estudio se seleccionaron 24 muestras de yeso selenítico del sondeo para determinar la composición isotópica ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) de las dos moléculas de agua del yeso y el origen geoquímico de la salmuera. Estos resultados, además de $\delta^{18}O$ y $\delta^{34}S$ de los yesos, mostraron un origen del agua marina con un enriquecimiento en isótopos pesados en el tramo basal y valores más ligeros y variables en el tramo superior. Estos últimos se han relacionado con episodios de dilución de la salmuera evaporítica y con un cambio en la profundidad de la salmuera. Los resultados de Llano de Palma se han comparado con los yesos Messinienses de la Cuenca de Sorbas. A diferencia de la Cuenca de Palma de Mallorca, la composición isotópica de la salmuera de los yesos de Sorbas ha mostrado un origen marino del agua y valores negativos que indican entradas de agua meteórica.

Palabras clave: Agua de hidratación, Messiniense, Yeso, composición isotópica y Llano de Palma.

Abstract: *The "Llano de Palma 27" borehole is located on the edge of the Palma de Mallorca Basin. This borehole cuts through the Messinian gypsum of Sant Jordi, formed by an alternation of selenitic gypsum and marl, with a total depth of 90 metres. For this study, 24 samples of selenitic gypsum were selected from the borehole to determine the isotopic composition ($\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$) of the two water molecules in the gypsum and the geochemical origin of the brine. This results, in addition to $\delta^{18}O$ and $\delta^{34}S$ of the gypsum, showed a seawater origin with an enrichment in heavy isotopes in the basal section and lighter and more variable values in the upper section. The latter have been related to episodes of dilution of the evaporite brine and a change in the depth of the brine. The results from Llano de Palma have been compared with the Messinian gypsum of the Sorbas Basin. In contrast to the Palma de Mallorca Basin, the brine isotopic composition of the Sorbas gypsum has shown a marine origin of the water and negative values indicating meteoric water inputs.*

Key words: *Hydration water, Messinian, Gypsum, Isotopic composition and Llano de Palma*

INTRODUCCION

El yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) es un mineral que presenta agua en su estructura cristalina, también denominada agua de hidratación. Los isótopos de oxígeno (^{18}O,^{16}O) y de hidrógeno (^{2}H, ^{1}H) de las dos moléculas de agua proporcionan información sobre las condiciones ambientales en las que se formó el yeso (Matsuyaba y Sakai, 1973). Aplicando a los valores del agua de cristalización los factores de fraccionamiento 1,0037 ±0,0005 para el oxígeno y 0,985 para el hidrógeno, se determina la composición isotópica de la salmuera y el origen continental o marino del agua a partir de la cual precipitó el yeso (Gonfiantini y Fontes,1963).

En este estudio se ha obtenido la composición isotópica ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) del agua de hidratación de cristales de yeso selenítico del Messiniense con el objetivo de determinar el origen geoquímico de la salmuera. Las 24 muestras estudiadas se obtuvieron del sondeo "Llano de Palma 27", situado en la Cuenca de Palma de Mallorca y depositadas en el Departamento de Geoquímica, Mineralogía y Petrología de la facultad de Ciencias de la Tierra de la Universitat de Barcelona. Para la preparación de muestras se seleccionaron cristales primarios de yeso selenítico, eliminando los sedimentos e impurezas en los cristales. La técnica se basa en la liberación del agua de cristalización del yeso.

MARCO GEOLÓGICO

Los yesos del Messiniense se depositaron principalmente en cuencas marginales del Mediterráneo

(Roveri et al. 2014) con profundidades intermedias (de 1000 a 200 m) y someras (<200m). La Cuenca de Palma de Mallorca, de profundidad intermedia, representa la parte emergida del Promontorio Balear. El sondeo "Llano de Palma 27" se ubica en el margen de la Cuenca de Palma de Mallorca, entre las sierras de Tramontana y del Levante. Está constituido de base a techo por las siguientes unidades (Mas Gornals y Fornós, 2012): 1) facies de plataforma grises con lumaquelas y foraminíferos, 2) complejo terminal formado por un tramo carbonatado con oolitos y brechas, un tramo de margas blancas con alternancia de niveles detríticos y los yesos de Sant Jordi, con aspecto estromatolítico 4) calcilutitas de Son Mir y calcarenitas de Sant Jordi del Plioceno, y por último, 5) limos rojos de Palma del Cuaternario.

Los yesos Messinienses de Sant Jordi están constituidos por una alternancia de yeso y margas con una potencia total de 90 metros. En el sondeo estudiado se reconocen 13 ciclos de yeso selenítico y margas, con un espesor de las capas de yesos de entre 1 y 25 metros y margas que no superan los 8 metros.

La Cuenca de Sorbas es una cuenca somera de tipo intramontañosa limitada al norte por la Sierra de Filabres y al sur por las Sierras Alhamilla y Cabrera. Las muestras analizadas por Evans et al. (2015) corresponden al análisis del Ciclo 6 de yeso-margas del Miembro Yesares en la sección de Río Aguas en la Cuenca de Sorbas. Este ciclo está formado por yesos seleníticos masivos, bandeados y *branching.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

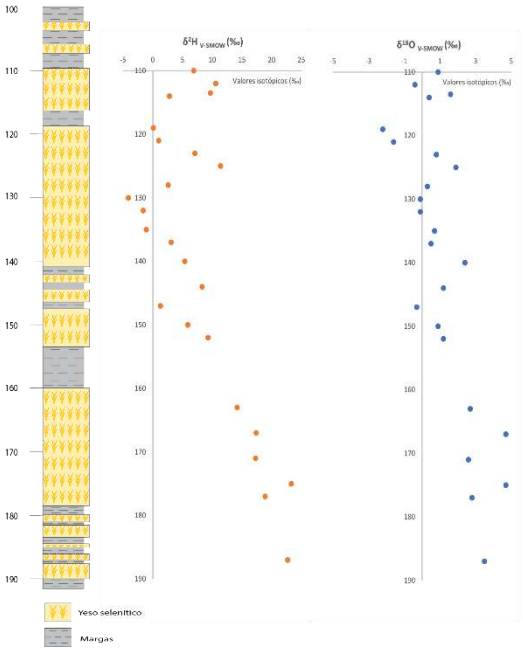


FIGURA 1. *Columna estratigráfica del sondeo "Llano de Palma 27" (modificada de Rosell et al. 1998) con los valores de salmuera asociados para* $\delta^2H_{V\text{-}SMOW}$ *(‰) y* $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ *(‰).*

Los valores de $\delta^{18}O$ y δ^2H del agua de cristalización de las muestras del sondeo de Llano de Palma oscilan entre +1,1‰ y +8‰ para $\delta^{18}O$ y - 19,9‰ y +7,9‰ para δ^2H. Los valores de la salmuera a partir de la cual precipitaron los yesos son de -2,2‰ a +4,7‰ para $\delta^{18}O$ y -4,1‰ a +23,3‰ para δ^2H (Figura 1).

Las composiciones isotópicas de la salmuera calculadas en el "Llano de Palma 27" muestran una variación vertical a lo largo del sondeo (Figura 1). El tramo basal, de 187 a 163 metros de profundidad, presenta un enriquecimiento en isótopos pesados (valores medios de $\delta^{18}O$=+3,4 y δ^2H=+19,4), mientras que el tramo superior, entre los metros 152 y 110, hay una mayor variabilidad con enriquecimiento en isótopos ligeros (valores medios de $\delta^{18}O$=+0,5 y δ^2H= +4,4).

Estos resultados isotópicos indican que el agua que dio lugar a la precipitación de los yesos es de origen marina. En el tramo basal, los resultados indican un agua marina isotópicamente pesada. Sin embargo, el tramo superior muestra una mayor contribución de agua marina con una composición isotópicamente más ligera que se podría relacionar con episodios de dilución de la salmuera evaporítica y con un cambio en la profundidad de la salmuera. La composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{34}S$ de yesos primarios del sondeo "Llano de Palma 27" (Figura 2) muestran valores de +12,4 a +13,6 para $\delta^{18}O$ y +19,4 a +22,3 para $\delta^{34}S$ del Llano de Palma (Rosell et al. 1998, García-Veigas et al. 2018) reafirmando un origen marino del agua de la salmuera.

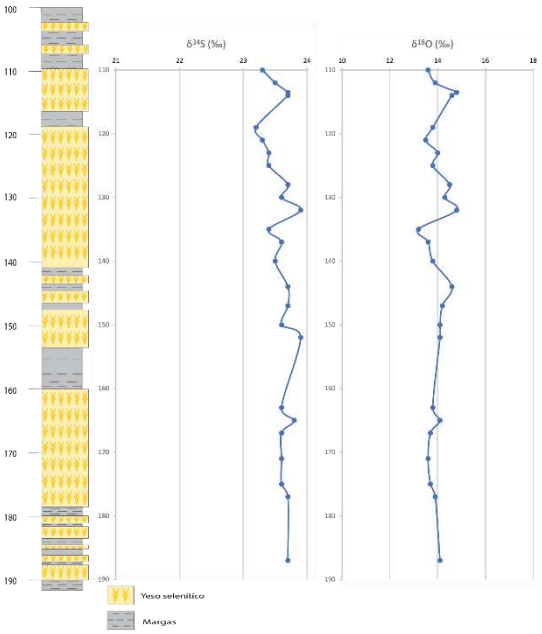


FIGURA 2. *Columna estratigráfica (modificada de Rosell et al. 1998) con los valores de* $\delta^{18}O$ *y* $\delta^{34}S$

Los datos isotópicos de la salmuera de Llano de Palma se han comparado con los datos de yesos Messinienses de la Cuenca de Sorbas publicados por Evans et al. (2015) (Figura 3) con valores de -1,7‰ a +3,7‰ para $\delta^{18}O$ y -15,6‰ a +18,41‰ para δ^2H. Estos resultados indican un origen marino del agua de la salmuera con entrada de agua continental (valores isotópicos negativos) (Figura 3).

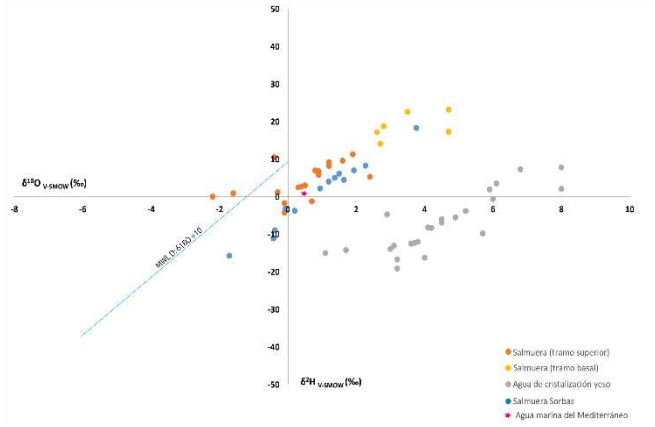


FIGURA 3. *Proyección de las composiciones isotópicas $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ (‰) y $\delta^{2}H_{V\text{-}SMOW}$ (‰) y los valores recalculados de la salmuera. MWL: línea de aguas meteóricas (Craig, 1961)*

CONCLUSIONES

En este estudio se han determinado las composiciones isotópicas de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de 24 muestras del sondeo "Llano de Palma 27" en la Cuenca de Palma de Mallorca. A partir de los resultados isotópicos del agua de hidratación se ha determinado que los yesos Messinienses de Sant Jordi se precipitaron a partir de una salmuera de origen marino, isotópicamente más ligera a techo de la sección estudiada. Los resultados son coherentes con los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{34}S$ medidos en muestras del mismo sondeo y que reafirman el origen marino de la salmuera. Los datos isotópicos se compararon con los yesos Messinienses de la Cuenca de Sorbas, y a diferencia de los yesos de Llano de Palma, estos indican un origen de la salmuera marino con entrada de agua continental.

REFERENCIAS

Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, Vol. 133, 1702 – 1703 pp.

Evans, N.P. Turchyn, A. Gázquez, F. Bontognali, T.R.R. Chapman, H. and Hodell, D. (2015): Coupled measurements of δ18Oand δD of hydration water and salinity of fluid inclusions in gypsum from the Messinian Yesares member, Sorbas Basin (SE Spain). *Earth Planet. Sci. Lett*. 430, 499–510.

Garcia-Veigas, Javier, et al. (2018): "Geochemical indicators in Western Mediterranean Messinian evaporites: Implications for the salinity crisis." *Marine Geology* 403, 197-214.

Gázquez, F. Evans, N.P. and Hodell, D. A. (2017): Precise and accurate isotope fractionation factors (α17O, α18O and αD) for water and CaSO4·2H2O (gypsum). *Geochim. Cosmochim. Acta* 198, 259–270.

Gonfiantini, R. and Fontes, J. C. (1963): Oxygen isotopic fractionation in the water of crystallization of gypsum. *Nature*, 200, 644 – 646 pp.

Mas, G. y Fornós, J. J. (2019): La Crisis de Salinidad del Messiniense en la cuenca sedimentaria de Palma (Mallorca, Islas Baleares). *Geogaceta*, 2012, vol. 52, p. 57-60.

Matsubaya, O. and Sakai, H. (1973): Oxygen and hydrogen isotòpic study on the water of crystallization of gypsum from the Kuroko type mineralization. *Geochem*. J. 7, 153–165.

Playà, E. Recio, C. and Mitchell, J. (2005): Extraction of gypsum hydration water for oxygen isotopic analysis by the guanidine hydrochloride reaction method. *Chemical Geology*, Vol. 217, 89 – 96 pp.

Rosell, L. Orti, F. Playà, E. and Peryt, T.M. (1998): Strontium geochemistry of Miocene primary gypsum: Messinian of southeastern Spain and Sicily and Badenian of Poland. *J. Sediment*. Res. 68, 63–79.

Roveri, Marco, et al. (2014): "The Messinian Salinity Crisis: past and future of a great challenge for marine sciences." *Marine Geology* 352, 25-58

$\delta^{18}O$ del agua de precipitación en la Península Ibérica: *Machine learning* aplicado a la calibración climática de registros paleoisotópicos

Precipitation water δ18O in the Iberian Peninsula: Machine learning applied to climate calibration of paleoisotopic records.

A. Stachnik[1,2], J. Martín-Chivelet[1,2] y M. Morellón[1]

1 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid 28040 Madrid. artursta@ucm.es | martinch@ucm.es | mmorello@ucm.es
2 Instituto de Geociencias (CSIC-UCM) Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

Palabras clave: Paleoclima, Isótopos estables, Modelos Climáticos, Cuevas, Lagos
Keywords: Paleoclimate, Stable Isotopes, Climate Models, Caves, Lakes

Resumen:

La abundancia de sistemas de cuevas y lagos activos, así como la frecuente exposición a los frentes atlánticos convierten al tercio norte de la península Ibérica (41ºN – 44ºN) en una zona de referencia para los estudios paleoclimáticos en general y especialmente para aquellos basados en isótopos estables. Una parte fundamental de esta investigación es la correcta interpretación de estos datos, para la cual es esencial conocer la composición isotópica de $\delta^{18}O$ de las precipitaciones. En la Península existe desde el año 2000 un conjunto de estaciones de medición en precipitación incluida en la Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación (GNIP) gestionada por la Asociación Internacional de Energía Atómica (IAEA). Los datos de esta red tienen una cobertura desigual en el espacio y en el tiempo, lo que supone una limitación importante a la hora de analizar y modelizar patrones de variabilidad espacio-temporal que puedan servir de base en la calibración de los registros isotópicos paleoclimáticos. Para abordar estos problemas, estamos desarrollando una base de datos de tipo *Data Frames* en *Python* que incorpora de manera indexada los datos de latitud, longitud, altitud, fecha de medida (mes), cantidad de precipitación, temperatura y $\delta^{18}O$ de cada estación de la red. Para cualquier otra ubicación dentro la Península, se propone un modelo de *machine learning* que aproxima el $\delta^{18}O$ esperado para unas coordenadas y altitud solicitadas en una fecha concreta. Se pretende que esta herramienta sirva como base para el desarrollo de otros modelos encaminados a evaluar las pautas climáticas que rigen la los patrones espacio-temporales del $\delta^{18}O$ en la península Ibérica, y a la interpretación de registros paleoclimáticos basados en esa variable.

Abstract

The abundance of active caves and lakes systems, as well as the frequent exposure to Atlantic fronts make the northern third of the Iberian Peninsula (41ºN - 44ºN) a reference area for paleoclimatic research, particularly for studies based on stable isotopes. A key part of this research is the proper interpretation of the data, which requires an understanding of the δ18O isotopic composition in precipitation. Since the year 2000, there has been a set of precipitation measurement stations on the Peninsula included in the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) managed by the International Atomic Energy Association (IAEA). Data from this network have a spatially and temporally inconsistent coverage, which represents an important limitation when analyzing and modeling space-time variability patterns that serve as a basis for paleoclimate isotopic record calibration. To address these problems, a Data Frames database in Python is being developed that indexes latitude, longitude, altitude, date of measurement (monthly), precipitation amount, temperature and δ18O for each station in the network. At any other location within the Peninsula, a Machine Learning model is proposed to approximate the expected δ18O for the requested coordinates and altitude on a given date. Our tool is meant to serve as a foundation for the development of other models aimed at evaluating the climatic patterns that govern the δ18O space-time distribution in the Iberian Peninsula and the interpretation of paleoclimatic records based on this variable.

Estratigrafía del Eoceno Prebético: edad, evolución y organización en ciclos.

Eocene Prebetic stratigraphy: age, trending and cycles arrangement.

J. E. Tent-Manclús[1], M. Martín-Martín[1], C. Miclăuș[2], J. Tosquella[3], F. Serrano[4] y J.A. Martín-Pérez[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente, Universidad de Alicante, AP 99, 03080 Alicante, je.tent@ua.es; manuel.martin@ua.es.
2 Departmentul de Geologie, Universitatea "Alexandru Ioan Cuza" din Iași, 20A, Carol I, 700505 Iași, Romania, e-mail: miclaus@ uaic.ro
3 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva, Campus Universitario del Carmen, 21071 Huelva, josep@uhu.es
4 Departamento de Ecología y Geología, Universidad de Málaga, 28071 Málaga, Spain

Palabras clave: Eoceno Prebético, plataformas carbonatadas, secuencias R-T.

Resumen

Se han estudiado trece secciones a lo largo de la cordillera Bética (sectores de Alicante, Murcia, Granada y Jaén) en el Eoceno Prebético. Los ambientes sedimentarios en su mayoría consisten en facies marinas someras. Se propusieron tres formaciones estratigráficas informales datadas con foraminíferos planctónicos, nanoplancton calcáreo y macroforaminíferos bentónicos: (1) fm margoso-arcillosa inferior; (2) fm intermedia calizo-calcarenítica y (3) fm margoso-arcillosa superior. La arquitectura estratigráfica muestra límites diacrónicos y pasajes laterales que representan la plataforma interna y externa (talud superior en algunos casos). La fm margoso-arcillosa inferior comienza en el Paleoceno superior en algunas secciones. Tanto el límite inferior como el superior de la fm intermedia calizo-calcarenítica son diacrónicos, y van desde el Ypresiense basal hasta el Lutetiense medio y desde el límite Ypresiense-Lutetiense hasta el Bartoniense inferior, respectivamente. La edad superior de la formación arcillosa-margosa superior alcanza el Priaboniense superior. El Eoceno Prebético en las secciones estudiadas se organiza en secuencias regresivo-transgresivas (RT) formadas a su vez por ciclos RT menores. Proyecto: PID2020-114381GB-I00

Abstract

Thirteen sections have been studied along the Betic Cordillera (Alicante, Murcia, Granada and Jaen sectors) in the Prebetic Eocene. The sedimentary realms were mostly shallow marine. Three informal stratigraphic formations were proposed and dated with planktic foraminifera, calcareous nannoplankton and Larger Benthic Foraminifera: (1) lower marly-clayey fm; (2) intermediate limestone-calcarenite fm; and (3) upper marly-clayey fm. The stratigraphic architecture shows diachronous boundaries and lateral changes representing the internal and external platform (upper slope in a few cases). The lower marly-clayey fm starts in the Upper Paleocene in a few sections. Both lower and upper boundaries of the intermediate limestone-calcarenite fm are diachronous, ranging from Early Ypresian to Middle Lutetian and from Ypresian-Lutetian boundary to Early Bartonian, respectively. The top age of the upper marly-clayey formation is Late Priabonian. The Prebetic Eocene in the studied sections consist of in regressive-transgressive (RT) sequences made of smaller RT cycles.

Referencias

Dabrio, C.J. (1972). *GeologÌa del Sector del Alto Segura*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 388 p.

Geel, T., Roep, T.B., van Hinte, J.E. y Vail, P.R., (1998). Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins (Hardenbol. J., Thierry, J., Farley, J., Jacquin, T., De Graciansky, P.-C., Vail, P. R. Eds.), *SEPM Special Publication* 60, 289-302.Guerrera, F., Mancheño, M. A., Martín-Martín, M., Raffaelli, G., Rodríguez-Estrella, T., Serrano y F., (2014). *Geologica Acta* 12, 171–192.

Análisis sedimentológico y petrofísico multiescalar de un sistema mixto carbonato-clástico eoceno (Cuenca de Àger, Pirineos Meridionales, España)

Multi-scalar sedimentological and petrophysical analysis of an Eocene mixed carbonate-clastic system (Àger Basin, Southern Pyrenees, Spain)

S. Tomás[1], R. Mercedes-Martín[1], M. Poyatos-Moré[1], S. Maerz[2], A. Zhalgasbayeva[1,3], M. Ortega[1], J. Fischer[1,4], E. H. Herrera[5] y O. Oms[1]

1 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Barcelona. Sara.Tomas.Lafaja@uab.cat, Ramon.Mercedes@uab.cat, Miquel.Poyatos@uab.cat, Miriam.OrtegaM@autonoma.cat, JosepOriol.Oms@uab.cat
2 Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, 14476 Potsdam, Alemania. Sven.Maerz@geo.uni-potsdam.de
3 School of Mining and Geosciences, Nazarbayev University, 010000 Astana, Kazakhstan. assel.zhalgasbayeva@alumni.nu.edu.kz
4 Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. jfischfi47@alumnes.ub.edu
5 Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. edherote@uis.edu.co

Palabras clave: plataformas carbonatadas, sedimentología, porosidad, Eoceno, Pirineos

Resumen

La unidad de plataforma mixta carbonática-clástica de calizas con *Alveolina* (Eoceno, Pirineos Meridionales) permite investigar el impacto de la tectónica a escala de cuenca y/o los cambios paleoambientales sobre la morfología de la plataforma. Sistemas similares de plataformas mixtas paleógenas en el norte de África y Oriente Medio constituyen importantes yacimientos y/o acuíferos (e.j. formaciones Sabil superior, Harash, Umm Er Rhaduma y Dammam). El presente trabajo combina el análisis de facies y su arquitectura con la caracterización de la porosidad, por medio de análisis digital de imágenes y tomografía computarizada. Esto permitirá comprender mejor las heterogeneidades sedimentarias en un enfoque multiescalar. Se han diferenciado seis asociaciones de facies que registran la transición desde una rampa de baja pendiente dominada por carbonatos a una plataforma mixta carbonato-clástica de pendiente progradante. Se han observado diferentes escalas y tipos de porosidad, siendo los meso y macroporos secundarios móldicos y *vuggy* los más abundantes. Los sistemas de poros de mayor tamaño relacionados con estilolitos y bioturbación, también tienen un papel importante.

Abstract

The mixed carbonate-clastic platform of the *Alveolina* limestone unit (Eocene, Southern Pyrenees) offers a good opportunity to investigate the impact of basin-scale tectonics and/or paleoenvironmental changes on platform morphology. Similar Paleogene mixed platform systems are important reservoirs and/or aquifers in North Africa and the Middle East (e.g. upper Sabil, Harash, Umm Er Rhaduma and Dammam formations). The present work combines stratigraphic architecture and facies analysis with porosity characterization, using digital image analysis and computerized tomography scan. This will permit to better understand sedimentary heterogeneities at a multi-scale approach. Six facies associations have been differentiated recording the transition from a low-gradient carbonate-dominated ramp to a steeper mixed carbonate-clastic platform with a progradational slope. Different scales and types of porosity have been identified, being secondary mouldic and vuggy meso- and macro-pores the most abundant. Moreover, larger pore systems related to stylolites and bioturbation also play an important role.

La influencia de los procesos marinos en la arquitectura fluvial de las formaciones Montllobar y Castigaleu (Ypresiense, Pirineos).

The influence of marine processes in fluvial architecture from the Montllobar and Castigaleu formations (Ypresian, Pyrenees).

A. Toribio[1], A. van Yperen[2], M. Poyatos-Moré[1], J. Fusté[1], D. Gómez-Gras[1], E. López[1], V. Moreno[1], I. Midtkandal[2], J. Holbrook[3], O. Oms[1]

1 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Valles, Barcelona.
anna.toribio@autonoma.cat
2 Department of Geosciences, Universitetet i Oslo, Oslo, Norway.
3 Department of Geology, Texas Christian University, Forth Worth, Texas, USA.

Palabras clave: procesos marinos, arquitectura, canales fluviales, Eoceno, Pirineos.

Resumen

En este estudio analizamos el efecto de los procesos marinos en la variabilidad de los depósitos de canal de las formaciones Montllobar y Castigaleu (Ypresiense, cuenca de Tremp-Graus). A través de un análisis estratigráfico, sedimentológico y petrológico de diferentes ejemplos de depósitos de canal (aislados/amalgamados), se han definido su geometría, facies y procesos deposicionales, y se ha establecido su procedencia sedimentaria. Los resultados revelan que los canales más proximales están dominados por areniscas y conglomerados formando complejos de barras de acreción lateral (canales aislados) o de apilamiento multiepisódico complejo (canales amalgamados) con evidencias de exposición subaérea y bioturbación por raíces. Hacia cuenca, el aspecto de relación de los canales se vuelve más ancho (canales aislados) o variable (canales amalgamados), y se observa una disminución en la presencia de raíces, y un progresivo aumento de lutitas, bioclastos y bioturbación de invertebrados en los depósitos de relleno, todo atribuido a una mayor influencia marina. No obstante, el análisis petrológico revela que el tamaño de grano mediano en las areniscas se mantiene relativamente grueso y constante a lo largo de todos los canales, junto con una selección moderada a pobre. Esto se interpreta como un reflejo de la influencia continua de dos aportes aluviales transversales: uno más cercano a la parte proximal del sistema, con área fuente dominada por rocas de cobertera Mesozoica, y otro más cercano a la parte distal del sistema, con área fuente dominada por rocas ígneas. Los resultados de este trabajo sugieren por lo tanto que en este caso la influencia de la cuenca marina tuvo más peso en la geometría resultante de los canales, que la presencia de aportes puntuales de los sistemas aluviales transversales.

Abstract

In this study we analyse the effect of marine processes in the variability of channel deposits from the Montllobar and Castigaleu formations (Tremp-Graus Basin). Through a stratigraphic, sedimentological, and petrological analysis of different examples of channel deposits (isolated/amalgamated), we have defined their geometry, facies and depositional processes, and established their sedimentary provenance. Our results reveal that channels in the more proximal sections are dominated by sandstones and conglomerates, forming laterally accreting bar complexes (isolated channels) or multistorey complexes (amalgamated channels) with evidence of subaerial exposure and root bioturbation. Basinward, the aspect ratio of channels increases in width (isolated channels) or becomes more variable (amalgamated channels), and a decrease in the root bioturbation is observed, together with a progressive increase in mudstones, bioclasts and invertebrate bioturbation in the channel-fill deposits, all attributed to a higher marine influence. However, the petrological analysis reveals the median grain size of sandstones stays relatively coarse and constant throughout all channels, together with a moderate to poor sorting. This is interpreted to reflect the continuous influence of two transverse alluvial systems: one closer to the proximal part of the system, with a source area dominated by Mesozoic cover rocks, and another closer to the distal part of the system, dominated by igneous rocks. Results of this work suggest that in this case the influence of the marine basin had a stronger effect in the resulting geometry of the channels, than the presence of local coarse-grained supply from transverse alluvial systems.

Sedimentología de un sistema aluvial-lacustre con microbialitas en la cuenca de Montalbán (Cretácico Superior, NE Spain)

Sedimentology of an alluvial-lacustrine system with microbialites from the Montalbán subbasin (latest Cretaceous, NE Spain)

D. Torromé[1], M. Aurell[1], A. Martín-Pérez[2] y A. Košir[2]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza 50001 Zaragoza. dtorrome@unizar.es
2 Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Ljubljana, Slovenia

Palabras clave: Formación Allueva, Lacustre, Oncoides, Cretácico Superior, Cuenca Ibérica

Resumen

La Formación Allueva (Campaniense medio-superior) se encuentra en la subcuenca de Montalbán, la cual se formó en el margen noreste de la Cuenca Ibérica durante las primeras etapas de la compresión Alpina. Esta formación está compuesta principalmente por sedimentación terrígena aluvial; sin embargo, en ciertas áreas predominan los carbonatos lacustres. Las asociaciones de facies lacustres-palustres estudiadas abarcan: (1) niveles de caliza con acumulación bioclástica de gasterópodos y carofitas, acompañados de brechas poligénicas; (2) capas irregulares de caliza ricas en oncoides; (3) capas de lutita roja de varios metros de espesor, intercaladas con areniscas y conglomerados. Este entorno lacustre-palustre se desarrolló en las regiones distales de un sistema aluvial caracterizado por bajos niveles de agua y tiempos de residencia breves, donde predominan características palustres como la bioturbación y la desecación. Los datos isotópicos muestran valores medios de -4.95‰ tanto para $\delta^{18}O$ como para $\delta^{13}C$, dentro del rango de carbonatos de agua dulce, lo que respalda la interpretación propuesta. Este estudio se centra en las microbialitas, con presencia de crecimientos estromatolíticos, pero siendo dominantes los oncoides que forman capas oncolíticas (Torromé y Aurell, 2024). Se han identificado diferentes tipos de oncoides basándose en morfología, tamaño y laminación. Además, se ha realizado un examen de los patrones de laminación dentro de los oncoides, identificando ciclos que pueden servir como indicadores para interpretar condiciones climáticas húmedas/secas.

Abstract

The middle-upper Campanian Allueva Formation is located in the Montalbán subbasin, which was developed in the northeastern margin of the Iberian Basin during the early stages of Alpine compression. This unit is mainly composed of alluvial terrigenous sediments, however, certain areas exhibit a prevalence of lacustrine carbonates. The lacustrine-palustrine facies associations outlined in this study encompass: (1) limestone levels with bioclastic accumulation of gastropods and charophytes, accompanied by polygenetic carbonate breccias; (2) irregular limestone beds rich in oncoids and tufa-like deposits; (3) reddish mudstone layers, several meters thick, with alternation of sandstones and conglomerates. This lacustrine-palustrine environment developed in the distal regions of an alluvial setting characterized by low water levels and brief residence times, where palustrine features, such as bioturbation and desiccation, predominated. Isotopic data show values of -4.95‰ for both $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$, falling within the range of freshwater carbonates, supporting the proposed interpretation. This study focusses on microbialites. While stromatolitic growths exist, the predominant microbialites manifest as oncoids forming oncolitic beds (Torromé and Aurell, 2024). Different types of oncoids have been identified based on morphology, size, and lamination. Additionally, an examination of the oncoidal lamination patterns has been conducted, identifying cycles useful for interpreting humid/dry conditions.

Referencias

Torromé, D. y Aurell, M. (2024). *Geogaceta* 75, 3-6.

Geometría y Heterogeneidad de un Análogo Aflorante Fluvial de alta sinuosidad: Perspectivas desde la Formación Capella (Eoceno, Cuenca de Graus-Tremp)

Geometry and Heterogeneity of a high-sinuosity Fluvial Outcrop Analogue: Insights from the Capella Formation (Eocene, Graus-Tremp Basin)

L.M. Yeste[1], J.L. Cuevas[2], M. Gil-Ortiz[3], Miguel López-Blanco[2], P. Cabello[2] y C. Viseras[1]

1 Sedimentary Reservoir Workgroup (SEDREGROUP). Dpto. Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada. lmyeste@ugr.es, viseras@ugr.es
2 Dpto. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. jcuevas@ub.edu, m.lopezblanco@ub.edu, pcabello@ub.edu
3 Dpto. Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. marc.gilortiz@ub.edu

Palabras clave: Graus-Tremp Basin, Capella Formation, outcrop reservoir characterization, meandering river, facies heterogeneity,

Resumen

Con el nuevo paradigma de la transición energética, se requiere un almacenamiento subterráneo a gran escala de CO_2 y H_2 en formaciones geológicas. Debido a las significativas heterogeneidades que presentan la mayoría de reservorios, cuantificar estas variaciones a distintas escalas resulta esencial para llevar a cabo una caracterización estratigráfica y sedimentológica, un modelado geológico tridimensional y una simulación de flujo en estos reservorios. Los análogos de afloramiento son fundamentales para comprender la arquitectura de los reservorios en el subsuelo, proporcionando información esencial sobre el tamaño, la geometría y la conectividad de los geocuerpos. Este estudio presenta resultados preliminares de un análogo fluvial de alta sinuosidad en la Formación Capella (Cuenca de Graus-Tremp). Se han combinado técnicas tradicionales de campo con técnicas digitales de modelado de afloramientos para caracterizar las dimensiones y geometría, así como las relaciones conceptuales entre diferentes tipos de geocuerpos. Este conjunto de datos extraídos contribuye a perfeccionar las predicciones en modelos estáticos y dinámicos en formaciones similares del subsuelo, con el objetivo principal de mejorar la gestión de los recursos renovables y abordar las fluctuaciones estacionales en el mercado de los recursos energéticos.

Abstract

With the new energy transition paradigm, large-scale underground storage of CO_2 and H_2 in geological formations is required. Due to the significant heterogeneities present in most reservoirs, quantifying these variations at different scale is essential for conducting a stratigraphic and sedimentological characterization, three-dimensional geological modelling and flow simulation in these reservoirs. Outcrop analogues play a vital role in understanding reservoir architecture by providing essential information about the size, geometry, and connectivity of geobodies. This study presents preliminary results from a high sinuosity fluvial analogue in the Capella Formation (Graus-Tremp Basin). Traditional field techniques have been combined with digital outcrop modelling techniques to characterize dimensions, geometry, and conceptual relationships between different types of geobodies. This extracted dataset contributes to refining predictions in static and dynamic models in similar subsurface formations, with the primary goal of enhancing the management of renewable resources and addressing seasonal fluctuations in the energy resources market.

Acknowledgements: Grants PID2022-140850OB-C21 and PID2022-140850OB-C22 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ and by "ERDF A way of making Europe". The Margarita Salas postdoctoral research contract (MS2022-17), Ministry of Universities of Spain, European Union - NextGenerationEU- and the Generalitat de Catalunya (2021SGR00076) is also acknowledged.

Cronología de los sedimentos del Eoceno-Oligoceno del frente oriental del antepaís pirenaico: implicaciones paleogeográficas y ambientales.

Chronology of the Eocene-Oligocene sediments of the eastern Pyrenean foreland front: Insights on paleogeography and environmental change.

E. Beamud[1,2], L. Valero[2,3], O. Gratacós [1,2], C. Peigney [1,2], P. Santolaria[1,2], A. Sáez, [1,2], J.A. Muñoz [1,2], E. Roca [1,2]

1 Institut de Recerca Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. C/Martí i Franqués s/n – 08028 Barcelona betbeamud@ub.edu, , luisvalero@ub.edu , ogratacos@ub.edu , cpeigneys94@gmail.com , p.santolaria.otin@ub.edu
2 Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB-Geo3BCN CSIC, C/ Solé i Sabarís s/n – 08028 Barcelona
3 Departament de Dinàmica de la Terra i l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. C/Martí i Franqués s/n – 08028 Barcelona a.saez@ub.edu , jamunoz@ub.edu , eduardroca@ub.edu

Palabras clave: magnetoestratigrafía, Cuenca del Ebro, paleogeografía, antepaís, área fuente-cuenca.

Resumen

Hasta la fecha, se dispone de varias secciones magnetoestratigráficas de los sedimentos acumulados en el margen norte de la cuenca del Ebro, al este de la unidad central de los Pirineos, que registran ~ 3-4 millones de años del Eoceno-Oligoceno. La correlación entre estas secciones y las cronologías asignadas han sido objeto de debate debido a la falta de secciones intermedias en una zona estructuralmente compleja. Para ayudar a resolver esta controversia, presentamos una nueva sección magnetoestratigráfica de ~ 1700 m de espesor en el área de Artesa de Segre, que constituye la pieza clave para correlacionar y completar la cronoestratigrafía de la zona. También presentamos nuevos datos de composición de isótopos estables (δ18O y δ34S) de las unidades evaporíticas para interpretar sus condiciones climáticas de formación y su relación con la transición marino/continental ocurrida en el Priaboniense en la Cuenca del Ebro. Los nuevos resultados, junto con la reinterpretación de trabajos anteriores, permiten: 1) definir la cronoestratigrafía de los sistemas aluviales y lacustres de esta zona de la Cuenca del Ebro y su correlación con el sector occidental de la cuenca; 2) conocer la evolución de los sistemas sedimentarios, marcados por los cambios en las condiciones ambientales del área fuente y la cuenca; y 3) afinar la cronología y cinemática de la deformación contractiva de este sector a partir de las relaciones geométricas de estos sedimentos con los pliegues y cabalgamientos de la zona.

Abstract

To date, within sediments to the east of the central unit of the Pyrenees, on the northern margin of the Ebro Basin, there are several magnetostratigraphic sections that record ~ 3-4 million years through the Eocene-Oligocene. The correlation between these sections and the assigned chronologies has been a matter of debate due to the lack of intermediate sections in a structurally complex area. To help resolve this controversy, we present a new magnetostratigraphic section of ~ 1700 m thickness in the Artesa de Segre area, which constitutes the key piece for correlating and completing the general chronostratigraphic successions of the zone. Additionally, we present new data on stable isotope composition (δ18O and δ34S) of evaporitic units with the aim of interpreting their climatic conditions of formation and their relationship with the marine/continental transition that occurred during Priabonian. The new results together with the reinterpretation of previous works allow: 1) defining the chronostratigraphy of the alluvial and lacustrine systems of this area of the Ebro Basin and its correlation with the western sector of the basin; 2) understanding the evolution of sedimentary systems marked by changes in the environmental conditions of the source area and the basin; and 3) refining the chronology and kinematics of the compressive deformation of this sector based on the geometric relationships of these sediments with the folds and thrusts of the area. (Study supported by project PID2019-106440GB-C21, MCIUN).

Análisis de series temporales de datos magnéticos de sedimentos en el Mediterráneo Occidental: importantes ciclicidades paleoambientales durante la última glaciación
Time-series analysis of rock magnetic data from sediments in the Western Mediterranean: strong paleoenvironmental cyclicities during the last glaciation

S. Beltrán de Heredia García-Nieto[1,2], V. Villasante Marcos[2], F. Martínez Ruiz[1], S. Casanova Arenillas[1], F. J. Rodríguez Tovar[3]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Avda. de las Palmeras, 4-18100 Armilla (Granada), Spain. silvbdh@gmail.com, silvia.beltran@csic.es, fmruiz@ugr.es, scasanova@ugr.es
2 Laboratorio de Magnetismo de Materiales y Magnetismo Ambiental (L-MAGMA), Instituto Geográfico Nacional, Real Observatorio de Madrid, C/ Alfonso XII, 3, 28014 Madrid, Spain. vvillasante@mitma.es
3 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, Avenida de la Fuente Nueva S/N 18071 Granada, Spain. fjrtovar@ugr.es

Palabras clave: Magnetismo ambiental, Alborán, Series temporales, Lomb-Scargle, Dansgaard-Oeschger

Resumen

Se ha realizado un análisis de series temporales de datos de alta resolución de magnetismo de rocas en sedimentos marinos profundos (testigo GP03, Mar de Alborán), que abarcan los últimos 40.000 años, con el objetivo de detectar ciclicidades paleoambientales y variabilidad climática en esta región. Para ello, se ha aplicado tanto la Transformada Rápida de Fourier (FFT), como el periodograma clásico de Lomb-Scargle, calculando la significancia estadística de los picos espectrales mediante una evaluación Monte Carlo del test de permutación, junto con una modificación del periodograma que tiene en cuenta los errores experimentales de los datos. Los resultados revelan la presencia de ciclicidades características durante la última glaciación, especialmente entre 25 y 38 ka, donde el pico espectral más intenso tiene un periodo de ~2 ka, concordando con el rango característico de las fluctuaciones climáticas de Dansgaard-Oeschger (D-O), y que surge de la concordancia observada entre valores altos de susceptibilidad magnética y magnetización remanente de saturación con las fases cálidas D-O. Estos máximos relativos en la abundancia de minerales magnéticos apuntan a un aumento de la abundancia de magnetita frente a la de hematites en los sedimentos, lo que sugiere variaciones en el aporte fluvial vs. eólico. Hasta donde sabemos, este es el primer estudio que muestra una relación tan notable entre datos magnéticos de sedimentos marinos y ciclicidades paleoclimáticas en el rango de los eventos D-O en el Mediterráneo Occidental durante la última glaciación.

Abstract

Time-series analysis of high-resolution rock magnetic data from deep-sea marine sediments (core GP03, Alboran Sea), spanning the last 40.000 years, has been performed to reveal paleoenvironmental cyclicities and climate variability in this region. We have applied both the classical Fast Fourier Transform (FFT), and the classical Lomb-Scargle periodogram computing the Achieved Confidence Level of the different spectral peaks by a Monte Carlo evaluation of the permutation test, while also also testing a modification of the periodogram that takes into account the experimental errors of the analyzed data. The obtained results highlight the presence of characteristic cyclicities during the last glaciation, especially between 25 and 38 ky, where the most intense spectral peak has a period around 2 ky, which is consistent with the characteristic periods of Dansgaard-Oeschger (D-O) climate fluctuations, and is clearly arising from the observed match between high magnetic susceptibility and saturation remanent magnetization values with D-O warm phases. These relative maxima in magnetic mineral abundance point to an increase in magnetite vs. hematite abundance in the sediments, suggesting variations in riverine vs. aeolian terrigenous inputs. To our knowledge, this is the first report of such a remarkable relationship between marine sedimentary rock magnetic data and paleoclimatic cyclicities in the frequency range of the D-O events in the Western Mediterranean over the last glaciation.

Análisis magnético del tránsito Paleoceno/Eoceno en una secuencia sedimentaria continental (Formaciones Esplugafreda y Claret, cuenca Tremp-Graus, Pirineos)

Magnetic analysis of the Paleocene/Eocene transition in a terrestrial sedimentary sequence (Esplugafreda and Claret Formations, Tremp-Graus basin, Pyrenees)

M.F. Bógalo[1], D. S. C. Vieira[2], S. Kele[2,3], A. Payros[4], J.J. Villalaín[1], E. Vernet[1], P. Calvín[5], G. Újvári[2,3]

1 Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, Av. Cantabria, s/n, 09006 Burgos. mfbogalo@ubu.es, villa@ubu.es, evernet@ubu.es.
2 HUN-REN Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Institute for Geological and Geochemical Research, Budaörsi út 45, 1112 Budapest, Hungary. daniellacvieirah@gmail.com, kele.sandor@csfk.org, ujvari.gabor@csfk.org
3 CSFK, MTA Centre of Excellence, Konkoly Thege Miklós út 15-17., 1121 Budapest
4 Departmento de Geología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, 48080 Bilbao. a.payros@ehu.eus
5 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, Unidad de Zaragoza, 20059 Zaragoza. calvinballester@gmail.com

Palabras clave: magnetismo de las rocas, magnetismo ambiental, PETM, Pirineos

Resumen

El máximo térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM), corresponde a un episodio rápido (~ 170 ky) y global de aumento de temperatura que ocurrió hace aprox. 56 Ma y que quedó bien registrado en la llanura costera de la Cuenca Tremp-Graus en Pirineos, situada en el cinturón climático subtropical (paleolatitud ~35 °N). La secuencia muestreada en Esplugafreda (provincia de Lleida) abarca la Formación Esplugafreda (los 80 metros superiores) y la Formación Claret, que incluye cuatro intervalos distintivos: (i) el conglomerado Claret, (ii) los suelos amarillentos, (iii) la unidad rica en yesos, y (iv) las lutitas rojizas superiores. Según los datos de isótopos estables, los tres primeros intervalos de la Formación Claret corresponden a diferentes fases del PETM. En esta secuencia se ha realizado un estudio detallado de magnetismo de rocas y de variación de la mineralogía magnética. Los experimentos magnéticos han mostrado una muy buena correlación entre la estratigrafía y la variación de propiedades magnéticas. Se ha determinado tanto la contribución relativa, como el estado magnético de la magnetita/maghemita, goetita y hematites en toda la secuencia. La elevada concentración de maghemita estable en un nivel de la parte inferior de la Formación Esplugafreda podría relacionarse con un posible impacto térmico, como puede ser un paleoincendio.

Abstract

The Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM) corresponds to a rapid (~ 170 ky) global warming episode that occurred about 56 Ma ago. It is well recorded in the coastal plain of the Tremp-Graus Basin in the Pyrenees, which was located in the subtropical climatic belt (paleolatitude ~35 °N). The succession sampled in Esplugafreda (Lleida province) comprises the Esplugafreda Formation (upper 80 m) and the Claret Formation, which includes four distinctive intervals: (i) the Claret conglomerate, (ii) the yellowish soils, (iii) the gypsum-rich unit, and (iv) the upper reddish mudstones. According to stable isotope data, the first three intervals of the Claret Formation correspond to different phases of the PETM. In this sequence, a detailed study of rock magnetism has been carried out to analyse the variation of the magnetic mineralogy along the sequence. The magnetic experiments have shown a very good correlation between the stratigraphy and the variation of magnetic properties. Both the relative contribution and the magnetic state of magnetite/maghemite, goethite and hematite throughout the sequence have been determined. The high concentration of stable maghemite in one level of the lower part of the Esplugafreda Formation could be related to a possible thermal impact, such as a paleo-fire.

Propiedades magnéticas a lo largo de la serie turbidítica remagnetizada de la Cuenca de Jaca

Magnetic properties of the remagnetized turbidites of the Jaca Basin

P. Calvín[1], E.L. Pueyo[1], R. Egli[2], E. Izquierdo-Llavall[1], P. Sierra-Campos[1], M.P. Mata[1], J.C. Larrasoaña [1,3]

1 IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza. 50059 Zaragoza. p.calvin@igme.es, unaim@igme.es, e.izquierdo@igme.es, p.sierra@igme.es, p.mata@igme.es, jc.larra@igme.es

2 Department of Geophysics, GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190, Vienna, Austria. ramon.egli@geosphere.at

3 Dpto. Ciencias & INAMAT[2], Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, Navarra. jc.larra@igme.es

Palabras clave: Western Pyrenees, rock-magnetism, remagnetization kinetics.

Resumen

La serie turbidítica de la Cuenca de Jaca está afectada por una remagnetización química relacionada con el enterramiento y las variaciones físico-químicas (fluidos y temperatura) durante el mismo. Este proceso da lugar a la formación de cristales autigénicos de magnetita y pirrotina de tamaño nanométrico que son capaces de registrar el Campo Magnético Terrestre durante su crecimiento. En este caso, la serie turbidítica registra diferentes crones de polaridad que se correlacionan lateralmente, al menos, desde el valle del Salazar al Oeste al del Gállego al Este. Este escenario, en el que observamos varios dominios de polaridad magnética y cronología diferente, nos ofrece un contexto idóneo para profundizar en el conocimiento sobre la cinética a la que se producen estos procesos de remagnetización química.

En este trabajo se realiza un estudio completo de magnetismo de rocas a lo largo de tres valles perpendiculares a la estructura (Salazar, Esca y Veral-Subordán), analizando como varían las propiedades magnéticas dentro de la serie sedimentaria y que, nos permite inferir diferentes aspectos como las variaciones en el contenido total de materiales ferrimagnéticos así como sus variaciones (mineralógicas y de tamaño de grano) en la vertical. En el análisis por medio de ciclos de histéresis y experimentos de *backfield* se observa una variación gradual entre dos comportamientos claramente diferenciados. Sin embargo, esta variación no está claramente relacionada con la profundidad ni con las paleotemperaturas que indican los estudios de espectroscopía Raman en material carbonáceo (RSCM). Por otro lado, la efectividad de la remagnetización es evaluada por medio de las relaciones entre la NRM y la ARM, con la finalidad de observar variaciones en la misma en relación con los cambios a lo largo del tiempo en los diferentes dominios de polaridad magnética.

Abstract

The turbiditic rocks of the Jaca Basin record a widespread chemical remagnetization associated with burial and the consequent physicochemical changes (fluid circulation and temperature). These changes triggered the neoformation of authigenic nanometric magnetite and pyrrhotite, which record the Earth's Magnetic Field during their growth. The turbiditic series records different polarities that can be along-strike correlated between the Salazar (to the West) and Gallego valleys (to the East), defining five domains with different polarity and subsequent chronology. This context provides an opportunity to analyze and shed light on the kinetics of the growing process of the ferrimagnetic authigenic grains.

This work presents new rock magnetic data from three valleys perpendicular to the regional structure (Salazar, Esca, and Veral-Subordán), and analyzes the variation in magnetic properties along the outcropping sedimentary series. The performed hysteresis loops and backfield experiments exhibit two endmembers with a gradual transition between them. However, this gradual change is not clearly related to the burial depth attained by turbidites or to the peak paleotemperatures obtained from analysis of Raman spectroscopy on carbonaceous material (RSCM). On the other hand, the effectiveness of remagnetization in relation to magnetic polarity changes is evaluated using NRM and ARM ratios in order to evaluate potential variations related to changes along time in the different polarity domains.

Resultados paleomagnéticos y de paleointensidad en una secuencia de coladas basálticas del Cáucaso Menor

Paleomagnetic and paleointensity results from a basaltic lava flow sequence from the Lesser Caucasus.

M. Calvo Rathert[1], E. M. Sánchez Moreno[1], E. Herrero-Bervera[2], G. Vashakidze[3], J. Morales Contreras[4], N. Pérez-Rodríguez[4], A. Goguitchaichvili[4], J. Solé Viñas[5]

1 Dpto. de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, España. mcalvo@ubu.es; emsanchez@ubu.es
2 Institute of Geophysics and Planetology, University of Hawai'i at Manoa, Honolulu, Estados Unidos. herrero@soest.hawaii.edu
3 Alexandre Janelidze Institute of Geology; Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi; Georgia. goga.vashakidze@gmail.com
4 LIMNA, Instituto de Geofísica, UNAM, Morelia, México. jmorales@igeofisica.unam.mx; nayemeialua@gmail.com; avto.gogichai@gmail.com
5 Instituto de Geología, y Lab. Nacional de Geoquímica y Mineralogía, UNAM, Cd. de México, México jsole@geologia.unam.mx

Resumen: Se ha llevado a cabo un estudio paleomagnético y de paleointensidad en 28 coladas basálticas sucesivas plio-pleistocenas en la secuencia de Khaveti, (meseta de Javakheti, Cáucaso Menor, Georgia). Los experimentos paleomagnéticos revelan dos comportamientos claramente diferenciados; mientras que las 14 coladas superiores arrojan una dirección de polaridad inversa (D= 185,8°; I= -53,1°; α_{95}= 2,3; k= 291), en la sección inferior de la secuencia, 13 coladas revelan una dirección transicional (D= 252,8°; I= 43,1°; α_{95}= 3,7; k= 130) y una no arroja resultados coherentes. Los experimentos termomagnéticos muestran mayoritariamente curvas reversibles con magnetita como único portador de la remanencia, aunque también se observaron titanomagnetitas con diferente contenido en titanio en algunos casos. El análisis de los parámetros de histéresis sugiere que el tamaño de grano de la mayoría de las muestras corresponde a partículas PSD, lo que también puede interpretarse en términos de una mezcla de granos SD y MD. Los experimentos de paleointensidad se llevaron a cabo con el método Thellier-Coe y el método multiespécimen. Las determinaciones Thellier-Coe experimentan una mejora significativa aplicando una corrección de *pTRM-check*, confirmada especialmente en las coladas inferiores por los resultados preliminares obtenidos con el método multiespécimen. La sección superior arroja paleointensidades entre 30 y 50 μT y la inferior, valores muy bajos, generalmente inferiores a 10 μT.

Palabras clave: paleomagnetismo, paleointensidad, transiciones de polaridad, Cáucaso

Abstract: *A paleomagnetic and paleointensity study was carried out on 28 successive Plio-Pleistocene basaltic lava flows from the Khaveti sequence in the Javakheti Highland in the Lesser Caucasus in Georgia. Paleomagnetic experiments reveal two clearly differing behaviours: while the upper 14 flows yielded a reverse polarity direction (D= 185.8°; I= -53.1°; α_{95}= 2.3; k= 291), in the lower section of the sequence 13 flows revealed a transitional direction (D= 252.8°; I= 43.1°; α_{95}= 3.7, k= 130) and one yielded no coherent results. Thermomagnetic experiments mostly display reversible curves with magnetite as the only carrier of remanence, although titanomagnetites with differing content of titanium were also observed in some cases. Analysis of hysteresis parameters suggests that the grain size of most samples corresponds to PSD particles, which can also be interpreted in terms of a mixture of SD and MD grains. Paleointensity experiments were carried out with the Thellier-Coe and the multispecimen method. Thellier-Coe determinations experience a significant improvement applying a pTRM-check correction, confirmed especially in the lower flows by preliminary multispecimen results. The upper section yields paleointensities between 30 and 50 μT and the lower section, very low values, generally below 10 μT.*

Key words: *paleomagnetism, paleointensity, polarity transition, Caucasus*

1. INTRODUCCIÓN

La dirección e intensidad de la magnetización remanente registrada en las rocas puede proporcionar información de gran interés sobre las variaciones con el tiempo del campo magnético terrestre (CMT). Las rocas volcánicas, en concreto, permiten un registro fiable y – en términos geológicos – instantáneo del CMT mediante la adquisición de magnetización termorremanente (TRM). Este registro estará, sin embargo, ligado a la ocurrencia de erupciones volcánicas, que son eventos discontinuos. El problema de analizar las variaciones de dirección e intensidad del CMT durante un intervalo de tiempo más prolongado puede abordarse estudiando secuencias de coladas volcánicas, especialmente si se caracterizan por una actividad eruptiva constante e intensa.

En la provincia volcánica de Javakheti, situada en el sur de Georgia en el Cáucaso Menor, se pueden encontrar numerosas secuencias de coladas volcánicas del Plioceno y Pleistoceno. Varias han sido ya objeto de estudios

paleomagnéticos y de paleointensidad (Goguichaichvili et al., 2021 y referencias citadas) y, en algunos casos, se han observado en ellas registros de inversiones y/o excursiones geomagnéticas. En el presente estudio, se exponen los resultados de investigaciones paleomagnéticas y de paleointensidad realizadas en veintiocho coladas volcánicas consecutivas en la secuencia de Khaveti, situada en el sector suroccidental de la meseta de Javakheti (Fig. 1).



FIGURA 1. *Localización de la secuencia de Khaveti en el Cáucaso. (Mapa adaptado de Google Earth).*

La formación de las cordilleras del Cáucaso está relacionada con la convergencia de las placas arábiga y euroasiática (p. ej., Adamia et al., 2008). Tras el cierre del Tethys hace unos 20 Ma., la colisión continental se caracterizó por la deriva hacia el norte de la placa de Arabia, la eyección lateral de la placa de Anatolia hacia el oeste y de la placa de Irán hacia el este (Philip et al. 1998). En el Gran Cáucaso y el Cáucaso Menor se formaron cinturones de plegamiento y cabalgamiento durante las fases sincolisional (Oligoceno - Mioceno medio) y postcolisional (Mioceno tardío - Cuaternario) (p. ej. Adamia et. al, 2008). En la región situada entre ambas placas coexisten estructuras compresivas, como cabalgamientos y pliegues E-O, y extensionales como fallas normales N-S y diques. El magmatismo neógeno-cuaternario del Cáucaso se asocia a la colisión de placas (Koronovskii and Demina, 1999) y se inició en el Mioceno medio, con erupciones volcánicas en época histórica. La provincia volcánica de la meseta de Javakheti es uno de los principales exponentes de este vulcanismo en el Cáucaso.

Se tomaron muestras de 28 coladas independientes de la secuencia de Khaveti mediante un taladro portátil de gasolina. La orientación de los testigos se realizó con brújula magnética y solar. Los resultados paleomagnéticos obtenidos (véase apartado 2), muestran una clara diferencia entre los resultados de la parte inferior y superior. Por ello, se distinguirá entre una secuencia inferior (las 14 coladas inferiores) y una secuencia superior (las 14 superiores). Se estima que la secuencia de Khaveti es de edad plio-pleistocena, y se han enviado dos muestras para llevar a cabo dataciones K-Ar, una de la secuencia inferior y otra de la superior.

2. MEDIDAS PALEOMAGNÉTICAS

Las mediciones paleomagnéticas se llevaron a cabo en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Burgos (España). Las muestras se sometieron a desmagnetización térmica y por campos alternos (AF), empleándose ambos métodos para todas las coladas. En la mayoría de los casos, aparte de una pequeña componente secundaria viscosa, sólo se pudo distinguir una única componente en las coladas superiores (fig.2). Aunque en las coladas superiores, en muchos casos, también se pudo apreciar solamente una componente primaria junto con una componente viscosa de intensidad moderada, en varias ocasiones se observó una componente viscosa más intensa, algunas veces superpuesta a la componente primaria.

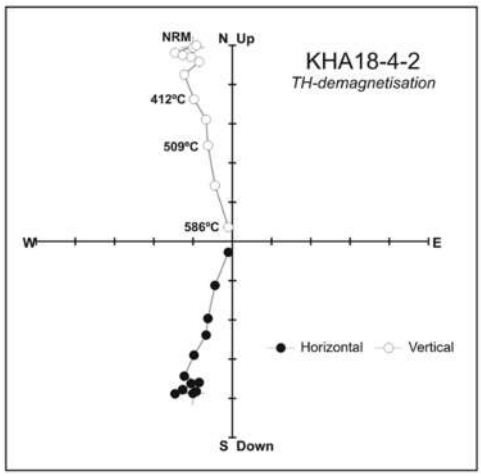


FIGURA 2. *Diagrama de Zijderveld de la desmagnetización térmica de una muestra de la secuencia superior.*

Aunque una de las coladas inferiores (colada KHA 7) no proporcionó resultados paleomagnéticos coherentes, en todas las demás coladas inferiores se pudo determinar una dirección media fiable. La figura 3 muestra una proyección estereográfica con la dirección esperada obtenida a partir de la curva de deriva polar aparente para Eurasia (Vaes et al., 2023) y las direcciones medias obtenidas en ambas secciones. Mientras que las coladas superiores muestran una dirección de polaridad inversa en muy buena concordancia con la esperada, las coladas inferiores muestran una dirección anómala, que parece ser transicional. Como todas las direcciones transicionales obtenidas en las distintas coladas son bastante similares, parece que la emisión de la secuencia inferior tuvo lugar en un periodo de tiempo relativamente corto. Cabe destacar que estas direcciones anómalas concuerdan muy bien con las direcciones transicionales halladas por Goguichaichvili et al. (2009) en otra secuencia del sur de Georgia, que tiene una edad de 3,69 Ma. Este resultado sugiere que la secuencia inferior sería de edad pliocena.

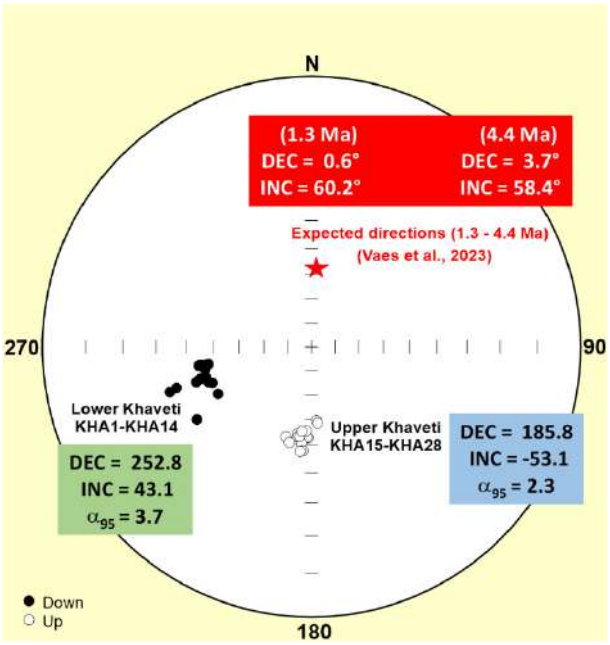


FIGURA 3. *Proyección estereográfica con las direcciones esperadas (1,3 Ma y 4,4 Ma, Vaes et al., 2023), las direcciones obtenidas en la secuencia inferior (coladas KHA1-KHA14) y la secuencia superior (coladas KHA15-KHA28). Se indican también las direcciones paleomagnéticas y el radio del cono de confianza, α_{95}.*

3. EXPERIMENTOS DE MAGNETISMO DE LAS ROCAS

Con el fin de identificar los portadores de remanencia y obtener información sobre su estabilidad paleomagnética, se llevaron a cabo los siguientes experimentos de magnetismo de las rocas: curvas de adquisición de remanencia isoterma (IRM), curvas de histéresis y backfield y curvas termomagnéticas (magnetización en función de la temperatura en campo intenso, 38 mT). Estas determinaciones se realizaron con una balanza de traslación VFTB sobre un espécimen de cada colada.

Las curvas de adquisición de IRM muestran un predominio de minerales de baja coercitividad, aunque se observa también una fracción menor de minerales de coercitividad intermedia o alta, ya que el 95% del valor de saturación se alcanza a menudo entre 200 y 400 mT. La mayor parte de las curvas termomagnéticas, tanto en la sección inferior como en la superior, se caracterizan por un comportamiento simple, con titanomagnetita con bajo contenido en Ti como único portador de la remanencia y un alto grado de reversibilidad. En algunos casos, también se observan curvas irreversibles, con magnetita y una fase de temperatura de Curie inferior (alrededor de 300°C) en la curva de calentamiento y solo magnetita en la de enfriamiento. Considerando que la magnetita es el principal portador de remanencia en la mayoría de los casos, el análisis de los parámetros de la curva de histéresis sugiere que la remanencia de estas muestras está asociada a una mezcla variable de granos MD y SD.

Los resultados paleomagnéticos y de magnetismo de las rocas indican que la mayor parte de las muestras podrían ser adecuadas para determinaciones de paleointensidad.

4. EXPERIMENTOS DE PALEOINTENSIDAD

Se realizaron determinaciones de paleointensidad con el método Thellier-Coe (Coe, 1967) en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Hawái sobre 166 muestras de las 28 coladas (101 de la sección superior y 65 de la inferior). Los experimentos se llevaron a cabo en aire y con refrigeración por ventilador. El campo aplicado en las coladas inferiores fue de 22,5 µT y de 44 µT en las superiores. La magnetización se midió con un magnetómetro JR5.

La aplicación estricta de un conjunto estándar de criterios (Leonhardt et al., 2004; Patterson et al., 2014) dio como resultado un porcentaje de éxito muy bajo, inferior al 11%. En las coladas superiores solo se obtuvieron 11 determinaciones fiables y en las inferiores, 7. La mayor parte de las determinaciones fueron rechazadas debido a la alteración mostrada por los pTRM-checks, y en algunos casos también por la forma cóncava de los diagramas de Arai. Sin embargo, si se aplica la corrección propuesta por Valet et al. (1996), basada en los pTRM-checks, los puntos del diagrama de Arai aparecen mucho más alineados. Este comportamiento se observa en muchos de los especímenes analizados y rechazados, especialmente en la secuencia inferior.

Hay que mencionar que este método de corrección ha sido criticado porque alberga ciertos riesgos, entre ellos, no poder proporcionar resultados corregidos fiables cuando la alteración afecta a granos con mayor temperatura de bloqueo que la de calentamiento. Por otro lado, además de proporcionar datos mucho mejor alineados en los diagramas de Arai, los resultados de las determinaciones de paleointensidad muestran una mejor coherencia en y entre las coladas tras la aplicación de las correcciones (Tab. I y II).

COLADA	n/N	F(⌈T)	⊗F(⌈T)
KHA14	1/1	2.1	0.3
KHA13	4/6	9.7	1.5
KHA12	0/4		
KHA11	3/6	5.0	1.6
KHA10	4/7	14.4	7.0
KHA9	5/6	7.8	2.6
KHA8	7/8	7.0	2.3
KHA7	0/1		
KHA6	1/1	7.0	0.4
KHA5	7/8	11.4	4.1
KHA4	2/2	9.4	2.9
KHA3	3/3	9.7	2.8
KHA2	4/7	14.4	7.0
KHA1	3/5	36.5	3.7

TABLA I. *Resultados de paleointensidad (Thellier-Coe) de las coladas inferiores. n/N: número de determinaciones aceptadas/número de determinaciones realizadas. F y ΔF: paleointensidad e incertidumbre.*

En la sección inferior, todas las coladas que proporcionan resultados válidos muestran paleointensidades muy débiles, generalmente por debajo de 10 µT, excepto la

COLADA	n/N	F(⌈T)	⊗F(⌈T)
KHA28	3/8	40.2	16.7
KHA27	7/8	25.1	13.5
KHA26	5/9	27.1	12.8
KHA25	2/5	41.9	0.8
KHA24	3/6	30.3	9.2
KHA23	4/6	51.3	8.6
KHA22	4/8	37.3	8.2
KHA21	2/7	46.4	0.4
KHA20	4/6	51.4	20.8
KHA19	6/8	54.6	21.9
KHA18	5/8	52.5	5.9
KHA17	7/8	41.2	8.9
KHA16	6/8	43.7	19.7
KHA15	5/6	31.8	6.3

TABLA II. *Resultados de paleointensidad (Thellier-Coe) de las coladas superiores. n/N, F y ΔF como en Tabla I.*

colada KHA1. Este resultado concuerda con la idea de un registro transicional, como sugieren los resultados paleomagnéticos. Por otra parte, en la secuencia superior se obtienen paleointensidades entre 30 y 50 μT. El campo actual en Georgia tiene una intensidad de unos 50 μT.

CONCLUSIONES

Resultados paleomagnéticos: En la sección inferior se observan direcciones paleomagnéticas transicionales, en la sección superior direcciones paleomagnéticas de polaridad inversa, que coinciden con las esperadas.

Resultados de paleointensidad: La tasa de éxito de las determinaciones de tipo Thellier-Coe es muy baja (11%), pero se aprecia una mejora significativa con la corrección de *pTRM-check*, confirmada por los resultados preliminares con el método multiespécimen. En las coladas inferiores se aprecian paleointensidades muy bajas, generalmente inferiores a 10 μT y en las superiores, paleointensidades entre 30 y 50 μT.

*Datación:*Posible edad pliocena (3,69 Ma) de la secuencia inferior.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto PID2019-105796GB-100/AEI/10.13039/501100011033. MCR agradece a Comisión Fulbright y Min. de Ciencia, Innovación y Universidades una estancia en la *University of Hawai'i at Manoa*. G.V. agradece la financiación de Fund. Nac. para la Ciencia de Georgia Shota Rustaveli, (FR-22-19681).

REFERENCIAS

Adamia, S., Zakaraiadze, G., Chkhouta, T., Sadradze, N., Tsereteli, N., Chabukiani, A. y Gventsadze, A. (2011): Geology of the Caucasus: A Review. *Turkish J. Earth Sci., Vol. 20, 489-544.*

Coe, R. S. (1967): Paleointensities of the earth's magnetic field determined from Tertiary and Quaternary rocks, *J. Geophys. Res.*, 72 (12), 3247-3262.

Goguitchaichvili A., Cervantes, M. A., Calvo-Rathert, M., Camps, P., Sologashvili, J. y Maissuradze, G. (2009). Gilbert-Gauss Geomagnetic Reversal Recorded in Pliocene Volcanic Sequences from Lesser Caucasus: Revisited, *Earth, Planets and Space*, Vol 61, 71-82.

Goguitchaichvili, A., Gómez, B., Calvo-Rathert, M., Lebedev, V., Cervantes, M., Vashakidze, G., Sologashvili, J. y Morales J. (2021): Noise across Olduvai Subchron: Paleomagnetic study of a Pliocene lava succession from Javakheti Highland (Georgia, Lesser Caucasus). *Phys. Earth Planet. Inter*., 311, doi: 10.1016/j.pepi.2020.106641.106641.

Koronowski, N.V. y Demia, L.I. (1999). Collision stage of the evolution of the Caucasian sector of the Alpine fold belt: geodynamics and magmatism. *Geotectonics*, 33, 102-118.

Leonhardt, R., Heunemann, C. y Krása, D. (2004). Analyzing absolute paleointensity determinations: Acceptance criteria and the software ThellierTool4.0. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 5, no. 12, doi.: 10.1029/2004GC000807.

Philip, H., Cisternas, A., Gvishiani, A. and Gorshkov, A., (1989). The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*, 161, 1-21.

Vaes, B., van Hinsbergen, D.J.J., van de Lagemaat, S.H.A., van der Wiel, E., Lom, N., Advokaat, E.L., Boschman, L.M., Gallo, L.C., Greve, A., Guilmette, C., Li, S., Lippert, P.C., Montheil, L., Qayyum, A., and Langereis, C.G. (2023). A global apparent polar wander pathfor the last 320 Ma calculated from site-level paleomagnetic data. *Earth-Science Reviews*, 104547, doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104547

Valet, J.P., Brassart, J., Le Meur, I., Soler, V., Quidelleur, X., Tric, E. y Gillot, P.Y. (1996). Absolute paleointensity and magnetomineralogical changes. *J. Geophys. Res.,* Vol. 101, B11, 25007-25573.

Registro arqueomagnético de baldosas de viviendas afectadas por la erupción de 2021 del volcán Tajogaite (La Palma, Canarias).

Archaeomagnetic record of house tiles affected by the 2021 eruption of the Tajogaite volcano (La Palma, Canary Islands).

Á. Carrancho[1], M. Calvo-Rathert[2], J. Mª. Parés[3], V. Soler[4], E. Vernet[2], Mª. F. Bógalo[2] y E. M. Sánchez-Moreno[2]

1 Departamento de Historia, Geografía y Comunicación, Universidad de Burgos, 09001 Burgos, España. acarrancho@ubu.es
2 Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, Av. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España. mcalvo@ubu.es; evernet@ubu.es; mfbogalo@ubu.es; emsanchez@ubu.es
3 Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Burgos, España. 09002. josep.pares@cenieh.es
4 Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, La Laguna, España. vsjavaloyes@gmail.com

Palabras clave: Volcanismo, termorremanencia, arqueointensidad, temperatura, magnetismo de las rocas.

Resumen

La erupción en 2021 del volcán Tajogaite en la isla de La Palma (Canarias) arrasó cultivos, casas y otras propiedades. El objetivo de esta investigación es determinar si la lava generó cambios distinguibles en el registro magnético original de baldosas de viviendas afectadas por la colada. Esto tiene interés no sólo para evaluar el impacto de erupciones volcánicas en contextos similares, sino que también permite contrastar el método ya que las condiciones y fecha de la erupción son conocidas. Se recogieron baldosas orientadas de varias viviendas distinguiendo dos tipos según su color (grises y rojas). El principal portador de la magnetización es magnetita escasamente substituida con contribuciones variables de hematites, según el tipo y color de baldosa. Ambos tipos de baldosas son altamente magnéticas y exhiben diagramas de desmagnetización estables y univectoriales. Únicamente se han identificado termorremanencias parciales con máximas temperaturas de desbloqueo de entre 400 – 500 ºC en alguna baldosa gris. La dirección arqueomagnética obtenida en ambos tipos de baldosas es similar a la esperada, aunque parece haber cierta infraestimación en la inclinación. Se están realizando análisis de anisotropía de la TRM para determinar si hay algún efecto al respecto y corregirlo. También se están realizando análisis de arqueointensidad absoluta mediante el método Thellier-Coe con el fin de evaluar si estos materiales han registrado fielmente la intensidad del campo magnético terrestre. Se demuestra cómo el calentamiento a alta temperatura de la lava sobre estas baldosas ha generado una nueva TRM que reseteó su magnetización original. No obstante, la identificación ocasional de pTRMs es un método efectivo para determinar la última temperatura de recalentamiento.

Abstract

The 2021 eruption of the Tajogaite volcano in La Palma (Canary Islands) devastated crops, houses and other properties. The aim of this research is to determine whether the lava generated distinguishable changes in the original magnetic record of house tiles affected by the lava flows. This is interesting not only to assess the impact of volcanic eruptions on similar sites, but also allows the method to be tested as the eruption conditions are known. Magnetically oriented tiles were collected from several dwellings distinguishing two types according to their colour (grey and red). The main magnetic carrier is slightly substituted magnetite with variable contributions of haematite, depending on the tile type and colour. Both types of tiles are highly magnetic and exhibit stable, univectorial NRM demagnetisation diagrams. Partial thermoremanences (pTRMs) with maximum unblocking temperatures between 400 - 500 ºC were identified in some grey tiles. The mean archaeomagnetic direction obtained for both types of tiles is similar to the expected one, although there seems to be some underestimation of the inclination. TRM anisotropy analyses are being carried out to determine if there is any effect about this and correct it. Absolute archaeointensity analyses are also being performed using the Thellier-Coe method to assess whether these materials faithfully recorded the strenght of the Earth's magnetic field. It is shown how high-temperature heating of lava on these tiles generated a new TRM that reset their original magnetisation. However, the occasional identification of pTRMs is an effective method to determine the last reheating temperature.

Aplicación de la prospección magnética al estudio de la ciclidad en series verticales: ejemplos de las cuencas del Ebro y Cameros.

Applying magnetic surveys to the study of cyclicity in vertical sequences: examples from the Ebro and the Cameros basins.

A. Casas[1], L. Arlegui[1], B. Oliva[1], T. Román[1] y C. Liesa[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra. Grupo de investigación Geotransfer (IUCA). Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza, acasas@unizar.es, arlegui@unizar.es, boliva@unizar.es, mtdjrb@unizar.es, carluis@unizar.es

Palabras clave: ciclidad, magnetometría, susceptibilidad magnética, Ebro, Cameros.

Resumen

En trabajos anteriores (Casas-Sainz et al., 2024) hemos demostrado que la prospección magnética se puede aplicar al estudio de la ciclidad en determinadas condiciones, que se encontraron en el caso de la cuenca cretácica de Cameros. En dicho caso, toda la secuencia estudiada está afectada por una remagnetización, los contrastes de susceptibilidades entre las capas de distinta litología son relativamente altas y la combinación del buzamiento de las capas y pendiente de las vertientes es idónea para realzar las anomalías magnéticas. En el presente trabajo aplicamos la prospección magnética al estudio de series sedimentarias proponiendo tres ejemplos con propiedades diferentes, pero teniendo en común que son series verticales: (1) La serie Eocena-Oligocena (5000 m) de Los Arcos (Navarra), la mayor parte de la cual se sitúa bajo la discordancia de Barbarín (Riba, 1992). (2) La Fm. Campodarbe (Eoceno superior-Oligoceno), en Biel (Zaragoza), también con espesor próximo a los 5000 m. (3) La serie del Cretácico inferior de la Cuenca de Cameros, que aparece condensada en Clavijo (La Rioja), de 1000 m de espesor, y conteniendo facies rojas y calizas. Los resultados obtenidos muestran anomalías con amplitudes que varían normalmente entre 2 y 20 nT y longitudes de onda métricas, y también anomalías de mayor longitud de onda (además de las regionales) relacionadas con los cambios entre grandes unidades. El análisis de la ciclicidad muestra la presencia de ciclos (con un 99% de confianza, separados del ruido aleatorio) con periodos de metros a centenares de metros que se pueden relacionar con ciclos orbitales.

Abstract

In previous works (Casas-Sainz et al., 2024) our team demonstrated that magnetic surveying can be applied to the study of cyclicity in sedimentary sequences in the Cameros basin. In this case, the Berriasian-Albian sequence (1) is affected by a remagnetization, (2) the contrast of magnetic susceptibilities between beds is high and (3) the dip of units combined with the orientation of slopes provided good conditions for the application of this technique. In the present work we apply magnetic surveying to the study of (1) the Eocene-Oligocene, 5000 m thick sequence of Los Arcos (Navarra), located below the Miocene Barbarín unconformity (Riba, 1992), mostly detrital but also containing limestones and evaporites, (2) the Eocene-Oligocene, 5000 km thick, Campodarbe Fm. North of Biel (Zaragoza), consisting of an alternating series of sandstones and shales; (3) the Lower Cretaceous in the Clavijo area (La Rioja), where a 1000 m thick series and red beds and limestones crops out. The results obtained from the analyzed sequences show anomalies with amplitudes between 2 and 20 nT and short wavelengths (on the order of meters), that indicate that the lithological contrasts between strata are well represented, as well as longer wavelength anomalies that indicate the change of lithological units. Computer-aided analysis of cyclicity indicates cycles (99% of confidence, separated from random noise) with periods from a few meters to hundreds of meters, that can be correlated with orbital cycles.

Referencias

Casas, A. M., Muñoz, A., Tella, A., Liesa, C. L. (2024). *Cretaceous Research*, *154*, 105736.
Riba i Arderiu, O. (1992). *Acta Geológica Hispánica*, 55-68.

Las fábricas magnéticas como marcadores de la evolución de la microplaca Ibérica durante el Cretácico y Cenozoico.

Applying magnetic fabric analysis to the Cretaceous-Cenozoic evolution of the Iberian plate.

A. Casas[1], B. Oliva[1], M. Marcén[1,2], P. Calvín[2], L. A. Pérez-Valera[2], L. Yenes[2], S. Torres[3], V. C. Ruiz[4], T. Mochales[5], A. Simón[1], J. J. Villalaín[2], M. F. Bogalo[2] y T. Román[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Grupo de investigación Geotransfer (IUCA), Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, acasas@unizar.es, boliva@unizar.es, mma@unizar.es, anasimon@unizar.es, mtdjrb@unizar.es
2 Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09006 Burgos. pcalvin@ubu.es, laperez@ubu.es, lyenes@ubu.es, villa@ubu.es, mfbogalo@ubu.es
3 Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, Ciudad Universitaria de Cantoblanco 28049 Madrid. sara.torres@uam.es
4 Departamento de Física de la Tierra AAI, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense, CP? Madrid, vcarlos@ucm.es
5 Unidad de Zaragoza, Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, 50006 Zaragoza, t.mochales@igme.es

Palabras clave: fábrica magnética, ASM, Iberia, Cretácico, Albiense.

Resumen

A partir del estudio de casi 500 estaciones de medida repartidas por distintas unidades geológicas de la Península Ibérica (Cordillera Cantábrica, Cordillera Ibérica, Sistema Central, Llanura Manchega, y zonas externas de las Cordilleras Béticas) se han caracterizado las fábricas magnéticas de las series del Albiense-Cenomaniense (Fm. Utrillas y equivalentes laterales) de gran parte del interior peninsular. El muestreo se ha centrado en unidades lutíticas de zonas con escaso despegue de la cobertera sobre el basamento. Los resultados obtenidos muestran una heterogeneidad considerable en cuanto al origen de las fábricas, que son en algunos casos claramente extensionales mientras que en otros, en función de la posición en relación a la estructura o la orientación de los ejes del elipsoide magnético, pueden interpretarse como resultado de la compresión Cenozoica. Las fábricas extensionales ligadas a la evolución mesozoica de Iberia son frecuentes en las zonas próximas a las cuencas mesozoicas y materiales pre-Albienses, mientras que las fábricas compresivas dominan en zonas con escasa historia extensional. Financiación: PID2019-108753GB-C2.

Abstract

Based on the study of nearly 500 measuring sites distributed through different structural units of the Iberian Peninsula (Cantabrian Mountains, Iberian Chain, Central System, La Mancha plains, and external areas of the Betic Cordillera), the magnetic fabrics of the Albian-Cenomanian series (Utrillas Fm. and lateral equivalents) of a large part of inner Iberia have been characterized. The sampling has been mainly focused on pelitic units located in areas with little or no detachment of the sedimentary cover from the basement (Cretaceous units directly lying onto the Paleozoic basement or the Lower Triassic). Nevertheless, limestones underlying and overlying the target horizons were also sampled. The results obtained show a considerable heterogeneity in terms of the origin of the magnetic fabrics, which are clearly extensional in some cases, while in others, depending on their position in relation to the dominant structure, or the orientation of the magnetic ellipsoid axes, they can be reasonably interpreted as the result of the Cenozoic compression. The extensional fabrics linked to the Mesozoic evolution of Iberia are more frequent in areas close to important Mesozoic basins and in pre-Albian materials, whereas compressional fabrics dominate in areas that have undergone little or no extensional subsidence. Funding: PID2019-108753GB-C2.

Exploring Reversed Zoning through Magnetic Fabric: A Case Study of the Castelo Branco Pluton (Central Portugal)

Explorando la zonación inversa a través de la fabrica magnética: un estudio de caso del plutón de Castelo Branco (Portugal Central)

C. Cruz[1], I.M.H.R. Antunes[2], F. Noronha[1] y H. Sant'Ovaia[1]

1 Earth Science Institute, Department of Geosciences, Environment and Spatial Planning, Faculty of Sciences of Porto University, Rua do Campo Alegre, 4169-007 Porto, Portugal. claudiacruz@fc.up.pt, fmnoronh@fc.up.pt, hsantov@fc.up.pt
2 Institute of Earth Sciences, Pole of University of Minho, Department of Earth Sciences, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal. imantunes@dct.uminho.pt

Abstract: The Castelo Branco pluton, a composite Variscan pluton comprising six granitic facies, intrudes metasediments from the Schist-Greywacke Complex (Beiras Group), and Ordovician-Devonian formations in synclines and monoclines NW-SE oriented. This study focuses on analyzing the magnetic behavior and magnetic fabric of the pluton to gain insights into its emplacement model. The NW-SE structural trend is evident in the magnetic fabric and residual gravity anomaly map. The integration of magnetic fabric and gravimetric data provides key findings into the emplacement model: the feeding zone aligns predominantly NW-SE, consistent with D1/D3 structural orientation; the pluton exhibits two main roots, one near the NW edge and the other one in the central zone; and the concentric magnetic foliation with outward steep dips in the Ms > Bt granite set suggests that the ascent and emplacement of this granite occurred before the Bt > Ms granite group. This last observation underscores the reverse zoning, corroborating findings from previous geochemical studies.

Key words: anisotropy of magnetic susceptibility, magnetic fabric, emplacement model, reversed zoning

Resumen: *El plutón de Castelo Branco, un plutón Varisco compuesto por seis facies graníticas, intruye en los metasedimentos del Complejo Esquisto-Grauváquico (Grupo Beiras), y formaciones Ordovícico-Devónicas en sinclinales y monoclinales cuyos ejes tiene una orientación NO-SE. Este estudio se centra en el análisis del comportamiento magnético y de la fábrica magnética del plutón de Castelo Branco para comprender mejor su modelo de emplazamiento. La tendencia estructural NO-SE es evidente en la fábrica magnética y en el mapa de anomalía residual gravimétrica. La integración de la fábrica magnética y los datos gravimétricos proporciona hallazgos clave en el modelo de emplazamiento: la zona de alimentación se alinea predominantemente NO-SE, coherente con la orientación estructural D1/D3; el plutón exhibe dos raíces principales, una cerca del borde NO y la otra en la zona central; y la foliación magnética concéntrica con buzamientos pronunciados hacia el exterior, en el grupo de granito Ms > Bt, sugiere que el ascenso y emplazamiento de este grupo de granitos ocurrió antes que el emplazamiento del grupo de granito Bt > Ms. Esta última observación destaca la zonación inversa, corroborando los hallazgos de estudios geoquímicos previos.*

Palabras clave: *anisotropía de susceptibilidad magnética, fábrica magnética, modelo de emplazamiento, zonación inversa*

INTRODUCTION

The Castelo Branco pluton (CB pluton) is a variscan peraluminous S-type granitic pluton located in the Central Iberian Zone (central-east of Portugal). This pluton is a circumscribed composite pluton composed of six facies: (i) Alcains, a medium- to fine-grained muscovite > biotite granite, that forms the pluton's core; (ii) Rio de Moinhos, medium- to fine-grained slightly porphyritic biotite > muscovite granodiorite; (iii) S. Miguel da Acha (or Castelo Branco), medium- to coarse-grained porphyritic biotite > muscovite granodiorite with cordierite, defined the external zone of the pluton; (iv) Soalheira, a coarse-grained muscovite > biotite granite with sulfides; (v) Castelo Novo, a medium-grained muscovite = biotite granite in small outcrop between Soalheira and S. Miguel da Acha (or Castelo Branco) granitoids, and (vi) Póvoa da Palhaça, a fine- to medium-grained muscovite granite in the N of the pluton (Meireles, 2020; Fig. 1).

Antunes (2006) previously distinguished different facies within the CB pluton. However, its boundaries do not precisely match the cartographic outlines on Sheet 4 at a 1:200 000 scale, as defined by Meireles (2020). On the area of Castelo Branco, Antunes (2006) identified 5 granitic rocks: G1, representing the core of the pluton, corresponding to the Alcains granite (Fig. 2a), G2 and G3 are granodiorites, roughly corresponding to the Rio de Moinhos granite, transitioning into G4, identical to the S.

Miguel da Acha (or Castelo Branco) granite (Fig. 2b) further evolving into G5, comparable to the Soalheira (or Lardosa granite) and Castelo Novo granites, with biotite = muscovite.

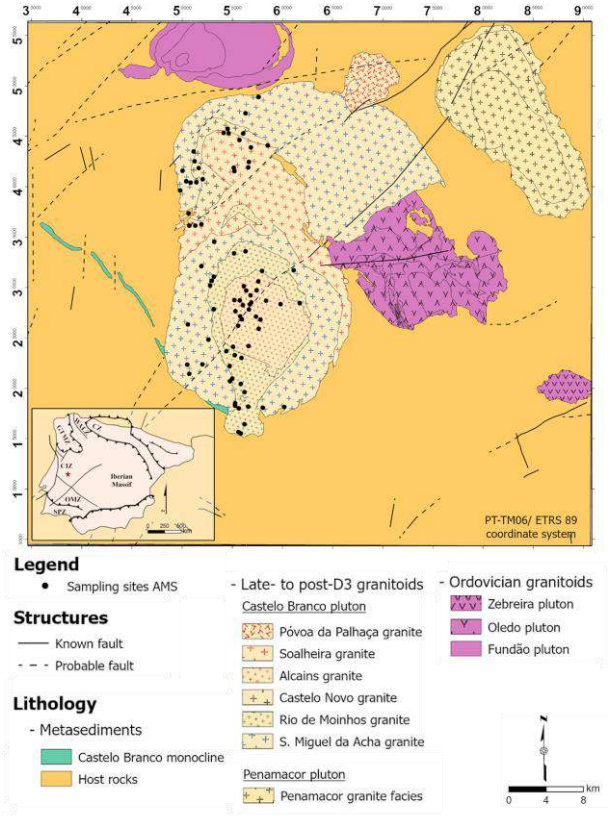


FIGURE 1. Simplified geological map of the Castelo Branco pluton with the location of the AMS sites (based on Meireles, 2020).

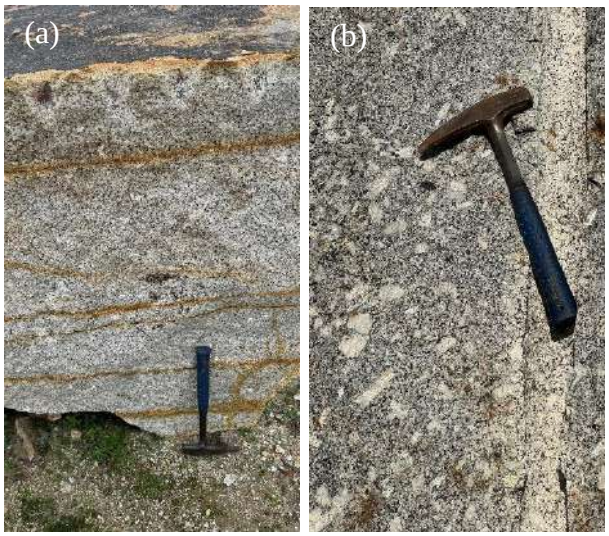


FIGURE 2. Field photographs of the two major granite groups: (a) Ms > Bt (photo of Alcains/G1 granite); (b) Bt > Ms (photo of G4 Castelo Branco/ S. Miguel da Acha granite).

The CB pluton, dated at 310 ± 1 Ma (Antunes et al., 2008), intrudes metasediments from the Schist-Greywacke Complex (Beiras Group) and intense folded Ordovician-Devonian formations, and also a biotite granodiorite of 480 ± 2 Ma (Antunes et al., 2009). The folds result from phase D1 and D3 of Variscan deformation phases (Meireles, 2020), and are NW-SE oriented, with subhorizontal axes and vertical axial planes. These structures occur in the form of synclines (e.g. Vila Velha do Rodão) or monoclines (e.g. Castelo Branco; Romão et al., 2013).

The primary goal of this study is to analyze the magnetic behavior and magnetic fabric of the pluton, aiming to offer insights into its emplacement model. The AMS investigation involved examining 607 rock cylinders collected from approximately 84 sampling sites distributed throughout the CB pluton (Fig. 1).

RESULTS AND DISCUSSION

The magnetic susceptibility (Km) values exhibit a range of 7.3 to 186.0 µSI for all granitic rocks, with a mean value of 71.5 µSI. These values enable the classification of the CB pluton as an ilmenite-type granite, according to the classification of Ishihara (1977). Two major groups can be identified (Fig. 3): (i) a biotite-rich set of granites with biotite > muscovite (Bt > Ms), represented by the Rio de Moinhos and S. Miguel da Acha granites (falling within the range of 38.2 < Km < 186.0 µSI and a mean value of 89.2 µSI), and (ii) a two-mica granite suite with muscovite > biotite (Ms > Bt), encompassing the Alcains, Soalheira, and Castelo Novo granites, which exhibit values of 7.3 < Km < 89.7 µSI and a mean value of 51.1 µSI.

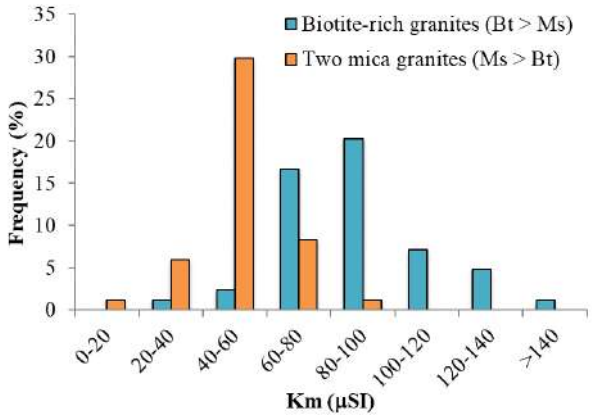


FIGURE 3. Histogram of the bulk susceptibility values of the two sets of CB granites.

The magnetic foliations throughout the pluton exhibit a consistent pattern, predominantly striking in an NW-SE direction with steep dips. However, there is a variation in the dip direction of the foliations within the pluton: outward dipping in the central granite and generally inward dipping in other parts.

Within the first group characterized by Bt > Ms granites, the magnetic foliations exhibit inward steep dips and follow a NW-SE striking orientation, with a mean foliation orientation of N143ºE; 90º (Fig. 4a). Regarding the second group, characterized by Ms > Bt granites, the mean foliation orientation is N137ºE; 84º SW. In the central region of the pluton, specifically in Alcains granite, the magnetic foliations are concentrically distributed with outward steep dips (Fig. 4a).

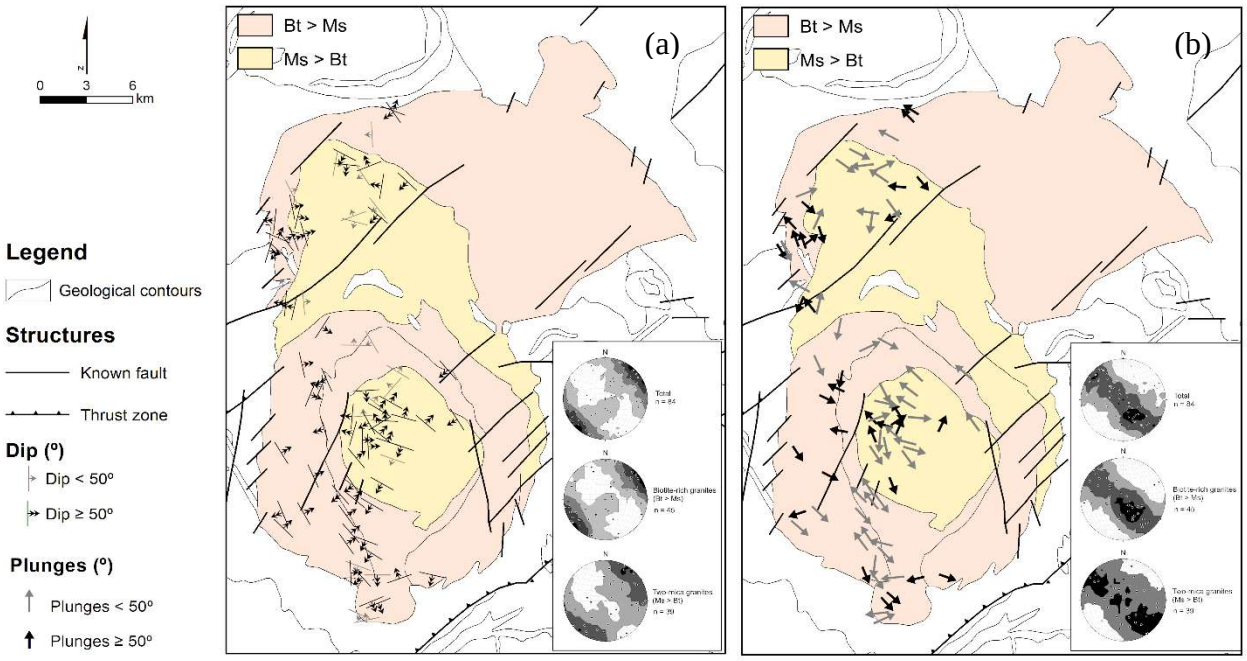


FIGURE 4. Magnetic fabric: (a) Magnetic foliations; (b) Magnetic lineations.

In the whole pluton, the magnetic lineations trend in an NW-SE direction with variable dips, and their orientation are independent of the type of granitic rock. In the central and northern areas of the pluton, the magnetic lineations plunge moderately (< 50º), while in other regions, they tend to be steeper (> 50º) (Fig. 4b).

The magnetic fabric reveals a prevailing NW-SE orientation evident in both magnetic foliation and lineation (Fig. 4). This orientation aligns with a broader regional trend, marked by the main orientation of the synclines and monoclines structures (Fig. 1).

Furthermore, the gravimetric study was made based on data from the National Gravity Network (Direção-Geral do Território, 2022), encompassing 266 gravimetric stations. Within the studied area, the Bouguer anomaly varies from -51.17 mGal to 8.64 mGal, with a mean value of -16.68 mGal. The regional and residual anomaly maps, derived through a 1st order polynomial surface, best align with the Bouguer anomaly surface and known geology. Examining the residual anomaly map (Fig. 5), several assumptions can be drawn: (i) two circular zones with values lower than -32 mGal are observable to the NW and in the core of the pluton, indicating the presence of two root zones; (ii) these two negative anomalies align in an NW-SE direction, suggesting that the feeder area take advantage of D1 in-depth crustal anisotropies; (iii) the central negative anomaly extends to the east of the current pluton outcrops, showing the gravimetric signature of the Ordovician Oledo pluton, in continuity with the Castelo Branco pluton (Cruz et al., 2023).

CONCLUSIONS

The NW-SE structural trend, visible in the residual anomaly map, aligns with findings from magnetic fabric. Accordingly, the combination of magnetic fabric and gravimetric information allows for the following insights into the emplacement model: (i) the feeding zone of the pluton shows a predominant NW-SE alignment, consistent with the orientation of the D1 structures, (ii) the pluton has two main roots, one near the NW edge and the other one in the central zone, evidenced by two distinct negative anomalies found in these specific locations, and (iii) the concentric magnetic foliation with outward steep dips in the Ms > Bt set granites (Alcains and Soalheira granites), suggest that the ascent and emplacement of these granites took place before the Bt > Ms granite group, as the magnetic fabric indicate that the Ms > Bt set granites had greater space for spreading.

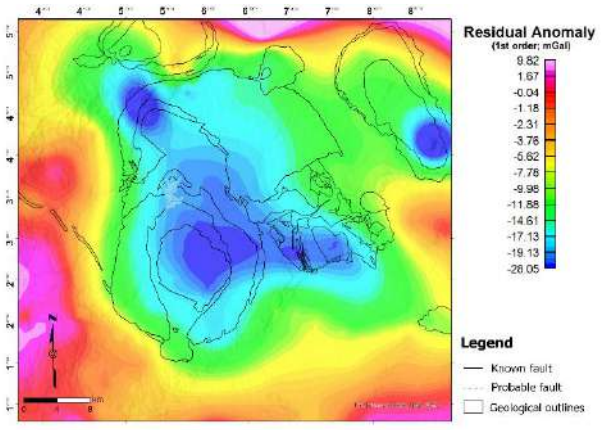


FIGURE 5. Residual anomaly map (obtained applying a 1st polynomial surface; modified from Cruz et al., 2023).

The last conclusion is in line with geochemical and petrological studies carried out by Antunes et al. (2008), which showed that CB pluton has uncommon inverse zoning resulting from a pulse of granite magma in the pluton's core of Alcains granite (or G1), followed by another pulse of granite magma, corresponding to Rio de Moinhos (or G2 facies), surrounding the Alcains granite,

and differentiating to originate granodiorite G3 and S. Miguel da Acha granite (or Castelo Branco/ G4) outwards. The same authors described that Soalheira granite (or G5) was originated by a distinct pulse of granite magma outwards.

ACKNOWLEDGEMENTS

C. Cruz is a contracted researcher under the UIDP/04683/2020 project (https://doi.org/10.54499/UIDP/04683/2020) awarded by FCT - Foundation for Science and Technology, I.P. This work is supported by national funding awarded by FCT projects UIDB/04683/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04683/2020) and UIDP/04683/2020.

REFERENCES

Antunes, I.M.H.R. (2006): *Mineralogia, Geoquímica e Petrologia de rochas granitóides da área de Castelo Branco-Idanha-a-Nova*. Thesis Doctoral, Univ. de Coimbra, 453 pp.

Antunes, I.M.H.R., Neiva, A.M.R., Silva, M.M.V.G. and Corfu, F. (2008): Geochemistry of S-type granitic rocks from the reversely zoned Castelo Branco pluton (central Portugal). *Lithos*, 103: 445-465.

Antunes, I.M.H.R., Neiva, A.M.R., Silva, M.M.V.G. and Corfu, F. (2009): The genesis of I- and S-type granitoid rocks of the Early Ordovician Oledo pluton, Central Iberian Zone (central Portugal). *Lithos*, 111: 168-185

Cruz, C., Sant'Ovaia, H. and Noronha, F. (2023): Feeding zones and emplacement constraints of the Castelo Branco pluton: gravimetric modelling contribution. En: *XI Congresso Nacional de Geologia: Geociências e Desafios Globais*. Livro de Resumos, 241-242. ISBN: 978-989-98914-8-7.

Direção-Geral do Território (2022): Rede Nacional de Gravimetria: https://snig.dgterritorio.gov.pt/rndg/srv/por/catalog.search#/search?anysnig=gravimetria&fast=index.

Ishihara, S. (1977): The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks. *Mining Geology*, 27: 292-305.

Meireles, C.A.P. (Coord.) (2020): *Folha 4 da Carta Geológica de Portugal, à escala 1/200 000*. 1ª Edição, Laboratório Nacional de Energía e Geología, Lisboa. ISSN: 978-989-675-080-0.

Romão, J., Metodiev, D., Dias, R., Ribeiro, A. (2013): Evolução geodinâmica dos sectores meridionais da Zona Centro-Ibérica. En: *Geologia de Portugal* (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha y J.C. Kullberg, eds.). Escolar Editora, 206-257.

Resultados arqueomagnéticos preliminares del Nivel R del Abric Romaní (Capellades, Barcelona).

Preliminary archaeomagnetic results from the Abric Romaní's Level R (Capellades, Barcelona).

J. del Río[1], A. Palencia Ortas[2], M. Gómez-Paccard[3], Á. Carrancho[4], J. Vallverdú[5], P. Saladié[6], M. G. Chacón Navarro[7], E. Carbonell i Roura[8]

1 Universidad de Burgos. Dpto. Historia, Geografía y Comunicación. Pza. Misael Bañuelos, s/n. 09001, Burgos. jdelrio@ubu.es
2 Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. Ingeniería Eléctrica, Electrónica Automática y Física Aplicada. ETS de Ingeniería y Diseño Industrial. C/ Ronda de Valencia, 3. 28012, Madrid. alicia.palencia@upm.es
3 Instituto de Geociencias, CSIC-UCM. C/ Dr. Severo Ochoa 7, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid. mgomezpaccard@csic.es
4 Universidad de Burgos. Dpto. Historia, Geografía y Comunicación. Pza. Misael Bañuelos, s/n. 09001, Burgos. acarrancho@ubu.es
5 Universitat Rovira i Virgili (URV), Departament d'Història i Història de l'Art, Avinguda de Catalunya 35, 43002, Tarragona; IPHES-CERCA. Zona Educacional 4 - Campus Sescelades URV (Edifici W3). 43007, Tarragona. jvallverdu@iphes.cat
6 URV; IPHES-CERCA. psaladie@iphes.cat
7 URV; IPHES-CERCA. gchacon@iphes.cat
8 URV; IPHES-CERCA. ecarbonell@iphes.cat

Palabras clave: arqueomagnetismo, magnetismo de rocas, hogares, Paleolítico Medio

Resumen

Debido a su uso continuado en el tiempo y a la abundancia de su registro de hogares, el Abric Romaní es un sitio arqueológico privilegiado para el estudio de la pirotecnología paleolítica en la Península Ibérica. Se realizó un estudio arqueomagnético de cuatro hogares del Nivel R (*ca.* 60 ka BP). 106 especímenes se desmagnetizaron térmicamente hasta los 580ºC. Además, se realizaron experimentos de magnetismo de rocas (IRM, histéresis, backfield y curvas termomagnéticas) para determinar su mineralogía magnética, y se forzó una adquisición artificial de la TRM con un campo aplicado de 50 μT para comprobar qué mecanismo de registro del campo magnético opera en el sustrato que compone el abrigo. Los resultados indican que se trata de materiales dominados por una señal diamagnética, con muy pequeñas proporciones de minerales magnéticos de baja coercitividad, posiblemente magnetita. Presentan una o dos componentes magnéticas: a) una que se aísla entre 250ºC y 420ºC, con direcciones inconsistentes probablemente debidas a alteraciones químicas o termo-químicas; b) otra aislada entre 300ºC y 550ºC, considerada una TRM completa adquirida durante el último calentamiento. Tres de las cuatro estructuras estudiadas registran direcciones arqueomagnéticas similares y compatibles con la edad de las estructuras. Pese a la baja proporción de magnetita y la baja señal magnética, los hogares son capaces de adquirir una termorremanencia y registrar la dirección del campo. Nuevos estudios son necesarios para confirmar estos resultados preliminares.

Abstract

Due to its long occupation sequence and the abundance of its pyro-technological record, the Abric Romaní rockshelter is particularly favourable to the study of Palaeolithic fire technology in the Iberian Peninsula. We conducted an archaeomagnetic study of four hearths from Level R (*ca.* 60Ky BP). 106 specimens underwent progressive thermal demagnetization up to 580ºC. Further rock magnetism experiments (hysteresis loops, IRM, backfield, and thermo-magnetic curves) were performed to determine their magnetic mineralogy, alongside a forced TRM acquisition in a field of 50 μT to explore the substrate's suitability for magnetization. Results indicate that the material is mostly diamagnetic in nature, but a small quantity of magnetic minerals exists nonetheless (a low coercivity fraction, possibly magnetite). Specimens show either one or two components: a) one defined between 250ºC-420ºC that shows no consistent directions, probably due to thermo-chemical or chemical alteration; and b) the other defined between 300ºC-550ºC, considered a full TRM acquired during the last heating. Three out of the four hearths record an archaeomagnetic direction consistent with their estimated age. We conclude that, despite their low content in ferrimagnetic minerals, these hearths are able to acquire a TRM and record the Earth's magnetic field. Further studies are needed to strengthen this argument.

Propiedades magnéticas y geoquímicas de lutitas aluviales de las Bardenas Reales de Navarra (Mioceno inferior y medio, cuenca del Ebro); resultados iniciales e implicaciones paleoclimáticas.

Magnetic and geochemical properties of lower-middle Miocene alluvial mudrocks from the Bardenas Reales of Navarre (Ebro basin); initial results and paleoclimatic implications.

J.C. Larrasoaña[1,2], J.I. Pérez-Landazabal[2], C. Gómez-Polo[2], E. Garayo[2], E. Beamud[3], J. González-Blázquez[4], M.P. Mata[5] y X. Murelaga[6]

1 CN IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza, 50059 Zaragoza. jc.larra@igme.es
2 Dpto. Ciencias & INAMAT[2], Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, Navarra. ipzlanda@unavarra.es, gpolo@unavarra.es, eneko.garayo@unavarra.es
3 Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB-Geo3BCN CSIC, 08028 Barcelona. betbeamud@ub.edu
4 CN IGME, CSIC, Litoteca de Sondeos, 14200 Peñarroya, Córdoba. j.gonzalez@igme.es
5 CN IGME, CSIC, 28760 Tres Cantos, Madrid. p.mata@igme.es
6 Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, 48940 Leioa, Bizkaia. xabier.murelaga@ehu.eus

Palabras clave: magnetismo de rocas, geoquímica, lutitas, Mioceno, Cuenca del Ebro.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados iniciales de las propiedades magnéticas (susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia, χfd%) y geoquímicas (composición elemental) de lutitas aluviales distales del Mioceno inferior y medio que afloran en el sector occidental de la Cuenca del Ebro. La sedimentología y las propiedades geoquímicas apuntan a una procedencia pirenaica para el conjunto de lutitas estudiadas, así como a procesos pedogénicos incipientes ocurridos tras la sedimentación. Las variaciones en Rb/Sr y χfd%, parámetros ampliamente utilizados para establecer la intensidad de dichos procesos edáficos, presentan similitudes, pero también algunas discrepancias notables a lo largo de la sección estratigráfica, de manera que no permiten establecer una relación clara entre la intensidad de los procesos pedogénicos y las condiciones climáticas de las que éstos, presuntamente, dependen. Así, resulta llamativo que el pico del óptimo climático del Mioceno (MCO, 17- 15.5 Ma), establecido en la secuencia a partir de datos sedimentológicos y paleontológicos independientes, no aparece asociado a una mayor pedogénesis. Estos resultados sugieren que las interpretaciones paleoclimáticas basadas en propiedades magnéticas y geoquímicas de lutitas de origen aluvial distal en la Cuenca del Ebro han de realizarse con cautela y en un marco multidisciplinar.

Abstract

Here we present the initial results on the magnetic (frequency-dependent susceptibility, χfd%) and geochemical (elemental composition) properties of lower and middle Miocene, distal alluvial mudrocks that crop out in the western sector of the Ebro Basin. The sedimentological and geochemical properties point to a Pyrenean origin for the studied sedimentary sequence, as well as to incipient pedogenic processes that occurred after sedimentation. Variations if χfd% and Rb/Sr, parameters widely used to constrain the intensity of such pedogenic processes, show similarities but also some notable discrepancies throughout the stratigraphic section, so that they do not allow establishing a mutually consistent relationship between the intensity of the pedogenic processes and the underlying climatic conditions. Thus, it is striking that the thermal peak of the Miocene climatic optimum (MCO, 17-15.5 Ma), established in the sequence from independent sedimentological and paleontological data, does not appear to be associated with enhanced pedogenic conditions. These results suggest that paleoclimatic interpretations based on magnetic and geochemical properties of distal alluvial mudrocks in the Ebro Basin must be carried out with caution and in the framework of multidisciplinary datasets.

La susceptibilidad magnética y su utilidad como proxy climático en sedimentos remagnetizados: El caso de la Cuenca de Cameros

Magnetic susceptibility in remagnetized sediments: still useful as a climatic proxy? Case study of the Cameros Basin

C.L. Liesa, A.M. Casas, L.E. Arlegui, N. Illueca, A. Luzón y A.R. Soria

Grupo GEOTRANSFER, Departamento de Ciencias de la Tierra-Instituto Universitario de Ciencias Ambientales (IUCA), Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.
carluis@unizar.es, acasas@unizar.es, arlegui@unizar.es, nillueca@unizar.es, aluzon@unizar.es, anasoria@unizar.es

Palabras clave: señal magnética, remagnetización, cicloestratigrafía, control climático.

Resumen

La cuenca cretácica de Cameros (norte de España) sufrió una remagnetización generalizada que fue adquirida antes de la inversión de la cuenca y posdata la etapa extensional principal de formación de la cuenca. El estudio cicloestratigráfico multiproxy realizado en las secciones de Navalsaz (Grupo Enciso) y Cidacos (Grupos Urbión, Enciso y Oliván) a partir de (1) contenido en carbonato (calcita, dolomita y carbonato total), (2) parámetros de color (índices L*, a*, b*), (3) susceptibilidad magnética, y (4) anomalías magnéticas de campo total y gradiente magnético vertical, ha permitido obtener resultados comparables. Se identifican numerosos ciclos por encima de la banda de confianza del 99% que se han relacionado con los ciclos de excentricidad larga y corta, oblicuidad y precesión. Nuestros resultados indican que la remagnetización en la cuenca de Cameros, responsable de la formación de la componente principal de la magnetización remanente natural (NRM), pudo producir cambios en los minerales portadores de la magnetización, pero la señal climática cíclica asociada a la susceptibilidad magnética y generada durante la etapa de cuenca es todavía reconocible. Interpretamos por tanto que la remagnetización dio lugar a un cambio en las fases minerales magnéticas sin una removilización significativa de los componentes magnéticos (hierro) en la sucesión estratigráfica, lo que apoya que los procesos de circulación de fluidos fueron más bien de carácter local, a escala de estrato o grupo de estratos.

Abstract

The Cretaceous Cameros Basin (northern Spain) underwent a widespread remagnetization that was acquired subsequent to the main extensional stage of basin formation but before basin inversion. A comprehensive multiproxy cyclostratigraphic study carried out in the Navalsaz and Cidacos sections, utilizing measures of (1) carbonate content (calcite, dolomite and total carbonate), (2) color parameters (L*, a*, b* indices) of the sediments, (3) magnetic susceptibility, and (4) magnetic anomalies of the total magnetic field and the vertical magnetic gradient, has allowed comparable results to be obtained. Numerous cycles surpassing the 99% confidence threshold were identified and correlated with long and short eccentricity, obliquity and precession. Our findings suggest that remagnetization in the Cameros basin, responsible for the secondary, main component of the Natural Remanent Magnetization (NRM), was able to produce changes in the minerals carrying the magnetization, but did not erase the climatic signal associated with magnetic susceptibility. We therefore interpret that remagnetization gave rise to a change in the magnetic mineral phases without a significant remobilization of the magnetic components (iron) in the stratigraphic succession, supporting that fluid circulation processes were restricted to the local scale.

El efecto del calentamiento en la anisotropía magnética: potenciando o revelando sub-fábricas ocultas.

The heating effect on magnetic fabrics: enhancing and revealing cryptic sub-fabrics.

M. Marcén[1, 2], J.J Villalaín[2]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Gr. Geotransfer (IUCA), Universidad de Zaragoza, 50005. mma@unizar.es
2 Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09006 Burgos. villa@ubu.es

Palabras clave: fábricas magnéticas, susceptibilidad magnética, calentamiento, ferromagnetismo.

Resumen

Es una evidencia que durante el calentamiento en estudios paleomagnéticos se produce un cambio en la susceptibilidad magnética a consecuencia de la cristalización de minerales ferromagnéticos *s.l* y/o alteración de minerales prexistentes. A su vez, la neoformación no se produce de forma homogénea, sino que queda condicionada por la petrofábrica de la roca calentada. En este trabajo analizamos el efecto del calentamiento en la fábrica magnética, determinando la orientación de los minerales neoformados y comparándola con la fábrica previa. Analizamos una amplia variedad de rocas sedimentarias: rocas carbonatadas remagnetizadas, carbonatos diamagnéticos, rocas detríticas ricas en hematites o en sulfuros o rocas de falla. La neoformación, condicionada por la mineralogía previa, resulta frecuentemente en la formación de óxidos de hierro (magnetita y, en menor medida, hematites). No obstante, la susceptibilidad no siempre se ve incrementada, observándose en ciertos casos invariable o incluso reduciéndose por alteración de minerales pre-existentes. Comparando la fábrica de la roca calentada con la original, podemos distinguir casos en los que no hay variación, más allá de un notable agrupamiento de los tres ejes principales de susceptibilidad y una considerable reducción en los errores de medida (*magnetic enhancement*), de aquellos casos en los que la fábrica magnética sí cambia en su orientación. Se constatan: 1) la desaparición de fábricas diamagnéticas o inversas asociadas a carbonatos, 2) cambios en la orientación de la lineación magnética, interpretables en un contexto tectónico de cuencas invertidas e 3) identificación de nuevas sub-fábricas no detectadas en la roca original.

Abstract

It is largely recognized that heating in paleomagnetic procedures induces changes in the magnetic susceptibility due to crystallization of ferromagnetic *s.l.* minerals or alteration of pre-existing ones. Additionally, neoformation does not occur homogeneously, but rather is conditioned by the petrofabric of the rock. In this study, we aim to analyze the effect of heating on the magnetic fabric, determining the orientation of newly formed minerals and comparing it with the pre-existing fabric. We study a wide variety of sedimentary rocks: carbonates from remagnetized basins, diamagnetic carbonates, hematite or sulphide-rich detrital rocks and fault rocks. Neoformation, influenced by the previous mineralogy, often results in the formation of iron oxides (magnetite and, to a lesser extent, hematite). However, susceptibility is not always increased and in certain cases remains unchanged or even decreases by alteration of pre-existing minerals. Comparing the fabric of the heated rock with the original, we can distinguish cases where there is no variation beyond a noticeable clustering of the three principal susceptibility axes and a considerable reduction in measurement errors (magnetic enhancement), from those cases where the magnetic fabric changes in its orientation. Observations include: 1) the disappearance of diamagnetic or inverse fabrics associated with carbonates, 2) changes in the orientation of magnetic lineation, interpretable in a tectonic context of inverted basins, and 3) identification of new sub-fabrics not detected in the original rock.

Evaluación de la susceptibilidad magnética en suelos afectados por incendios rurales en la Serra da Estrela (Centro de Portugal)

Assessment of magnetic susceptibility in soils affected by rural fires in Serra da Estrela (Central Portugal)

V. Martins[1], J. Ribeiro[2], C. Cruz[1], C. Mansilha[3] y J.E. Marques[1]

1 Instituto de Ciências da Terra, Departmento de Geosciências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal. up19970277@fc.up.pt, claudiacruz@fc.up.pt, jespinha@fc.up.pt
2 Universidade de Coimbra, Instituto Dom Luiz, Departamento de Ciências da Terra, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal. joana.ribeiro@uc.pt
3 Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, Departamento de Saúde Ambiental, Rua Alexandre Herculano, 321, 4000-055, Portugal. catarina.mansilha@insa.min-saude.pt

Palabras clave: Susceptibilidad magnética, Suelos, Fuego rural, Serra da Estrela.

Resumen

A Serra da Estrela (Portugal) fue afectada por un incendio forestal en agosto de 2022. Este estudio tiene como objetivo evaluar los cambios en las propiedades magnéticas de los suelos debido al incendio forestal, mediante la determinación de χ. Se recolectaron muestras de suelo de los horizontes O y A (Oh y Ah) en áreas no quemadas, mientras que la capa superficial de ceniza y Ah se recolectaron en áreas quemadas. El muestreo se realizó justo después del incendio y se repitió 8 meses después (excepto para cenizas y suelos no quemados). La χ se determinó utilizando el software Sumean del Kappabridge KLY-4S (AGICO). Los resultados revelan que los suelos, tanto quemados como no quemados, de áreas metasedimentarias tienen mayor χ (31,27-208,45 m^3 kg^{-1}) en comparación con los suelos de áreas graníticas (2,4-20,27 m^3 kg^{-1}). El mismo patrón se observó para las muestras de cenizas que presentan valores en el mismo rango. En áreas no quemadas, Oh tiene valores más bajos de χ comparativamente a Ah, explicado por el mayor contenido de materia mineral en Ah. Comparando muestras de Ah de zonas quemadas y no quemadas recogidas en la primera campaña, justo después del incendio, los resultados no expresan diferencias significativas, probablemente relacionadas con las características del fuego que afectaron con mayor intensidad al Oh. Al comparar muestras de Ah de las dos campañas, el χ es mayor en muestras recolectadas 8 meses después del incendio y la temporada de lluvias, lo que puede explicarse por la incorporación de las partículas de ceniza al suelo a lo largo del tiempo.

Abstract

The Serra da Estrela (Portugal) was affected by a forest fire in August 2022. This study aims to evaluate the changes in the magnetic properties of soils due to the forest fire, through the determination of χ. Soil samples from O and A horizons (Oh and Ah) were collected in unburned areas, while the superficial ash layer and Ah were collected in burned areas. Sampling was performed just after the fire and repeated 8 months later (except for ash and unburned soils). The χ was determined using the Sumean software from the Kappabridge KLY-4S (AGICO). The results reveal that soils, both unburned and burned, from metasedimentary areas have highest χ (31.27-208.45 m^3 kg^{-1}) when compared with soils from granitic areas (2.4-20.27 m^3 kg^{-1}). The same pattern was noticed for ash samples which present values in the same range. In unburned areas, Oh have lower values of χ comparatively to Ah, explained by the higher content of mineral matter in Ah. Comparing samples of Ah from burned and unburned areas collected in the first campaign, just after the fire, the results do not express significant differences, probably related with the fire characteristics that affected more intensely the Oh. When comparing samples of Ah of the two campaigns, the χ is higher in samples collected 8 months after the fire and the wet season, which may be explained by the incorporation of the ash particles in soil over time.

This work is supported by national funding awarded by FCT - Foundation for Science and Technology, I.P., projects UIDB/04683/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04683/2020) and UIDP/04683/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDP/04683/2020).

Magnetic Susceptibility and Parameter B: A Comprehensive Analysis for the Classification of Two-Mica Granites.

Susceptibilidad magnética y parámetro B: Un análisis completo para la clasificación de granitos de dos micas,

A. Mota[1], H. Sant'Ovaia[2] y F. Noronha[3]

1 Instituto Ciências da Terra – Pólo Porto, Dpto. Geociencias, Ambiente y Ordenación del Territorio, Facultad de Ciencias de la Universidad de Oporto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal. up201100453@fc.up.pt
2 Instituto Ciências da Terra – Pólo Porto, Dpto. Geociencias, Ambiente y Ordenación del Territorio, Facultad de Ciencias de la Universidad de Oporto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal. hsantov@fc.up.pt
3 Instituto Ciências da Terra – Pólo Porto, Dpto. Geociencias, Ambiente y Ordenación del Territorio, Facultad de Ciencias de la Universidad de Oporto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal. fmnoronh@fc.up.pt

Resumen: En este trabajo, nuestro objetivo es verificar si existe una correlación entre las medidas de susceptibilidad magnética (Km) y el parámetro geoquímico B en granitos de dos micas de tipo ilmenita. Km tiene un papel importante en la determinación del contenido relativo de minerales máficos en granitos de dos micas. El parámetro B (B=Fe+Mg+Ti) permite conocer el contenido de minerales máficos. El área de estudio se localiza en el NE de Portugal, entre Freixo-de-Espada-à-Cinta y Mogadouro, limitando al este con España. En esta zona se identifican cuatro granitos, Bruçó, Fonte Santa, Fornos y Carviçais, todos ellos clasificados como granitos de dos micas. Analizando los datos y comparándolos con otros granitos de dos micas del norte de Portugal, ha podido establecer una correlación entre Km y el parámetro B. Esto permite la creación de diferentes límites para los valores de cada tipo de granito de dos micas: I) los granitos de dos micas con un mayor porcentaje de moscovita presentan valores de Km que oscilan entre $20x10^{-6}$SI y $75x10^{-6}$SI, y el parámetro B varía entre 20 y 25; II) los granitos de dos micas con cantidades comparables de moscovita y biotita presentan valores de Km que oscilan entre $55x10^{-6}$SI y $95x10^{-6}$SI, y el parámetro B varía entre 25 y 40. Nuestros resultados indican una correlación entre el parámetro B y Km (R^2=0,92). Esto sugiere que, determinando el valor de Km, es posible diferenciar el tipo específico de granito de dos micas y estimar la cantidad relativa de minerales máficos.

Palabras clave: granitos de dos micas, susceptibilidad magnética, parámetro B, Varisco, NE Portugal.

Abstract: *In this work, our objective is to verify if there is a correlation between the magnetic susceptibility measurements (Km) and the geochemical parameter B in ilmenite-type two-mica granites. Km plays an important role in the determination of the relative content of mafic minerals in two-mica granites. Parameter B (B=Fe+Mg+Ti) allows knowing the content of mafic minerals. The study area is located in the NE Portugal, between Freixo-de-Espada-à-Cinta and Mogadouro, bordering Spain on the east. In this area, four granites are identified, Bruçó, Fonte Santa, Fornos, and Carviçais, all classified as two-mica granites. By analyzing the data and comparing them with other two-mica granites from northern Portugal, a correlation could be established between Km and the parameter B. This allows the creation of different limits for the values of each type of two-mica granite: I) Two-mica granites with a higher percentage of muscovite have Km values ranging between 20x10-6SI and 75x10-6SI, with the parameter B ranging between 20 to 25; II) Two-mica granites with comparable amounts of muscovite and biotite present Km values ranging between 55x10-6SI and 95x10-6SI, and the parameter B varies between 25 and 40. Our results indicate a correlation between the parameter B and Km (R2=0.92). This suggests that by determining the Km value, is possible to differentiate the specific type of two-mica granite and estimate the relative amount of mafic minerals.*

Key words: *two-mica granites, magnetic susceptibility, parameter B, Variscan, NE Portugal*

INTRODUCTION

The area in study is localized in the NW of the Iberian Peninsula, in the NE of Portugal between the localities of Freixo-de-Espada-à-Cinta and Mogadouro, being limited in the east side by the border with Spain (Fig. 1).

In this area, four different granites were recognized: Fonte Santa, Bruçó (which belongs to the cross-border Bruçó-Aldeadavilla de la Ribera massif), Fornos, and Carviçais. The Fornos granite occurs at the border of the massif and has a fine-grained, porphyritic texture with two micas; the Carviçais granite is oriented W-E, occupies the core of the Carviçais antiform and consists

of a medium to coarse-grained porphyritic two-mica granite; the Bruçó granite is a porphyritic granite with biotite and muscovite, with associated pegmatites containing tourmaline; and the Fonte Santa granite is a muscovite granite with tourmaline.

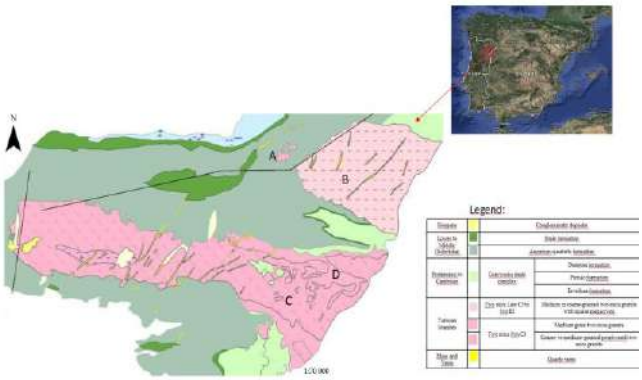


FIGURE 1. *Localization of the study area (adapted from the geological map at scale 1/200,000, Sheet 2 (Pereira et al 2000). A – Fonte Santa granite, B – Bruçó granite, C- Carviçais granite and D- Fornos granite.*

The main aim of this work is to establish a relation between the values obtained for the magnetic susceptibility (Km) and the parameter B *(Debon & Le Fort, 1983*, calculated in the geochemical study*)*.

The Km is a property that helps in the classification of granite rocks as it provides information on the presence of minerals with magnetic properties (Ishihara, 1977). When a mineral (or rock) is exposed to a magnetic field, H, it acquires an induced magnetization, M. The induced magnetization and the magnetic field are directly related through the magnetic susceptibility, Km, which is translated from the mathematical formula: K=M/H. Considering that M and H are expressed in amperes per meter (A/ m), Km per volume is dimensionless (in the International System, SI). The intensity of Km results from the contribution of the magnetic susceptibilities of all the constituent minerals of the material under study, which can be diamagnetic (e.g. quartz and feldspars), paramagnetic (e.g. biotite), antiferromagnetic (e.g. goethite) and, finally, ferromagnetic *s.l.*, which comprise ferromagnetic *s.s.* (e.g. iron), weak ferromagnetic (e.g. hematite) and ferromagnetic (e.g. magnetite) (Hrouda, 1982).

The parameter B was defined by Debon and Le Fort (1983), after other works and studies and reflects the amount of mafic minerals present in the sample. The parameter B is calculated using the expression B=Fe+Mg+Ti (molar % calculated from Fe_2O_3, MgO and TiO_2 chemical analysis).

The Bruçó granite presents Km values ranging from 67x10^{-6} SI to 133 x10^{-6} SI and B parameter values oscillating between 43.3 and 53.5.

The Fonte Santa granite presents Km values ranging from 24 x10^{-6} SI to 108 x10^{-6} SI and B parameter values ranging between 11 and 32.5.

The Carviçais granite presents Km values ranging from 69 x10^{-6} SI to 103 x10^{-6} SI and B parameter values oscillating between 24 and 28.4.

Only one sampling site was conducted for Fornos granite, resulting in a Km value of 55 x10-6SI, while the B parameter varies between 19 and 42.

A comparison was made between these granites and other Variscan two-mica ilmenite-type granites from the Central Iberian Zone, whose Km was previously obtained (Sant'Ovaia et al., 2023), and a plot of Km versus the B parameter was generated (Fig. 2).

In Figure 2, it is evident that two discernible groups can be identified. Group I is defined by Km values ranging from 20x10^{-6} SI to 75x10^{-6} SI and by parameter B variating between 20 to 25, and comprises all the two-mica granites (leucogranites) rich in muscovite. Group II is characterized by Km values ranging from 55x10-6 SI to 95x10-6SI and parameter B varying from 25 to 40, and includes granites with comparable levels of muscovite and biotite. The Bruçó granite stands out as an exception, attributed to its elevated titanium content surpassing that of the other granites and the only one not corresponding to a leucogranite.

For a better comparison, the correlation between these two parameters was calculated, with Pearson's linear correlation establishing the best relationship between points and the intersection of the line with the origin of the graph being defined.

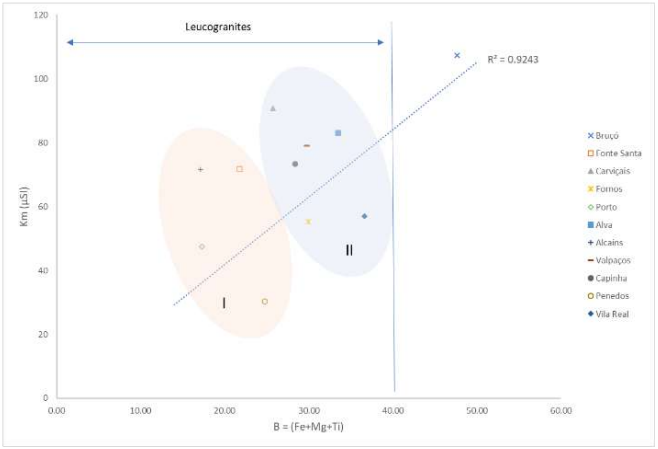


FIGURE 2. *Diagram of Km vs B where are plotted the granites in study and others ilmenite-type granites with Km determined present in the bibliography. There are two fields define being: I – Two mica granites with Ms>>Bt; II – Two mica granites with Ms≈Bt.*

The correlation between these two factors (R^2= 0.92) indicates that Km can provide insights into the quantity of mafic minerals present, given by parameter B, and the specific type of two-mica granite under investigation.

The categorization and in-depth examination of two-mica granite hold significant importance due to its association with strategic mineralizations. This is evident in Fonte Santa granite, where mineralizations containing scheelite are found in quartz veins close to the granite. A similarly situation holds for the Penedos granite, which outcrops near Borralha mine, where wolframite deposits have been explored.

Further work should involve additional sampling of the Fornos granite for Km analysis, along with other granite types. In addition, the petrographic study of these granites, focusing on a detailed examination of their mineralogy, will enhance our comprehension of the factors influencing the parameter B.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by national funding awarded by FCT - Foundation for Science and Technology, I.P., projects UIDB/04683/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04683/2020) and UIDP/04683/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDP/04683/2020), and for the doctoral scholarship we thank to the national funding awarded by FCT - Foundation for Science and Technology, I.P. with the reference SFRH/BD/13757/2022.

REFERENCES

Debon, F., Le Fort, P., (1983): A Chemical–Mineralogical Classification of Common Plutonic Rocks and Associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth*, 73: 135–149, doi:10.1017/S0263593300010117

Hrouda, F. (1982): Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys*, 5: 37-82.

Ishihara, S., (1977): The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27: 293-305.

Pereira, E., Ribeiro, A., Marques, F., Munhá, J., Castro, P., Meireles, C., Ribeiro, M.A., Noronha, F., Ferreira, N., Sousa, B., Ribeiro, M.L., Rebelo, J., Ferreira da Silva, A., Coke, C., Baptista, J., Lourenço J., Matos, J.V., Gomes, M.E., Almeida, A., Martins, H., (2000): *Carta Geológica de Portugal à escala 1:200000 (Folha 2)*, Instituto Geológico e Mineiro, Ministério da Economia, Lisboa.

Sant'Ovaia, H., Cruz, C., Gonçalves, A., Nogueira, P., Noronha, F., (2023): Deciphering Iberian Variscan Orogen magmatism using the Anisotropy of Magnetic Susceptibility from granites. *Minerals Special Issue "Petrographic, Geophysical, Geochemical and Geochronological Study of Magma and Magmatism in the Iberian Peninsula and Archipelagos."* Submitted

Sant'Ovaia, H., Cruz, C., Gonçalves, A., Noronha, F., (2021): Anisotropia da Suscetibilidade Magnética em granitos variscos portugueses: 20 anos de investigação. Abrantes, I., Callapez, P. M., Correia, G. P., Gomes, E., Lopes, B., Lopes, F. C., Pires, E., & Rola, A. (Eds.), Uma visão holística da Terra e do Espaço nas suas vertentes naturais e humanas. Homenagem à Professora Celeste Romualdo Gomes. Coimbra: CITEUC. © CITEUC, 2020 DOI: http://doi.org/10.5281/zenodo.4409264

Deformación a partir de la fábrica magnética en la Fm Utrillas de la Cordillera Cantábrica.

Strain from magnetic fabric in the Utrillas Fm of the Cantabrian Range.

B. Oliva Urcia[1], A. Casas[1], T. Román Berdiel, J. J. Villaín[2] y S. Torres López[3]

1 Geotransfer-IUCA. Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. Pz San Francisco s/n 50009 Zaragoza. boliva@unizar.es, acasas@unizar.es, mtdjrb@unizar.es
2 Escuela Politécnica Superior. Departamento de Fisica. Edificio Milanera C/ Villadiego s/n 09001 Burgos. villa@ubu.es
3 Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. Carretera de Colmenar viejo km 15. Ciudad Universitaria de Cantoblanco 28049 Madrid. sara.torres@uam.es

Palabras clave: fábrica magnética, sedimentos continentales, método sensible, deformación, AMS

Resumen

Se ha analizado la anisotropía de la susceptibilidad magnética (fábrica magnética) en 30 estaciones (de 8 y 15 muestras por estación) en arenisca de grano fino y materiales arcillosos de la Fm Utrillas así como sus equivalentes laterales (edad Albiense-Turoniense) con el fin de determinar la deformación sufrida por los materiales en las provincias de León, Asturias y Palencia. Dado el carácter arcilloso de los sitios analizados los principales minerales portadores de la fábrica son probablemente filosilicatos y hematites. La susceptibilidad media de las estaciones analizadas está en torno a los 50-150 x 10^{-6} S.I. Los parámetros escalares de la fábrica muestran grados de anisotropía relativamente bajos. La fábrica magnética muestra una foliación magnética subparalela a la estratificación en la mayor parte de las estaciones, y una lineación magnética con direcciones que varían entre E-W, NW-SE y NE-SW, aproximadamente paralela a las principales estructuras compresivas (la mayor parte de tipo thin-skinned). Sugiere que la fábrica adquirida en el momento del depósito, probablemente con ejes k_{max} dispersos dentro del plano de estratificación, en la mayoría de las estaciones se ha modificado debido a la compresión alpina posterior. Dado que no parece existir una dirección preferente extensional previa (como ocurre en otras unidades o cuencas de la zona pirenaica), los resultados también son consistentes con que la sedimentación de esta unidad se produjo en un contexto atectónico o al menos no dominado por cuencas extensionales.

Abstract

The anisotropy of the magnetic susceptibility (magnetic fabric) has been analyzed in 30 sites (8 to 16 samples by site) in fine grained sandstones and argillaceous levels of the Utrillas Fm and lateral equivalent levels (age Albian-Turonian) in order to determine the strain in those materials in the León, Asturias and Palencia provinces. Due to the argillaceous character of most of analyzed sites, the main carriers probably are phyllosilicates and hematite. The average magnetic susceptibility is 50-150 x 10^{-6} S.I. The scalar parameters show a relatively low degree of anisotropy. The magnetic fabric shows the magnetic foliation subparallel to bedding in most of sites, and a magnetic lineation that varies from E-W to NW-SE and NE-SW, parallel to the main compressional structures (most are thin-skinned). It suggests that the acquired magnetic fabric at deposition time, probably with k_{max} axes scatter on the bedding plane, in most sites has been modified due to the later alpine compression. Since apparently there is not a preferential extensional direction (as it happens in other Pyrenean basins or units), the results are also consistent with the atectonic or not dominated with extension of the sedimentation of this unit.

Avances en la magnetoestratigrafía y cicloestratigrafía de los sedimentos de la Formación Baza (Granada).

Advances on the magnetostratigraphy and cyclostratigraphy of the Baza Formation sediments (Granada).

J.M. Parés[1], A. Santamaría Barragán[1], S. Colino García[1], D. Anastasio[2], C. Berti[3], A. Churruca Clemente[1], T. Fujioka[1], S. Pla Pueyo[4], C. Viseras[5], J.M., Jiménez[4] y M. Duval[1]

1 Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, España. josep.pares@cenieh.es, betobaltanas@usal.es, silvia.cuelga@gmail.com, alicia.churruca@cenieh.es, toshiyuki.fujioka@cenieh.es, mathieu.duval@cenieh.es
2 Earth & Environmental Sciences, Lehigh University, Bethlehem, PA 18015, USA dja2@lehigh.edu
3 Idaho Geological Survey, 875 Perimeter Dr., Moscow, ID 83804-30144, USA cberti@uidaho.edu
4 Universidad de Granada, Avda. del Hospicio, s/n C.P. 18010 Granada, España Sila.pla@gmail.com,
5 Dep. de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Av/ Fuentenueva s/n 18071 Granada, España. viseras@ugr.es
6 Universidad de Granada, Avda. del Hospicio, s/n C.P. 18010 Granada, España. jumajia@gmail.com
5 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Av/ Fuentenueva s/n 18071 Granada, España.

Palabras clave: Cuenca de Baza, Cuaternario, paleomagnetismo, ciclicidad.

Resumen

La sub-cuenca de Baza (Granada), constituye el paleolago más extenso y meridional de Europa y alberga un archivo sedimentario de incalculable valor para el período Plio-Pleistoceno. La Formación Baza (Vera et al., 1985), la principal unidad sedimentaria que rellena la parte superior de la cuenca, incluye carbonatos lacustre-palustres y sedimentos aluviales, y es conocida por albergar numerosos yacimientos paleontológicos del Plio-Pleistoceno, incluyendo importantes conjuntos de micromamíferos, grandes mamíferos terrestres, así como industria lítica. Nuestro trabajo se centra en el estudio de la magnetoestratigrafía y cicloestratigrafía en un sondeo mecánico en los sedimentos lacustres-aluviales, cerca del margen meridional de la cuenca (Orce), combinado con información obtenida en afloramientos cercanos. Los resultados permiten identificar inversiones de polaridad durante del Cron Matuyama, que en combinación con dataciones mediante resonancia paramagnética, interpretamos y correlacionamos con la escala de tiempo de polaridad global. A ello se suma la identificación de patrones cíclicos en base a indicadores geoquímicos y de magnetismo de rocas, que interpretamos como ciclos orbitales y nos aportan de esta forma una escala de tiempo de mayor resolución para la sucesión sedimentaria.

Abstract

The Baza sub-basin (Granada), constitutes the most extensive and southern paleolake in Europe and holds a sedimentary archive of incalculable value for the Plio-Pleistocene period. The Baza Formation (Vera et al., 1984), the main sedimentary unit that fills the upper part of the basin, includes lacustrine-palustrine carbonates and alluvial sediments, and is known to host numerous paleontological sites from the Plio-Pleistocene, including important assemblages of micromammals, large land mammals as well as lithic tools. Our work focuses on the magnetostratigraphy and cyclostratigraphy of a borehole in lacustrine-alluvial sediments, near the southern margin of the basin (Orce), combined with information obtained in nearby outcrops. The results allow us to identify polarity reversals during the Matuyama Chron, which in combination with electron spin resonance ages, we interpret and correlate with the global polarity time scale. In addition, we identify cyclic patterns based on geochemical and rock magnetism indicators, which we interpret as orbital cycles and hence providing a high resolution time scale for the sedimentary succession.

Referencias

Vera, J.A., Fernández, J., López-Garrido, A.C. y Rodríguez-Fernández, J., (1985). Geología y estratigrafía de los materiales plio-pleistocenos del sector de Orce-Venta. Micena (Prov. Granada). *Paleontología i Evolució* 18, 3-11.

Rotaciones de eje vertical en el arco de Cazorla-Alcaraz (Béticas Orientales, SE España).

Vertical axis rotations in the Cazorla-Alcaraz arc (Eastern Betics, SE Spain).

L.A. Pérez-Valera[1,2], M. Sánchez-Gómez[2], F. Pérez-Valera[3] y J. Villalaín[1]

1 Dpto. Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Avda. Cantabria s/n, 09006 Burgos. laperez@ubu.es, villa@ubu.es
2 Dpto. Geología, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas s/n, 23071 Jaén. laperez@ujaen.es, msgomez@ujaen.es
3 Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Sant Vicent de Raspeig, Alicante. fperez@ua.es

Palabras clave: Arco de Cazorla-Alcaraz, rotaciones de eje vertical, falla de desgarre, Cordillera Bética, paleomagnetismo.

Resumen

La Cordillera Bética constituye la rama norte del Arco de Gibraltar, donde los procesos de convergencia oblicua son especialmente significativos. La distribución de la deformación se resuelve a través de frentes de cabalgamiento y fallas de transferencia, que generan estructuras arqueadas a diversas escalas. De estas estructuras, la más representativa es el arco de Cazorla-Alcaraz (ACA), situado en la parte oriental de la cordillera. En el sector nororiental del ACA, la falla de Socovos desempeña un papel significativo en el reparto de la deformación, observándose diferencias de hasta 90º en la orientación de los pliegues y cabalgamientos situados al norte y sur de la falla. Para entender cómo se produce el reparto de la deformación se ha realizado un análisis paleomagnético en litologías arcillosas de facies Weald y Utrillas (Prebético), así como en margocalizas de la Fm. Capas Rojas (Subbético), todas del Cretácico. Los resultados muestran una componente característica de origen primario, con componentes normales e inversas antipodales y test del pliegue positivo. Las direcciones que se han obtenido coinciden en algunas de las estaciones con la dirección esperada, pero presentan desviación en otros, siendo compatible con rotaciones de eje vertical dextras de diversa magnitud. En este sentido, las rotaciones encontradas varían desde 0º-20º hasta rotaciones que superan los 90º, e incluso en varios sitios pueden llegar a los 180º. Estos hallazgos muestran un patrón de rotaciones dextrales de eje vertical que tendría relación con una zona amplia de deformación que abarca varios kilómetros al norte y sur de la falla de Socovos.

Abstract

The Betic Cordillera constitutes the northern branch of the Gibraltar Arc, where oblique convergence processes are especially significant. The distribution of the deformation is resolved through thrust fronts and transfer faults, which generate arcuate structures at different scales. The most representative arcuate structure is the Cazorla-Alcaraz arc (ACA), located in the eastern part of the cordillera. In the northeastern sector of the ACA, the Socovos fault plays a significant role in the strain partitioning, with differences of up to 90º in the orientation of the folds and thrusts located north and south of the fault. In order to understand how the deformation distribution occurs, a paleomagnetic analysis has been carried out in clays of the Weald and Utrillas facies (Prebetic), as well as in marl limestones of the Capas Rojas Fm. (Subbetic), all of Cretaceous age. The results show a characteristic component of primary origin, with normal and reverse antipodal components and positive fold test. The directions obtained coincide in some of the sites with the expected direction, but show deviation in others, being compatible with dextral vertical axis rotations of different magnitude. In this sense, the deduced rotations vary from 0º-20º to rotations exceeding 90º, and in some sites they can even reach 180º. These findings show a pattern of vertical axis dextral rotations that would be related to a wide deformation zone spanning several kilometers north and south of the Socovos fault.

Cinemática de la rotación y remagnetización en la Cuenca de Jaca.

Rotation and remagnetization kinematics in the Jaca Basin.

E.L. Pueyo[1]; P. Calvín[1]; R. Egli[2]; E. Izquierdo-Llavall[1]; E. Beamud[3]; P. Sierra-Campos[1]; B. Oliva-Urcia[4]; A. Rodríguez-Pintó[4]; M.P. Mata[1]; J.C. Larrasoaña[1,5]

1 IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza. 50059 Zaragoza. unaim@igme.es, p.calvin@igme.es, e.izquierdo@igme.es, jc.larra@igme.es
2 Department of Geophysics, GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190, Vienna, Austria. ramon.egli@geosphere.at
3 Paleomagnetic Laboratory CCiTUB - Geosciences Barcelona (Geo3Bcn), CSIC, 08028, Spain. betbeamud@ub.edu
4 Geotransfer-IUCA Dept. Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza boliva@unizar.es
5 Dpto. Ciencias & INAMAT^2, Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, Navarra

Palabras clave: Western Pyrenees, paleomagnetism, vertical-axis rotations, kinematics.

Resumen

La Cuenca de Jaca y las Sierras Interiores de los Pirineos Occidentales han sido objeto de numerosos estudios paleomagnéticos durante las tres últimas décadas. El proyecto UKRIA4D se ha centrado en las rocas turbidíticas menos estudiadas del Grupo Hecho con el objetivo de resolver algunas cuestiones clave: 1) caracterizar las magnitudes de rotación del eje vertical (VAR) y su relación con los gradientes de acortamiento a escala orogénica, 2) determinar la edad de remagnetización (aún en debate) y. 3) constreñir la edad de rotación y su relación con estructuras bien datadas al este y al sur. En este trabajo se presentan 180 estaciones nuevas o inéditas junto a 70 ya publicadas. Las estaciones fiables son interpretadas en cuatro secciones: Salazar-Esca (57 *sites*), Veral-Subordán (33), Aragón (61) y Gállego (27) así como en 5 dominios estructurales de N-S que comienzan en las rocas remagnetizadas de las Sierras Interiores (1) y llegan a la canal de Berdún (5) donde los registros magnéticos bartonienses primarios están bien contrastados. La remagnetización de dos polaridades está restringida en el dominio de la esquistosidad y generalmente, pero no siempre, muestra un carácter *post-folding*. Las VARs rondan los 20° en sentido horario en todos los sectores al sur de la Zona Axial excepto en el más occidental donde apenas alcanzan los 10°. Las VARs no presentan diferencias significativas a lo largo de los dominios N-S en las cuatro secciones. Además, las VARs de los dominios remagnetizados (1 a 4) y las del dominio primario (5) son también similares. Todas estas observaciones permiten constreñir la cinemática de las VAR; debe de ser tanto posterior al proceso de remagnetización como al de deformación que afecta a las rocas turbidíticas. Dadas las temperaturas de enterramiento necesarias (y la pila sedimentaria y tiempo equivalente), pueden descartarse edades anteriores al Rupeliense tanto para la rotación como para la remagnetización.

Abstract

The Jaca Basin and the Internal Sierras in the Western Pyrenees have been the subject of numerous paleomagnetic studies during the last three decades. The UKRIA4D project has focused on the less-studied turbiditic rocks (Hecho Group) aiming to solve some key questions: 1) characterizing the vertical axis rotation (VAR) magnitudes and their relation to orogenic-scale gradients of shortening. 2) constraining the remagnetization age (still under debate) and 3) narrowing down the rotational age and its relation to well-known structures to the East and South of this region. In this work we introduce more than 180 new or unpublished sites together with data from more than 70 published sites. Reliable sites are interpreted in four sections: Salazar-Esca (57 sites), Veral-Subordán (33), Aragón (61) and Gállego (27) as well as in 5 different N-S domains from the remagnetized rocks of the Internal Sierras (1) to the Berdún trough (5) where primary Bartonian magnetic records are well-proven. The dual-polarity remagnetization is coarsely constrained within the cleavage domain and usually, but not always, shows a post-folding character. The VARs are around 20° CW in all sectors south of the Axial Zone but in the westernmost one where it hardly displays 10°. VARs display non-significant differences along the N-S domains in the four sections. Besides, the VARs in the remagnetized domains (1 to 4) and those from the primary domain (5) are also similar. All these statements allow constraining the VAR kinematics; it must be younger than the end of the remagnetization process and the deformation affecting the turbiditic rocks. Given the necessary burial temperatures (and the equivalent sedimentary pile and time lapse), older ages than Rupelian for both the rotation and remagnetization processes, can be ruled out.

El registro continental del evento Porcupine.

The continental record of the Porcupine event.

E. L. Pueyo[1], L. Otaño[2], R. Silva-Casal[3], P. Calvín[1], C. Laplana[4,5], M. A. Galindo-Pellicena[6], M. Duval[7], M. P. Mata[1†], J. M. Parés[7] y A. Muñoz[8†]

1 IGME (CSIC), Unidad de Zaragoza. Campus Aula Dei, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. unaim@igme.es, p.calvin@igme.es
2 Asociación de Amigos de Villarroya. C/ Capellanía, 19, 26587 Villarroya, La Rioja, Spain. luis.otano@unirioja.es
3 IES Francés de Aranda, C/ Atarazana, 1, 44003 Teruel. roi.silva.casal@gmail.com
4 Museo Arqueológico y Paleontológico de la Comunidad de Madrid. Pza. Bernardas s/n, 28801 Alcalá de Henares, Madrid.
5 Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Edificio de Ciencias, Universidad de Alcalá. Ctra. A-II Km. 33,600, 28871 Alcalá de Henares, Madrid. cesar.laplana@uah.es
6 Centro Mixto UCM-ISCIII de Evolución y Comportamiento Humanos, C/Monforte de Lemos 5, pab 14. 28029 Madrid. mariangalindo79@gmail.com
7 CENIEH Geochronology & Geology, CENIEH, Paseo Sierra de Atapuerca 2, 09006 Burgos. mathieu.duval@cenieh.es, josep.pares@cenieh.es
8 Área de Estratigrafía. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza.

Palabras clave: Excursiones geomagnéticas, Cuenca de Villarroya, Plioceno-Pleistoceno.

Resumen

Porcupine es un corto evento geomagnético de polaridad inversa (edad estimada de 2,737 Ma.) definido cerca de la parte superior del cron de Gauss (dentro de C2An.1n) y sólo descrito en el Sitio IODP U1308 (Atlántico Norte). Por otro lado, la Cuenca de Villarroya (NE de España) abarca parte del Plioceno-Pleistoceno. Los análisis magnetoestratigráficos disponibles permiten datar la cuenca desde la parte superior de Gauss (cron C2An.2n) hasta la parte media del cron Matuyama y potencialmente comprende el registro de Porcupine. De hecho, se identificó una corta inversión dentro de la parte superior del intervalo normal N2 de la secuencia local que se atribuyó a la parte superior del cron Gauss (C2An.1n), que podría representar el primer registro continental de la excursión de Porcupine. Dicha identificación fue posible gracias a la aparición de un registro litológico excepcional; depósitos lacustres de varvas anuales de escala milimétrica. Estos prometedores resultados nos han motivado a volver a muestrear (en 2021 y 2023) una sección paleomagnética de alta resolución de 6 m de espesor en este intervalo. En total, se analizaron más de 120 nuevas muestras y las desmagnetizaciones aportan pruebas consistentes del registro de Porcupine. A falta de una mayor resolución, y asumiendo una sedimentación continua, una valoración preliminar de la duración de esta excursión basada en el número de varvas lacustres (1 mm de media por episodio anual) se estima alrededor de los 5 kyr.

Abstract

Porcupine is a short reverse polarity geomagnetic event (estimated age of 2.737 Ma.) defined near the top of the Gauss chron (within C2An.1n) and only described at the IODP Site U1308 (North Atlantic). On the other side, the Villarroya Basin (NE Spain) covers part of the Pliocene-Pleistocene period. Available magnetostratigraphic analysis allows dating the basin from the upper part of Gauss (chron C2An.2n) to the middle part of Matuyama chron and potentially comprises the record of Porcupine. In fact, a short reversal was identified within the upper part of the normal interval N2 of the local sequence that was attributed to the top of the Gauss chron (C2An.1n). This uninterpreted reversal could represent the first continental record of the Porcupine excursion. Such identification was made possible because of the occurrence of an outstanding lithological record; annually varved millimetric-scale lacustrine deposits. These promising results have motivated us to resampled (in 2021 and 2023) a high-resolution palaeomagnetic section of 6 m thick in this interval. In total, more than 120 new samples were analyzed and demagnetizations provide evidence for the Porcupine record. In the absence of higher resolution, and assuming a constant sedimentation rate, a preliminary assessment of the duration of this excursion based on the number of lacustrine varve (1 mm in average per annual episode) is estimated around 5 kyr.

Kmax y Kmin. ¿y tú de quién eres?

Kmax and Kmin, where you came from?

Ó. Pueyo Anchuela, A. Gil Imaz y A. Pocoví Juan

Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, nº12. CP 50009. Zaragoza. opueyo@unizar.es; agil@unizar.es; apocovi@unizar.es

Palabras clave: ASM, definición de la fábrica, deformación, registro, sensibilidad.

Resumen

La ASM puede permitir identificar distintos procesos genéticos o de deformación a partir del análisis del elipsoide de susceptibilidad y comparar con el elipsoide de deformación finita, al menos, en orientación y forma. En rocas sedimentarias es habitual la presencia de una foliación magnética paralela a la laminación sedimentaria (Kmin perpendicular a la laminación). Este patrón geométrico puede interpretarse como resultado de la decantación/floculación de partículas y compactación asociada a la deshidratación del sedimento. Cuando estas rocas son sometidas a deformación suele identificarse la aparición de una lineación magnética perpendicular al acortamiento (geométricamente paralela a la dirección de las capas). Al comparar estaciones próximas o en contextos con deformación de baja intensidad, la ASM parecería estar mostrando una fábrica pre-plegamiento (Kmin perpendicular a la laminación) y una lineación asociada a la deformación que se dispersa si se compara en zonas con variación de la orientación de las capas. La propia forma de determinación del elipsoide de la ASM implica que el elipsoide es único y no pueden registrarse procesos pre y post plegamiento según el eje que se analice. En estos contextos puede interpretarse una fábrica compactacional que define la foliación paralela a la laminación, dentro de la cual, la intersección de elementos planares desarrolla una lineación magnética incipiente. Esto supone una modificación continua del elipsoide de la ASM que puede interpretarse en términos de progresión de la deformación. Los patrones "sedimentarios y tectónicos" harían referencia al plano de foliación principal y donde la deformación desarrollaría una modificación progresiva del marcador de manera heterogénea, por reorientaciones y recrecimientos respecto a dos procesos que pueden conceptualizare como la competencia entre dos planos de aplastamiento distintos.

Abstract

AMS can allow identifying different genetic and deformational processes from the susceptibility ellipsoid and its comparison with the finite strain ellipsoid (at least in shape and orientation). In sedimentary rock is usual the presence of a magnetic foliation parallel to the sedimentary lamination (Kmin normal to lamination). This geometrical pattern can be interpreted in terms of decantation/flocculation and compaction during sediment dewatering. When these rocks are submitted to deformation it is usual to identify an incipient magnetic lineation normal to the shortening (parallel to the bedding strike). Comparing near sites or in similar low deformation contexts, AMS seems to show a pre-folding fabric (Kmin normal to lamination) but magnetic lineation tends to cluster at in situ coordinates. AMS ellipsoid calculation produces a unique ellipsoid that cannot exhibit at the same time pre-folding and post-folding processes depending upon the analyzed axes. In these contexts a compaction fabric defined by a foliation parallel to lamination and a magnetic lineation defined by the intersection of planar elements can be interpreted. This interpretation supports a progressive record of the deformation progression. "Sedimentary and tectonic" patterns make reference to the main foliation plane and where strain progress through the modification of the markers by heterogeneous strain, reorientation and regrowth. This can be conceptualized from the competence between two different flattening planes.

Reconstrucción paleogeográfica y de condiciones de sedimentación de la capa de oolitos ferruginosos de Arroyofrío por ASM (Calloviense-Oxfordiense).

Paleogeographic reconstruction and sedimentation conditions of the Arrayofrío ferruginous oolit level by AMS (Callovian-Oxfordian).

Ó. Pueyo Anchuela[1], J. Ramajo Cordero[2], A. Gil Imaz[1], M. Aurell Cardona[1] y G. Meléndez[1]

1 IUCA. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, nº 12, CP. 50009. Zaragoza. opueyo@unizar.es; agil@unizar.es; maurel@unizar.es gmelende@unizar.es
2 Dpto. Geología y Subsuelo, CN IGME-CSIC. C/ Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. j.ramajo@igme.es.

Palabras clave: Jurásico, alto paleogeográfico, paleocorrientes, análisis de imagen, ASM.

Resumen

La capa de oolitos ferruginosos de Arroyofrío (Calloviense-Oxfordiense) representa un periodo de baja sedimentación donde se produjo un nivel condensado de acumulación biológica y otros componentes aloquímicos (ooides ferruginosos). Su distribución a escala regional presenta variaciones del espesor de la unidad y distintos eventos sedimentarios donde pudo quedar registrada la dinámica de las paleocorrientes (e.g. Ramajo, 2006). El análisis de elementos con geometría elipsoidal que actúa como marcador de la fábrica sedimentaria y de las modificaciones posteriores puede analizarse para precisar el contexto y la posición de la línea de costa. El uso de técnicas de análisis de imagen, de distribución de espesores y la utilización de técnicas de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM; para metodología ver Pueyo Anchuela et al., 2013) puede permitir analizar dicha distribución para deducir las condiciones sedimentarias de formación de la unidad. A partir de un muestreo regional de la unidad de Arroyofrío se identifica un patrón de distribución de espesores que permite inferir la presencia de un alto paleogeográfico. El análisis de la fábrica magnética (ASM) permite identificar, junto con el análisis comparado de la distribución anisótropa de los marcadores, una distribución de paleocorrientes con dos diferentes patrones. Un patrón de paleocorrientes que representa una distribución radial con respecto al alto paleogeográfico, y por otro de corrientes paralelas a la línea de costa. Los datos presentados permiten evaluar la influencia de paleocorrientes en los resultados de ASM comparado con marcadores tradicionales e interpretar, a partir del análisis conjunto, la reconstrucción paleogeográfica y condiciones de sedimentación durante el intervalo Calloviense-Oxfordiense.

Abstract

The Arroyofrio iron oolitic level (Callovian-Oxfordian) is a condensed level a represents a low sedimentation rate period with high fossiliferous content and other alochemical components (iron ooids). Regional distribution shows thickness variations and different events that can give information about the tidal dynamic and the paleocurrents. These data permit to refine the sedimentary conditions and coast line disposition (e.g. Ramajo, 2006). The analysis of ellipsoidal markers considering both the sedimentary fabric imprint and the further modifications enable the reconstruction of the suffered processes by such rocks. Image analysis, regional thickness distribution, and susceptibility magnetic fabrics (ASM; see Pueyo Anchuela et al., 2013) can allow the reconstruction of the sedimentary conditions. From a regional sampling of the Arroyofrío unit it can be identified a distribution that points out the presence of a relative paleogeographic high. The joint analysis of ASM and ooids define two patterns. By one hand a paleocurrent radial distribution respect the paleogeographic high, and by the other hand currents parallel to the shore line. These data permit to evaluate the influence of paleocurrents in the AMS data and to define the paleogeographic sedimentary conditions during Callovian-Oxfordian times in the western Tethys.

Referencias

Ramajo Cordero, J. (2006). E*volución sedimentaria del Calloviense-Oxfordiense en el sector central de la Cordillera Ibérica (Rama Aragonesa)*. Tesis Doctoral. Univ. de Zaragoza. 427p.

Pueyo Anchuela, Ó., Ramajo Cordero, J., Gil Imaz, A. y Meléndez Hevia, G. (2013) *International Journal of Earth Sciences* 102, 1131-1149.

Registro de la actividad extensional y compresiva en las fábricas magnéticas del sector occidental de la Cuenca de Cameros

Extensional and compressional magnetic fabrics record in the western Cameros Basin

T. Román-Berdiel[1], B. Oliva-Urcia[1], S. Torres[2], L. Yenes[3], J.J. Villalaín[3] y A. Casas-Sainz[1]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza. mtdjrb@unizar.es, boliva@unizar.es, acasas@unizar.es
2 Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid. sara.torres@uam.es
3 Dpto. Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09006 Burgos. lyenes@ubu.es, villa@ubu.es

Palabras clave: anisotropía de la susceptibilidad magnética, Cretácico, Cuenca de Cameros occidental

Resumen

En este trabajo mostramos la aplicación de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) a la cuenca de Cameros occidental, en 48 afloramientos muestreados en las secuencias pre-rift (Jurásico marino), sin-rift (Cretácico Inferior) y post-rift (Albiense superior a Cenozoico). De los puntos estudiados, 26 están en la Formación Utrillas (en los niveles más arcillosos), 10 en el Barremiense, cinco en el Jurásico, seis en el Cretácico Superior y uno en el Cenozoico. Además del análisis direccional, se han realizado 29 curvas termomagnéticas k/t para caracterizar la mineralogía portadora de la susceptibilidad. Las medidas de ASM se han realizado en un puente de susceptibilidad KLY5-A, y las curvas k/t en un horno CS-3. En la Fm. Utrillas, Barremiense y Paleógeno, la mineralogía portadora de la ASM son los minerales de la arcilla y la hematites, mientras en las calizas del Cretácico Superior y en el Jurásico son los minerales de la arcilla y la magnetita. Las fábricas magnéticas en la Fm. Utrillas (Albiense-Cenomaniense) presentan el eje mínimo (k_{min}) perpendicular a la estratificación, y lineación magnética (k_{max}) con orientación WNW-ESE (zona de Cabrejas), NNW-SSE (Santa María de las Hoyas y La Yecla) y NW-SE (Salas de los Infantes). Estas lineaciones magnéticas, así como las obtenidas en el Cretácico superior y el Paleógeno (también NW-SE) son paralelas a las direcciones estructurales dominantes (pliegues y cabalgamientos). En el Barremiense y en el Jurásico marino, por el contrario, la lineación magnética dominante es NE-SW, NNW-SSE y N-S. Estos resultados evidencian un registro de la etapa compresiva alpina para la Fm. Utrillas, mientras los materiales del Barremiense registran la principal etapa extensional mesozoica (NE-SW) en la cuenca de Cameros. PID2019-108753GB-C2.

Abstract

In this paper we show the application of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) to the western Cameros Basin, in 48 outcrops sampled in pre-rift (marine Jurassic), syn-rift (Lower Cretaceous) and post-rift (upper Albian to Cenozoic) sequences. Of the points studied, 26 are in the Utrillas Fm. (clayey levels), 10 in the Barremian, five in the Jurassic, six in the Upper Cretaceous and one in the Cenozoic. In addition to directional analysis, 29 thermomagnetic k/t curves have been performed to characterize the magnetic susceptibility-bearing mineralogy. The AMS measurements have been performed on a KLY5-A susceptibility bridge, and the k/t curves on a CS-3 furnace. In the Utrillas Fm., Barremian and Paleogene, the carrier mineralogy of the AMS are clay minerals and hematite, while in the Upper Cretaceous limestones and in the Jurassic, they are clay minerals and magnetite. The magnetic fabrics in the Utrillas Fm. (Albian-Cenomanian) show the k_{min} normal to the beding, and a magnetic lineation (k_{max}) with WNW-ESE (Cabrejas area), NNW-SSE (Santa María de las Hoyas and La Yecla) and NW-SE (Salas de los Infantes) orientation. These magnetic lineations, as well as those obtained in the Upper Cretaceous and Paleogene (also NW-SE), are parallel to the dominant structural directions (folds and thrusts). In the Barremian and marine Jurassic, on the contrary, the dominant magnetic lineation is NE-SW, NNW-SSE and N-S. These results show a record of the Alpine compressional stage for the Utrillas Fm., while the Barremian materials record the main Mesozoic extensional stage (NE-SW) in the Cameros Basin.

Investigando los portadores magnéticos del relleno sedimentario de Gran Dolina, Atapuerca (España).

Investigating the palaeomagnetic carriers in the sedimentary infill of Atapuerca Gran Dolina (Spain).

I. Romo-Díez[1], J.M. Parés[1], M. Duval[1], M. Mosquera[2,3] y A. Ollé[2,3]

1 CENIEH, Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, España. irene.romo@fa.cenieh.es, josep.pares@cenieh.es, mathieu.duval@cenieh.es
2 Universitat Rovira i Virgili, Departament d'Història i Història de l'Art, Avinguda de Catalunya 35, 43002, Tarragona, España.
3 IPHES-CERCA, Zona Educacional 4, Campus Sescelades URV (Edifici W3), 43007, Tarragona, España. mmosquera@iphes.cat, aolle@iphes.cat

Palabras clave: magnetostratigraphy, Atapuerca, Gran Dolina, palaeomagnetic carriers

Resumen

El yacimiento de Gran Dolina, en la Sierra de Atapuerca, incluye el registro sedimentario del hominino más antiguo identificado en el oeste de Europa, *Homo antecessor*, asociado a industria lítica de Modo 1. Estos restos aparecieron en el nivel TD6, un estrato de polaridad inversa (Cron Matuyama) (Parés y Pérez-González, 1995) datado posteriormente mediante luminiscencia con una cronología de 846 ± 57 ka (Arnold *et al.*, 2015). Los limos y arenas de dicho estrato (TD6) presentan, además de la magnetización primaria, una componente secundaria de polaridad normal, como suele ocurrir en numerosos contextos geológicos. Sin embargo, a menudo dicha componente secundaria representa hasta el 80-90% de la NRM. Estudios existentes (p.e. D'Arcangelo *et al.*, 2023) muestran que la magnetización primaria reside en la magnetita, pero se desconocen los portadores y el origen de la secundaria.

A fin de responder a estas incógnitas se han realizado diversos experimentos de magnetismo de rocas, incluyendo medidas de adquisición de la IRM con posterior desmagnetización a temperaturas crecientes, ciclos de histéresis, pruebas de viscosidad, curvas termomagnéticas y separación de componentes mediante desmagnetización térmica y AF. Se discute la posible relación de esta componente secundaria con las pátinas de ferromanganeso observadas en algunos estratos, frecuentes en sedimentos de cuevas.

Abstract

Atapuerca Gran Dolina site has provided the oldest hominin species in Western Europe, *Homo antecessor*, in association with Mode 1 lithic artefacts. The remains were found within unit TD6 on a reverse polarity layer (Parés and Pérez-González, 1995), chronologically constrained to around 846±57ka by a combination of magnetostratigraphy and luminescence dating (Arnold et al., 2015). Interestingly, the silts and mudstones from TD6 showing a reversed polarity also present a normal secondary magnetization component, quite common in other geological contexts. Nevertheless, such secondary component can account for up to 80-90% of the total NRM, a phenomenon that deserves further consideration. Previous studies (e.g. D'Arcangelo *et al.*, 2023) have shown that the primary magnetization resides on magnetite, but the origin and carriers of the secondary component are still unknown.

In order to fill this gap of knowledge, several rock magnetism experiments were carried out, such as progressive acquisition of IRM followed by increasing thermal demagnetization, hysteresis cycles, viscosity experiments, thermomagnetic curves and component separation through alternating fields and thermal demagnetization. In addition, the possible contribution of ferromagnesian patinas frequently observed in cave sediments to the secondary magnetization is discussed.

Referencias

Parés, J.M. y Pérez-González, A. (1995) *Science* 269, 830-832

D'Arcangelo, S., Martín-Hernández, F. y Parés, J.M. (2023) *Appl. Sci.* 13, 4580

Arnold, L.J., Demuro, M., Parés, J.M., Pérez-González, A., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M. y Carbonell, E. (2015) *Quaternary International* 389, 167-190

Estudio de la fábrica magnética de las vulcanitas del Albiense – Santoniense del Sinclinorio de Bizkaia (Cuenca Vasco-Cantábrica).

Study of the magnetic fabrics of the Albian – Santonian vulcanites of the Biscay Synclinorium (Basque-Cantabrian Basin).

V. Ruiz González[1,2], F. Martín-Hernández[1,2] y D. Muñoz-López[3]

1 Departamento de Física de La Tierra y Astrofísica, Facultad de Física, Universidad Complutense de Madrid, Avda. Complutense s/n, Madrid 28040, España. vruizgonzalez.geologo@gmail.com, fatima@ucm.es
2 Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), C/Dr. Severo Ochoa, 7, 28040 Madrid, España.
3 Departament of Geosciences, College of Petroleum Engineering and Geosciences, King Fahd University of Petroleum and Minerals, KFUPM, Dhahran 34463, Arabia Saudí. j.munozlopez@kfupm.edu.sa

Palabras clave: anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM), magnetismo de rocas, Cuenca Vasco-Cantábrica, Cretácico

Resumen

La Cuenca Vasco-Cantábrica (CVC) es una cuenca mesozoica situada en el área septentrional de la península ibérica. El vulcanismo de la CVC corresponde al comienzo del desarrollo de corteza oceánica entre la placa ibérica y el resto de la placa euroasiática. Esta apertura fue abortada con el comienzo de la orogenia alpina, la cual plegó los materiales mesozoicos y dio lugar al actual Sinclinorio de Bizkaia.

En este estudio se ha empleado la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) para analizar el tipo de fábricas magnéticas de las vulcanitas y determinar el grado de contribución de la fábrica tectónica sobre la fábrica original. Los resultados de la ASM no coinciden plenamente con los presentados anteriormente por Vegas-Tubía *et al*. (2017) en rocas sedimentarias del Sinclinorio de Bizkaia. En este sentido, se deduce que la naturaleza de las rocas analizadas en ambos estudios puede haber influido en la preservación de sus fábricas magnéticas originales. Por otro lado, la dirección de flujo derivadas de la ASM que muestran las unidades volcánicas analizadas podría indicar el origen de las fisuras por las que extruyó la lava.

Los análisis de magnetismo de roca indican que la contribución de los minerales ferromagnéticos *s.l.* domina la fábrica magnética en estas rocas, fundamentalmente la magnetita.

Abstract

The Basque-Cantabrian Basin (BCB) is a Mesozoic basin located in the northern area of the Iberian Peninsula. The volcanism of the BCB corresponds to the beginning of oceanic crust development between the Iberian plate and the rest of the Eurasian plate. This opening was interrupted with the onset of the Alpine orogeny, which folded the Mesozoic materials and gave rise to the current Bizkaia Synclinorium.

In this study, anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) has been employed to analyze the type of magnetic fabrics of the volcanic rocks and determine the degree of contribution of tectonic fabric on the original fabric. The results of AMS do not fully coincide with those presented previously by Vegas-Tubía et al. (2017) in sedimentary rocks of the Bizkaia Synclinorium. In this regard, it is deduced that the nature of the rocks analyzed in both studies may have influenced the preservation of their original magnetic fabrics. On the other hand, the flow direction shown by the analyzed volcanic units could suggest the origin of the fissures through which the lava extruded.

Rock magnetism analyses indicate that the contribution of ferromagnetic *s.l.* minerals dominantes the magnetic fabric in these rocks, mainly magnetite.

Referencias

Vegas-Tubia, N., Aranguren Iriarte, A., Rodríguez-Méndez, L., Cuevas Urionabarrenechea, J., Tubía Martínez J.M. y Esteban Guzmán, J.J. (2017). *Geogaceta* 62, 15-18.

Registro paleomagnético en un espeleotema de Cueva Mayor (Atapuerca) con contribución de hollín en sus láminas.

Paleomagnetic record in a soot-layered speleothem from Cueva Mayor (Atapuerca).

E. M. Sánchez-Moreno[1], E. Iriarte[2], E. Font[3], Á. Carrancho[1], M. Calvo-Rathert[1] y M-F. Bógalo[1]

1 Departamento de Física, EPS Campus Río Vena - Universidad de Burgos, Av. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España. emsanchez@ubu.es; mcalvo@ubu.es; mfbogalo@ubu.es
2 Área de Paleontología, Departamento de Historia, Geografía y Comunicación, Facultad de Humanidades y Comunicación, Universidad de Burgos, 09001, Burgos, España. eiriarte@ubu.es; acarrancho@ubu.es
3 Universidade de Coimbra, Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 3030-790, Coimbra, Portugal. font_eric@hotmail.com

Palabras clave: espeleotema, hollín, Atapuerca, direcciones paleomagnéticas, magnetismo de rocas

Resumen

La naturaleza y el origen de los minerales magnéticos atrapados en las láminas de calcita de los espeleotemas están controlados por procesos ambientales que actúan sobre los suelos superficiales y en el interior de la cueva. En este trabajo analizamos una estalagmita de Cueva Mayor en el yacimiento arqueológico de Atapuerca (Burgos), con una antigüedad estimada de la Edad del Hierro (750 – 100 a.C.). La estalagmita presenta una alternancia de láminas de calcita micrítica con láminas más oscuras compuestas por agregados de hollín hacia su parte superior. Estudios previos han interpretado los agregados de hollín como procedentes de fuegos antropogénicos (Kaal et al., 2021; Martínez-Pillado et al., 2014). Con el fin de caracterizar las propiedades magnéticas en una estalagmita de especial interés por su registro de actividad humana, hemos llevado a cabo experimentos de paleomagnetismo, magnetismo de rocas y anisotropía de la susceptibilidad magnética. Como resultado hemos obtenido direcciones paleomagnéticas para la mayoría de las muestras con y sin hollín. También se detectó la presencia de magnetita en ambos tipos de muestras. Además, en las muestras con hollín aparecen otras fases magnéticas de muy baja temperatura de Curie. La AMS muestra una foliación magnética pseudo-paralela a las láminas de calcita y lineación horizontal.

Abstract

The nature and origin of the magnetic minerals trapped in the calcite laminae of the speleothems are controlled by environmental processes acting on the surface soils and inside the cave. In this work we analyze a stalagmite from Cueva Mayor in the archaeological site of Atapuerca (Burgos), with an estimated age of the Iron Age (750 – 100 A.C.). The stalagmite presents an alternation of micritic calcite laminae with darker laminae composed of soot aggregates towards the top. Previous studies have interpreted the soot aggregates as derived from anthropogenic fires (Kaal et al., 2021; Martínez-Pillado et al., 2014). In order to characterize the magnetic properties in a stalagmite of special interest for its record of human activity, we have carried out paleomagnetism, rock magnetism and magnetic susceptibility anisotropy experiments. We obtained paleomagnetic directions for most samples with and without soot. The presence of magnetite was also detected in both types of samples. In addition, other very low Curie temperature magnetic phases appear in the samples with soot. The AMS shows a magnetic foliation pseudo-parallel to the calcite lamellae and horizontal lineation.

Referencias

Kaal, J., Martínez-Pillado, V., Martínez Cortizas, A., et al. (2021). Int. J. Speleol. 50, 121–135.
Martínez-Pillado, V., Aranburu, A., Arsuaga, J., Ruiz-Zapata, B., et al. (2014). Int. J. Speleol. 43, 1–14.

Agradecimientos

Agencia Estatal de Investigación (PID2019-105796GB-100), Programa Postdoctoral María Zambrano 2021, Junta de Castilla y León (proyecto BU037P23), Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Portugal) (PTDC/CTA-GEO/0125/2021).

Anisotropy of Magnetic Susceptibility in Iberian Variscan orogen granites: implications for magmatism and tectonics

Anisotropía de la susceptibilidad magnética en granitos del orógeno varisco ibérico: implicaciones magmáticas y tectónicas

H. Sant'Ovaia[1], C. Cruz[1], A. Gonçalves[1], P. Nogueira[2] y F. Noronha[1]

1 Earth Science Institute, DGAOT, Faculty of Sciences of Porto University, Rua do Campo Alegre, 4169-007 Porto, Portugal. hsantov@fc.up.pt, claudiacruz@fc.up.pt, anagoncalves.geo@gmail.com, fmnoronh@fc.up.pt.
2 Earth Science Institute, DG, University of Évora, Colégio Luís António Verney, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671 Évora. pmn@uevora.pt.

Palabras clave: Granites, Anisotropy of Magnetic Susceptibility, Variscan Orogeny, stress field.

Abstract

The data from the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of 19 Portuguese Variscan granite plutons, covering the time span between 320 Ma and 296 Ma has been consolidated and interpreted. This comprehensive dataset comprising 876 sampling sites and over 7080 AMS measurements is used, leading to a reevaluation of the data. The magnetic susceptibility (Km) of the examined granites varies from 30 to 10436 × 10^{-6} SI. Typically, granites exhibit Km values below 1000 × 10^{-6} SI, indicative of a paramagnetic nature attributed to biotite as the primary carrier of iron. This underscores the reduced conditions prevalent during the granitic melt formation in the Variscan Orogeny. The AMS fabrics observed in the analyzed granite plutons retain the strain imposed in the magma, reflecting the chronologic evolution of the stress field during the orogeny. Adopting a chronologic perspective, the magmatic event from approximately 330 to 315 Ma occurred within an extensional regime. The Borralha pluton exemplifies this, exhibiting an extensional AMS fabric linked to this phase. Plutons aged between 315 and 305 Ma exhibit an AMS fabric, indicative of their emplacement in a compressional tectonic regime linked to the Variscan collision. Plutons younger than 305 Ma show AMS fabrics signaling a transition in tectonic settings during emplacement, shifting from a wrench regime to an extensional one towards the end of the collision stage.

Resumen

Los datos de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (AMS) de 19 plutones graníticos Variscos portugueses, que abarcan el periodo entre 320 Ma y 296 Ma, han sido analizados e interpretados. Este conjunto de datos completo, que incluye 876 estaciones de muestreo y más de 7080 mediciones de AMS, se ha utilizado para una reevaluación de los datos. La susceptibilidad magnética (Km) de los granitos examinados varía entre 30 y 10436 x 10^{-6} SI. En general, los valores de Km en estos granitos son típicamente inferiores a 1000 × 10^{-6} SI, lo que indica una naturaleza paramagnética atribuida a la biotita como el portador principal de hierro. Esto subraya las condiciones reducidas prevalentes durante la formación del fundido granítico en la Orogenia Varisca. Las fábricas de AMS observadas en los plutones graníticos analizados conservan la deformación impuesta en el magma, reflejando la evolución cronológica del campo de esfuerzos durante la orogenia. Adoptando una perspectiva cronológica, el evento magmático de aproximadamente 330 a 315 Ma ocurrió dentro de un régimen extensional. El plutón de Borralha ejemplifica esta fase al mostrar una fábrica de AMS extensional asociada. Los plutones con edades comprendidas entre 315 y 305 Ma muestran una fábrica de AMS, indicativo de su emplazamiento en un régimen tectónico compresional ligado a la colisión Varisca. Aquellos plutones con edades anteriores a 305 Ma muestran fábricas de AMS que señalan una transición en la configuración tectónica durante el emplazamiento, de cizallamiento a uno extensional hacia el final de la etapa de colisión.

Funding: https://doi.org/10.54499/UIDB/04683/2020 and https://doi.org/10.54499/UIDP/04683/2020.

Magnetobiocronología de la secuencia molásica de la cuenca de Jaca-Pamplona (Pirineo Central); resultados iniciales

Magnetobiochronology of the molassic sequence of the Jaca-Pamplona basin (Central Pyrenees); initial results

P. Sierra-Campos[1], P. Calvín[1], M. Montes[2], G. Bernaola[3], A. Luzón[4], M. P. Mata[2], E. Bellido[2], E. L. Pueyo[1], J. C. Larrasoaña[1,2]

1 CN IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza. 50059 Zaragoza p.sierra@igme.es, p.calvin@igme.es, unaim@igme.es, jc.larra@igme.es
2 CN IGME, CSIC, Madrid m.montes@igme.es, p.mata@igme.es, e.bellido@igme.es
3 Dept. Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Univ. del País Vasco. 48013 Bilbao gilen.bernaola@ehu.eus
4 Dept. Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza aluzon@igme.es

Palabras clave: Cuenca de Jaca-Pamplona, continentalización, magnetobioestratigrafía, Priaboniense.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de una serie magnetobiostratigráfica en la cuenca de Jaca-Pamplona, la serie de Berdún-Martes. El estudio de este trabajo es proporcionar una cronología fiable y de alta resolución para el relleno sedimentario de la cuenca y los principales eventos paleogeográficos que éste registra, entre los que destaca la continentalización de la cuenca a medida que fue involucrada en la deformación pirenaica. La serie comienza en el techo de la Formación Larrés, incluye la totalidad de las formaciones margosas de origen prodeltaico de Urroz y Pamplona y, termina en los primeros metros de los materiales de origen continental de la Formación Campodarbe. Se han analizado un espécimen por cada una de las 214 estaciones muestreadas a lo largo de 2000 m aproximados de serie compuesta. La desmagnetización térmica ha permitido identificar dos componentes, una con temperatura máxima de desbloqueo <240ºC, interpretada como el campo actual, la segunda componente muestra una temperatura de desbloqueo entre 350º-600ºC que se interpreta como la ChRM y cuyo portador principal es la magnetita salvo en algunas muestras puntuales, en las que también contribuyen sulfuros de hierro. En la secuencia local de polaridad se han identificado diferentes magnetozonas que se interpretan, de base a techo, como los crones comprendidos entre el C18n.2n, de edad Bartoniense y C16n.2n, de edad Priaboniense. Estos resultados indican que el comienzo del depósito de los materiales continentales tuvo lugar durante el C16n.2n (Priaboniense), en consonancia con otros trabajos realizados en la Cuenca Surpirenaica.

Abstract

Here we present the preliminary results of a magnetobiostratigraphic section in the Jaca-Pamplona Basin, the Berdún-Martes section. The aim of this work is the establishment of a reliable, high-resolution chronology for the sedimentary infill of the basin and the paleogeographic events that such infill records, among them the continentalization of the basin as it was involved in the Pyrenean deformation. The section begins in the upper part of the Larrés Formation, includes the whole marly prodeltaic sediments of the Urroz and Pamplona formations, and ends up in the lowermost part of the continental Campodarbe Formation. We have analysed a specimen per each of the 214 sites that have been sampled along ca. 2000 m of composite section. Thermal demagnetization has allowed us to identify two components, a component with maximum unblock temperature of <240ºC, interpreted as the present-day field, the second component shows an unblock temperature between 350-600ºC that has been interpreted as the ChRM and whose carrier is magnetite except in some samples, to which iron sulphides also contribute. In the local polarity sequence we have identify different magnetozones that are interpreted, from base to top, as chrons between C18n.2n, Bartonian in age, to C16n.2n, Priabonian in age. These results indicate that the beginning of the deposition of the continental materials occurred during chron C16n.2n (Priabonian), which is consistent with other studies performed in the South Pyrenean foreland basin.

Fábricas magnéticas en las rocas volcánicas del Pérmico de la cuenca de Anayet (Pirineos Centrales).

Magnetic fabrics in the Permian volcanic rocks of the Anayet basin (Central Pyrenees).

A. Simón-Muzás[1], R. Soto[2], J. Gisbert[1], M. Macouin[3], S. Rousse[3] y A. M. Casas-Sainz[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, Universidad de Zaragoza, 50009, Zaragoza, España. Correo: anasimon@unizar.es, acasas@unizar.es, gisbert@unizar.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, Unidad de Zaragoza, 50059, Zaragoza, España. Correo: r.soto@igme.es
3 GET- CNRS Observatoire Midi-Pyrénées 14, avenue Édouard Belin, 31400, Toulouse, France. Correo: melina.macouin@get.omp.eu, sonia.rousse@get.omp.eu

Palabras clave: Pirineos, fábricas magnéticas, Pérmico, Anayet, vulcanismo.

Resumen

La cuenca de Anayet se sitúa en extremo suroccidental de la Zona Axial pirenaica. Se trata de una de las cuencas intramontañosas Permo-Carboníferas interpretadas por Gisbert (1981) como cuencas de strike-slip. El relleno de estas cuencas se caracteriza por presentar una sucesión detrítica y productos volcánicos resultantes de 5 eventos (Bixel, 1984). Durante la compresión Alpina, la cuenca de Anayet experimentó una inversión tectónica positiva por un acortamiento general de dirección N-S (Rodríguez-Méndez et. al, 2016). Se ha realizado un estudio de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) a partir de bloques orientados en rocas volcánicas de esta cuenca con el objetivo de caracterizar su fábrica magnética e inferir la impronta tectónica registrada. El análisis de fábricas magnéticas se ha llevado a cabo en el GET-CNRS, Toulouse (Francia). Los resultados *in-phase* indican un valor de susceptibilidad medio de 734 $\cdot 10^{-6}$ S.I. Sólo el 10% de las estaciones y muestreadas en la Unidad Roja Superior (Pérmico) tienen un valor superior a $1200 \cdot 10^{-6}$ S.I. Los valores *out-of-phase* son de dos a cuatro órdenes inferiores que los *in-phase*. Las curvas de susceptibilidad-temperatura no muestran una contribución paramagnética importante y la ferromagnética está principalmente controlada por magnetita. Un estudio de la petrofábrica de las rocas y del patrón estructural de la cuenca permitirá determinar el origen primario o secundario de las fábricas magnéticas analizadas.

Abstract

The Anayet basin is in the southwestern end of the Pyrenean Axial Zone. It is one of the Permo-Carboniferous intramountainous basins interpreted by Gisbert (1981) as strike-slip basins. The filling of the basins is characterized by a detrital succession and volcanic products resulting from 5 events (Bixel, 1984). During the Alpine compression, the Anayet basin experienced a positive tectonic inversion due to an overall shortening from a N-S direction (Rodríguez-Méndez et. al, 2016). An Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) study was carried out with oriented blocks from volcanic rocks with the aim to characterize its magnetic fabric and infer the tectonic imprint registered in this basin. The magnetic fabrics were analyzed at the GET–CNRS, Toulouse (France). *In-phase* results show a mean susceptibility value of 734 $\cdot 10^{-6}$ S.I. Only the 10% of the sites and sampled in the Upper Red Unit (Permian) present values over $1200 \cdot 10^{-6}$ S.I. The *out-of-phase* values are two or four orders lower. Temperature dependent susceptibility curves do not show an important paramagnetic contribution, and the ferromagnetic minerals are mainly magnetite. A petrofabric study of the rocks and a study of the structural pattern of the basin will allow to determine the primary or secondary origin of the analyzed magnetic fabrics.

Referencias

Bixel, F., (1984). *Le Volcanisme Stéphano-Permien des Pyrénées*. Thèse d'Etat Univ. de Toulouse, 639 p.

Gisbert, J., (1981). *Estudio Geológico - Petrológico del Estefaniense – Pérmico de la Sierra del Cadi (Pirineo de Lérida). Diagenesis y Sedimentología*. Unpublished PhD. Univ. de Zaragoza, 472 p.

Rodríguez-Méndez, L., Cuevas, J., Tubía, J. M. (2016). *Comptes Rendus Geoscience*, *348*(3-4), 333-341.

Estudio preliminar de la contaminación ambiental en el campus de la Universidad Autónoma de Madrid a partir de las propiedades magnéticas de hojas de árboles

Preliminary study of environmental pollution on the Autonoma University of Madrid campus based on the magnetic properties of tree leaves.

S. Torres-López[1], M.F. Bógalo [2], B. Jimenez Ruiz-Ruano[3] y L. Trigos Luque[1]

1 Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. Carretera de Colmenar viejo km 15. Ciudad Universitaria de Cantoblanco 28049 Madrid. sara.torres@uam.es, laura.trigos@uam.es
2 Departamento de Fisica. EPS. Universidad de Burgos. Avda. Cantabria s/n. 09006 Burgos. mfbogalo@ubu.es
3 Estudiante de CCAA, Universidad Autónoma de Madrid Carretera de Colmenar viejo km 15. Ciudad Universitaria de Cantoblanco 28049 Madrid. beatriz.jimenezr01@estudiante.uam.es

Palabras clave: Contaminación, árboles, propiedades magnéticas, hojas, magnetismo ambiental

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de un estudio de contaminación ambiental realizado en el campus de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Para ello, se han medido las propiedades magnéticas de hojas del árbol *Platanus-Hispanica*. Se han muestreado un total de 52 árboles distribuidos según una malla regular que cubre todo el campus de la UAM, incluyendo zonas peatonales, de tráfico fluido, aparcamiento y cercanas a las vías del tren. Se ha realizado un doble muestreo: 1) después de varios meses sin lluvia, con lo que el contenido de partículas magnéticas se considera máximo; 2) después de unos días de lluvias intensas. De esta forma se podrá evaluar el lavado de partículas magnéticas con la lluvia. Los experimentos de magnetismo de rocas han consistido en la medida de la susceptibilidad magnética a baja frecuencia (χ), magnetización remanente anhisterética (ARM) y magnetización remanente isoterma de saturación (SIRM). Además, se han realizado curvas de adquisición de la magnetización remante isoterma (IRM), de *backfield*, y de histéresis. Los resultados indican que la señal magnética está dominada por la presencia de minerales ferrimagnéticos, en general, de tamaño de grano homogéneo. Las excepciones a este comportamiento podrían tener orígenes diversos. Por tanto, la medida de las propiedades magnéticas es una buena herramienta para evaluar la contaminación ambiental, así como el posible origen de la misma.

Abstract

This work presents the preliminary results of an environmental contamination study carried out on the campus of the Universidad Autónoma de Madrid (UAM). For this purpose, the magnetic properties of leaves of the *Platanus-Hispanica* tree have been measured. A total of 52 trees were sampled, distributed according to a regular grid covering the entire UAM campus, including pedestrian areas, areas with fluid traffic, parking areas and areas close to the train tracks. A double sampling has been carried out: 1) after several months without rain, so that the content of magnetic particles is considered maximum; 2) after a few days of heavy rainfall. In this way it will be possible to evaluate the washout of magnetic particles with rain. The rock magnetism experiments have consisted in the measurement of low frequency magnetic susceptibility (χ), anhysteretic remanent magnetization (ARM) and saturation isothermal remanent magnetization (SIRM). In addition, isothermal remanent magnetization (IRM), backfield, and hysteresis acquisition curves have been performed. The results indicate that the magnetic signal is dominated by the presence of ferrimagnetic minerals, in general, of homogeneous grain size. Exceptions to this behavior could have different origins. Therefore, the measurement of the magnetic properties is a good tool to evaluate environmental contamination, as well as the possible origin of the contamination.

Variación del campo magnético terrestre desde el Pleistoceno superior al Holoceno en La Palma, Islas Canarias: registro del vector completo en coladas de lava.

Earth's magnetic field variation over Upper Pleistocene to Holocene in La Palma, Canary Islands: full vector record on lava flows.

E. Vernet[1], M. Calvo-Rathert[1], Á. Carrancho[2], Y. Yamamoto[3], J. M. Parés[4] y V. Soler[5]

1 Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, Av. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España. evernet@ubu.es mcalvo@ubu.es
2 Departamento de Historia, Geografía y Comunicación, Universidad de Burgos, 09001 Burgos, España. acarrhancho@ubu.es
3 Marine Core Research Institute, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku, Kochi, 783-8502, Japón. y.yamamoto@kochi-u.ac.jp
4 Geochronology & Geology, CENIEH, Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, España. josep.pares@cenieh.es
5 Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA), Av. Astrofísico Francisco Sánchez, 3, 38206 San Cristóbal de La Laguna, España. vsjavaloyes@gmail.com

Palabras clave: paleomagnetismo, paleointensidad, volcanismo, campo magnético terrestre

Resumen

La Palma, situada en la parte más occidental del archipiélago canario, es una de las islas más recientes del archipiélago junto con El Hierro. En este trabajo, se presenta el estudio paleomagnético y de paleointensidad de trece coladas de lava de distintas edades del sistema Cumbre Vieja, en el sur de la isla, abarcando un periodo de 56 a 1 ka. Estas rocas representan la mayor parte del registro volcánico del Pleistoceno superior al Holoceno presente en la isla. Se ha realizado el análisis de la mineralogía magnética de las muestras, así como de direcciones paleomagnéticas y determinaciones de paleointensidad absoluta. Los experimentos de magnetismo de rocas muestran resultados compatibles con la magnetita -con distintos grados de sustitución catiónica- como el principal portador de la remanencia magnética, con saturación a bajas coercitividades (~300mT) y temperaturas de Curie variables (510–580˚C). Para las determinaciones de direcciones paleomagnéticas, se ha llevado a cabo la desmagnetización progresiva térmica y por campos alternos de la magnetización remanente natural. A pesar de presentar una fuerte componente viscosa, se ha calculado una dirección media para cada edad a partir de la componente primaria. Las determinaciones de palointensidad absoluta se han obtenido con los métodos de Thellier-Coe -con pTRM checks- y Tsunakawa-Shaw, obteniendo en algunos casos determinaciones coherentes entre ambos métodos, lo que refuerza la fiabilidad del registro del vector completo obtenido.

Abstract

La Palma, located in the westernmost part of the Canary archipelago, is one of the most recent islands of the archipelago together with El Hierro. In this work, we present a paleomagnetic and paleointensity study in thirteen lava flows with different ages from Cumbre Vieja system, in the south of the island, covering a period between 56 to 1 ka. These rocks represent most of the Late Pleistocene to Holocene volcanic record in the island. For this purpose, analyses of the magnetic mineralogy of the samples have been carried out, as well as paleomagnetic directions and absolute paleointensity determinations. Rock-magnetism experiments show results compatible with magnetite -with different degrees of cationic substitution- as the main carrier of the magnetic remanence, with saturation at low coercivities (~300mT) and variable Curie temperatures (510–580˚C). For determinations of paleomagnetic directions, progressive thermal and alternating field demagnetization of the natural remanent magnetization has been carried out. Despite presenting a strong viscous component, a mean direction has been calculated from the primary component for each age. Absolute paleointensity determinations have been acquired using both Thellier-Co -with pTRM checks- and Tsunakawa-Shaw methods, obtaining in some cases consistent determinations between both methods, which reinforces the reliability of the obtained full vector record.

Nuevos resultados paleomagnéticos mesozoicos en la Placa Ibérica y sus implicaciones en relación con su rotación durante el Cretácico.

New Mesozoic paleomagnetic results in the Iberian Plate and their implications in relation to its rotation during the Cretaceous.

L. Yenes[1], P. Calvín[2], J. J. Villalaín[1], M. Marcén[3], A. M. Casas [3], S. Torres[4], L. A. Pérez-Varela[1], B. Oliva-Urcia[3], T. Román-Berdiel[3], T. Mochales[2], M. F. Bógalo[1] y V. C. Ruiz-Martínez[5]

1 Dpto. Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09006 Burgos, Spain. lyenes@ubu.es, villa@ubu.es, laperez@ubu.es, mfbogalo@ubu.es
2 Instituto Geológico y Minero de España, Oficina de Zaragoza, 50006 Zaragoza, Spain. calvinballester@gmail.com
3 Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain. mma@unizar.es, acasas@unizar.es, boliva@unizar.es, mtdjrb@unizar.es
4 Dpto. Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, Spain. sara.torres@uam.es
5 Dpto. Física de la Tierra y Astrofísica. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain vcarlos@ucm.es

Palabras clave: APWP, rotación de Iberia, Placa Ibérica, paleomagnetismo, Cretácico.

Resumen

La evolución mesozoica de la microplaca Ibérica sigue siendo un tema debatido en Ciencias de la Tierra. Su comprensión es crucial para entender la evolución del dominio de Tethys occidental. Los modelos geodinámicos se basan en la cinemática de la microplaca, obtenida a partir de anomalías magnéticas y la curva de deriva polar aparente (APWP por sus siglas en inglés) definida por datos paleomagnéticos. El rasgo cinemático más importante es la rotación de 35º en sentido contrario a las agujas del reloj durante el Cretácico, vinculada a la apertura del Golfo de Vizcaya. Sin embargo, la cronología de este movimiento aún presenta incertidumbre debido a la mala definición de anomalías magnéticas y la escasez de datos paleomagnéticos de calidad. Obtener nuevos datos paleomagnéticos es esencial para precisar la cinemática de la placa y su influencia en la evolución del Golfo de Vizcaya y los Pirineos.

En el marco de los proyectos PID2019-108753GB-C2, C21 and C22, se ha realizado un muestreo extensivo de aproximadamente 200 estaciones en unidades cretácicas a lo largo de la Península Ibérica, buscando áreas no afectadas por remagnetizaciones y sin desacoples no controlados del basamento, y que, por tanto, puedan aportar nuevos datos para la construcción de la APWP de Iberia. En este trabajo se presentan los resultados paleomagnéticos preliminares de diferentes unidades jurásicas y cretácicas muestreadas en distintos dominios peninsulares: Sistema Central, Cordillera Ibérica y La Mancha.

Abstract

The Mesozoic evolution of the Iberian microplate remains a debated topic in Earth Sciences. Its understanding is crucial to understand the evolution of the western Tethys domain. Geodynamic models are based on the kinematics of the microplate, obtained from magnetic anomalies and the Apparent Polar Wander Path (APWP) defined by paleomagnetic data. The most important kinematic feature is the 35° counterclockwise rotation during the Cretaceous, linked to the opening of the Bay of Biscay. However, the chronology of this movement still presents uncertainty due to poorly defined magnetic anomalies and the scarcity of quality paleomagnetic data. Obtaining new paleomagnetic data is essential to constraints to pinpoint the plate kinematics and its influence on the evolution of the Bay of Biscay and the Pyrenees.

In the framework of the projects PID2019-108753GB-C2, C21 and C22, an extensive sampling of approximately 200 stations in Cretaceous units along the Iberian Peninsula has been carried out, looking for areas not affected by remagnetizations and without uncontrolled uncoupling of the basement, and that therefore can provide new data for the construction of the APWP of Iberia. In this work, we present the preliminary paleomagnetic results of different Jurassic and Cretaceous units sampled in different peninsular domains: Central System, Iberian Range and La Mancha.

Propuesta de itinerarios geológicos virtuales en el Valle del Copiapó (norte de Chile): una herramienta para la difusión e impulso del geoturismo en el Desierto de Atacama

Proposal of virtual geological itineraries in the Copiapó Valley (northern Chile): a tool for the diffusion and promotion of geotourism in the Atacama Desert

M. Abad[1,2], P. Moisan[3], T. Izquierdo[1,2], M. Cáceres[2], R. Fernández[4], G. Mansilla[5], B. Muñoz[5], M. Naveas[5], L. Travela[5], F. Ruiz[6]

1 Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Universidad Rey Juan Carlos, c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles (España); manuel.abad@urjc.es; tatiana.izquierdo@urjc.es
2 Grupo de Investigación en Dinámica de la Tierra y Evolución del Paisaje de la Universidad Rey Juan Carlos (DYNAMICAL), c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles (España); n.pereira.2023@urjc.es; makestanne@gmail.com
3 Departamento de Química y Biología, Universidad de Atacama, Avd. Copayapu 485, Copiapó (Chile); philippe.moisan@uda
4 Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Universidad de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó (Chile); rolando.fernandez@uda.cl
5 Geoturimo Lickanantay, Calle Monte Amargo 880, Copiapó, Chile; lickanantay.geotour@gmail.com
6 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva, Campus del Carmen, 21007, Huelva (España) ruizmu@uhu.es

Resumen: El Valle del río Copiapó (Chile) se localiza en el extremo meridional del Desierto de Atacama. En toda su extensión, desde su desembocadura en el océano Pacífico hasta las zonas del altiplano colindantes a su área de nacimiento en la que se superan los 6.000 m sobre el nivel del mar, se describen multitud de Lugares de Interés Geológico (LIG) que, combinados con los paisajes y la belleza escénica del entorno, hacen de este sector andino una zona con un índice de geodiversidad alto y un enorme potencial geoturístico. Se han seleccionado hasta 25 LIG para proponer 5 itinerarios geológicos virtuales desarrollados mediante el *software* de acceso libre *Google Earth* con el objetivo de poner en valor estos elementos del patrimonio geológico y dar difusión a escala local, nacional e internacional de este recurso para impulsar el geoturismo de esta región. Adicionalmente, esta herramienta podría suponer una forma de fortalecer el vínculo entre la comunidad y su territorio, fomentando de esta forma su conservación.

Palabras clave: Geopatrimonio, Geoturismo, Google Earth, Desierto de Atacama, Norte de Chile

Abstract: *The valley of the Copiapó River (Chile) is located at the southern edge of the Atacama Desert. Throughout its extension, from its mouth in the Pacific Ocean, to the areas of the highlands adjacent to the river headwaters, where it exceeds 6,000 m above sea level, several geosites are described. All of them, in combination with the landscapes and the scenic beauty of the surroundings, make this Andean region a zone with a high geodiversity index and an outstanding geotourism potential. Up to 25 geosites have been selected to propose five virtual geological itineraries. Geo-routes have been developed using the free access software Google Earth with the aim of highlighting these geoheritage elements and divulge this resource on a local, national, and international scale, promoting the geotourism in the region. Additionally, this tool could be a way to strengthen the link between the community and territory, thus promoting its conservation.*

Key words: *Geoheritage, Geoturism, Google Earth, Atacama Desert, Northern Chile*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha puesto de manifiesto en multitud de lugares del mundo el gran atractivo que tiene para la sociedad la cultura científica de la Tierra. Las zonas del planeta donde la expresión de la geología se combina con la espectacularidad de los paisajes y otros atractivos naturales, se descubren como auténticos laboratorios de divulgación, aprendizaje y recreo; y la exploración de sus lugares se incorpora con gran éxito a la oferta del turismo cultural, aventura o de playa (p.ej., Quesada y Quesada, 2023).

El Desierto de Atacama meridional posee un diverso y heterogéneo patrimonio geológico y minero que se extiende desde su borde costero hasta la zona de las cordilleras andinas (Castro *et al.*, 2013, Cáceres *et al.*, 2011; Abad *et al.*, 2018, González-Guerra *et al.*, 2022, entre otros). Su geodiversidad es consecuencia de la interacción entre su compleja geografía, su particular contexto climático y, sobre todo, su inmensa variedad y cantidad de afloramientos, formas e hitos paisajísticos, que suponen una manifestación excepcional y viva de la geología casi única. Paradójicamente, y a pesar del enorme potencial de este recurso natural, ni el tejido empresarial, ni el conocimiento de la geología de la región, han posibilitado y aprovechado esta geodiversidad como motor capaz de promocionar un turismo desestacionalizado y sostenible, basado en la marcada identidad natural, geológica y minera de

Atacama. La activación y estabilización de este tipo de turismo favorecería, a su vez, la conservación de su entorno natural, la identidad cultural y el avance en el conocimiento de la geología del norte de Chile. En este trabajo se lleva a cabo una propuesta de 5 itinerarios geo-turísticos virtuales a lo largo y ancho del valle árido del río Copiapó con el objetivo de poner en valor la geodiversidad y el patrimonio geológico de esta zona del desierto de Atacama, en primera instancia, y difundir e impulsar el geoturismo de forma secundaria.

LOCALIZACIÓN

El valle del río Copiapó se localiza en la puerta meridional del Desierto de Atacama (Fig. 1). La ausencia de lluvias es controlada por su ubicación entre 15° y 30°S de latitud, en el cinturón subtropical de altas presiones frente al Anticiclón del Pacífico, así como, por las aguas frías de la corriente de Humboldt que discurre paralela a sus costas.

En la ciudad de Copiapó, situada a 385 m sobre el nivel del mar (s.n.m.), la precipitación media anual es de apenas 17,5 mm mientras que en pre-cordillera y en las cuencas altiplánicas alcanza los 56,8 mm y los 200 mm anuales, respectivamente (Fig. 1). Esta cuenca fluvial marca un límite entre los sistemas fluviales semiáridos del Norte Chico chileno y los áridos del Norte (Abad *et al.*, 2022). El agua que circula por el río se encuentra en conexión con el acuífero del valle y, en la actualidad, y debido a la sobreexplotación, sólo existe surgencia de agua subterránea en algunos sectores de la pre-cordillera. En el altiplano se hallan cuencas endorreicas en las que se han formado lagunas y salares a los que llegan cursos de agua superficial, en algunos casos en forma de humedales.

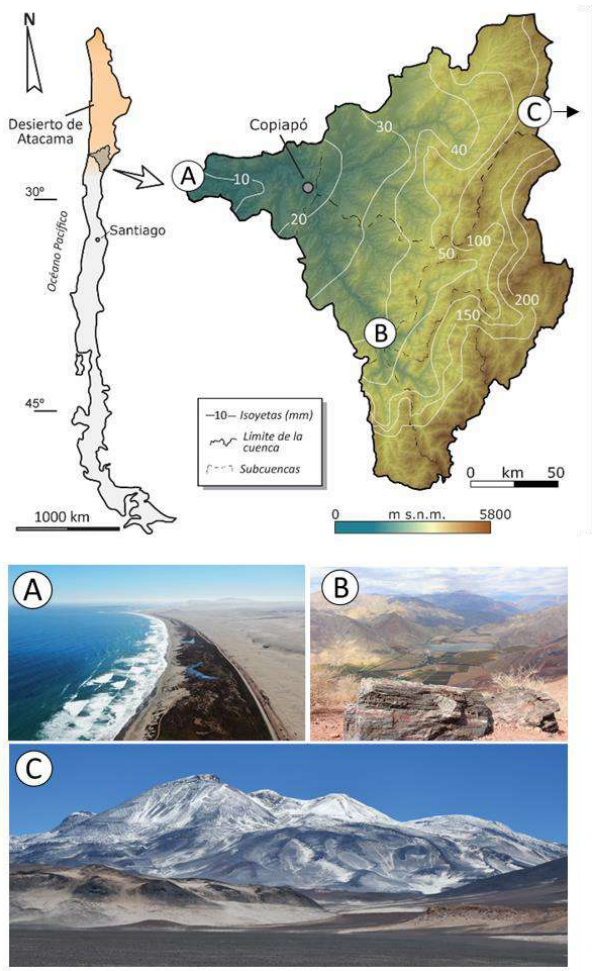


Fig. 1. *Arriba, localización del valle del Copiapó, con algunos ejemplos de LIG. A) Humedal costero en la desembocadura; B) Embalse Lautaro y troncos fósiles de la Fm La Ternera, de edad triásica en la zona Precordillera alta; C) Visual del Volcán Ojos del salado en la Zona del Altiplano andino.*

La geología de la cuenca del río Copiapó es muy diversa, aunque es posible establecer varios dominios geológicos desde su desembocadura a su cabecera (SERNAGEOMIN, 2002). En la planicie costera y Cordillera de la Costa predominan los materiales metamórficos de edad devónico-carbonífero y cuerpos intrusivos de edad pérmico-triásica y jurásica. Este sustrato está recubierto por formaciones geológicas superficiales cuaternarias de tipo eólico, costero y aluvial, terrazas marinas y unidades de edad neógena y naturaleza marina, que destacan por su riqueza paleontológica (p.e., Fm. Bahía Inglesa). Por otro lado, la zona de pre-cordillera está formada por rocas con edad comprendida entre el Jurásico y el Cretácico donde se intercalan unidades volcánicas y sedimentarias marinas fosilíferas, interrumpidas de nuevo por grandes cuerpos intrusivos, asociados a importantes yacimientos de Fe-Cu-Au. Son también frecuentes las formaciones aluviales y fluviales de edad miocena y pliocena con niveles de tefras volcánicas, abanicos aluviales cuaternarios y campos dunares activos que yacen directamente sobre las unidades mesozoicas.

Finalmente, en la zona cordillerana o altoandina, en la cabecera del río, son comunes rocas del Cretácico y Paleoceno-Eoceno inferior, todas constituidas por complejos volcánicos intercalados con secuencias volcano-sedimentarias de naturaleza continental. En estas unidades aparecen intrusiones de cuerpos plutónicos de edad del Cenozoico inferior. Hacia el este, aparecen rocas de edad jurásica formadas por secuencias marinas carbonatadas y detríticas, junto con rocas volcánicas de intercaladas en unidades continentales. La zona altoandina, o altiplano se localiza a cotas superiores a los 4.000 m s.n.m. Se caracteriza por unidades volcánicas de edad miocena y pleistocena, así como, la formación de extensos salares y lagunas durante el Cuaternario, con afloramientos muy significativos de rocas sedimentarias de edad Paleozoica. El volcán activo más alto del mundo, el Ojos del Salado, con 6.893 m s.n.m. se ubica en esta zona. Todos estos dominios son cortados por el río Copiapó, que se extiende por más de 225 km con dirección NE-SO, formando una depresión estrecha fuertemente encajada en el sustrato.

METODOLOGÍA

Para diseñar los itinerarios se seleccionaron 25 LIG, bien por haber sido estudiados previamente por su interés científico, o bien por el conocimiento del lugar por parte de la comunidad y tour-operadores. La metodología de

selección de cada LIG se ha realizado siguiendo la propuesta De Lima *et al.* (2010), que considera factores intrínsecos (tipos de interés, condiciones de exposición, singularidad, etc.), su potencial de uso (accesibilidad, amenazas, proximidad a servicios, etc.) y su vulnerabilidad. Además de poder seguir el recorrido de forma virtual, se incluyen varias fotos y una breve explicación de cada LIG.

A cada uno de los itinerarios temáticos propuestos se puede acceder *online* en la aplicación de acceso abierto *Google Earth* en dispositivos móviles y ordenadores (Fig. 2). En cualquier caso, su desarrollo y diseño está optimizando para dispositivos portátiles. Esta herramienta ya ha sido propuesta y utilizada con éxito anteriormente (p.ej., González-Delgado *et al.*, 2014; Martínez-Graña *et al.*, 2018).



FIGURA 2. *Captura de pantalla de la aplicación* Google Earth *con visualización de uno de los LIG propuestos incluido en el itinerario de la costa.*

ITINERARIOS GEOLÓGICOS

Los LIG seleccionados se integraron en una serie de itinerarios geológicos, o geo-rutas, donde el hilo conductor es su ámbito geográfico, una temática específica y/o un personaje histórico que visitó la zona, como Darwin (Abad *et al.*, 2022). Algunos LIG quedan incluidos en varias rutas (Figs. 3 y 4).

- *Geo-ruta Costera*: Agrupa todos los LIG que se localizan a lo largo de la costa cercana a la desembocadura del río Copiapó y finaliza en el conocido como Santuario del Granito Orbicular. En total, se consideran hasta 7 lugares (Fig. 3). Este itinerario permite observar el paisaje del litoral atacameño, donde predominan los afloramientos de la Fm. Bahía Inglesa (Neógeno superior), de relevancia internacional por su contendido paleontológico, pero también formas activas como campos de dunas, acantilados, playas, manantiales y humedales. A excepción del granito orbicular, se visitan elementos geológicos muy recientes, que se adentran en la historia de esta costa tan solo unos 10 Ma atrás.

- *Geo-ruta urbana por Copiapó y alrededores*: Integra 4 LIG. Son 2 museos, una visual del valle y el Cerro Bramador donde se manifiesta el fenómeno de las dunas musicales. La distancia entre los dos lugares más distantes es de menos de 30 km. Este itinerario posee la singularidad de desarrollarse en el entorno de la capital regional.

- *Geo-ruta del agua*: Se entiende el río Copiapó, sus aguas superficiales y su acuífero, como un hilo conductor que hilvana una ruta formada por 9 LIG. Se inicia en la costa con la aguada de Chorrillos y el humedal costero del Copiapó, pero atraviesa todo el valle hasta alcanzar las zonas altoandinas, donde el agua aparece en los salares, cascadas, lagunas, neveros y glaciares. La mayoría de los LIG se encuentran distanciados varias decenas de kilómetros entre sí, agrupándose en la zona costera y en la zona cordillerana.

- *Geo-ruta de Darwin*: El naturalista inglés visitó el valle del Copiapó durante su viaje por Sudamérica en junio de 1835. Describió ampliamente la geología, geomorfología y paleontología de este sector, y recorrió con curiosidad desde las zonas cordilleranas andinas hasta la costa. Se hospedó casi siempre en el valle, en las localidades de Amolanas y Potrero Seco, aunque visitó la ciudad de Copiapó algunos días. Narra con detalle su experiencia y menciona varios de los LIG y lugares sobre los que gravita este libro, como Quebrada Paipote (el Despoblado), Maricunga y Santa Rosa, el Cerro Bramador, La Puerta, un yacimiento de troncos petrificados de edad triásica cerca del Embalse Lautaro o el Puerto Viejo. Este itinerario permite reconstruir los pasos de Darwin por la región de Atacama, revisitar sus diarios y contemplar su extraordinaria geología a través de sus ojos casi dos siglos más tarde.



FIGURA. 3. *Mapa simplificado con localización de los LIG integrados en el itinerario geológico virtual para la Geo-ruta Costera, que se incluye como ejemplo.*

- *Geo-ruta Paleontológica*: Se trata de una ruta muy fragmentada e inconexa, que abarca todo un transepto del valle desde la costa hasta la zona de cordillera, pero que nos permite visitar diferentes lugares que guardan registros paleo-biológicos de esta zona del desierto de Atacama en un lapso de tiempo que abarca casi 400 Ma. Puede considerarse una ruta conceptual, que puede

realizarse de manera continuada y en una única jornada sólo de forma virtual, ya que implica recorrer más de 1.000 kilómetros para finalizarla.

En el litoral, la enorme diversidad y abundancia de restos de vertebrados de la Fm. Bahía Inglesa puede ser contemplada en el Sitio Paleontológico Los Dedos y en el Museo Paleontológico de Caldera, que nos retrotrae a un escenario formado por cabos rocosos y bahías someras habitadas por aves marinas, cetáceos, tiburones entre hace 10 y 5 Ma. Los ecosistemas mesozoicos terrestres quedan registrados en la zona precordillerana, donde enormes bosques se extendieron por toda la zona durante el Triásico tardío, formados por helechos, helechos con semilla, coníferas y ginkgoales. Unos cientos de millones de años más tarde, en el Cretácico inferior, la impronta de dinosaurios herbívoros que transitaban por las playas y lagunas quedaron grabadas en las arenas y fangos de la Fm. Pabellón (Cretácico superior). Este viaje en el tiempo finaliza en los alrededores del Salar de Maricunga, en la zona altoandina, donde los primeros anfibios del supercontinente Gondwana dejaron sus huellas durante el final del Carbonífero, hace más de 300 millones de años.

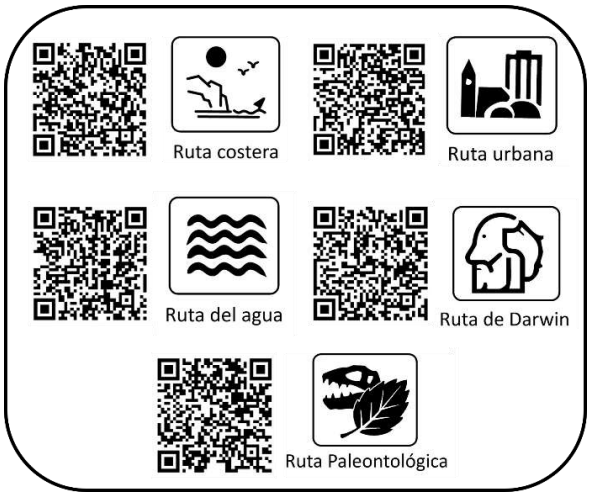


FIGURA 4. *Iconografía donde se incluyen los itinerarios geológicos propuestos y los códigos QR donde pueden visualizarse* online *en la plataforma* Google Earth.

CONCLUSIONES

La propuesta de itinerarios virtuales que se realiza en este trabajo tiene como principal objetivo difundir el patrimonio geológico del sur de desierto de Atacama y promocionar las iniciativas de geoturismo a través de la atracción de visitantes. Este tipo de estrategias no solo suponen el primer paso para una instalación estable de actividades socio-económicas que utilizan este recurso como una alternativa a la minería o el turismo de playa, sino que también fortalecen el vínculo entre comunidad y territorio. La accesibilidad desde cualquier lugar del mundo a estas geo-rutas, desde la comodidad de un dispositivo móvil, suponen una herramienta de excepcional utilidad a la hora de poner en valor el patrimonio geológico del valle del Copiapó y mostrar la enorme geodiversidad y belleza escénica en que la geología se expresa en esta zona del desierto de Atacama. El diseño y virtualización de nuevas rutas temáticas, o la traducción de toda la información a otros idiomas, son tareas que plantean llevarse a cabo en un futuro próximo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al Proyecto FIC GECOTUR (40013408-0), financiado por el Gobierno Regional de Atacama (Chile). Los autores gradecen aun revisor anónimo y a Manuel Monge-Ganuzas sus comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

Abad, M., Moisan, P. Izquierdo, T. (2022): *Sitios de interés geológico del Valle del Copiapó. Geopatrimonio, Geodiversidad y Geoturismo*. 84 pp. Letra Capital Ediciones. Santiago de Chile.

Abad, M., Maldonado, N., Izquierdo, T., Bernárdez, E., Cáceres, M. Guía Geológica (2022): Un recorrido geoturístico por el Área Marina Costera Protegida Isla Grande de Atacama. Editorial Ril. 2018. 120 p.

Cáceres, M., Marquardt, C., Cerpa, L., Aguilera, F. (2011): La Ruta de Segerstrom: transversa geoturística y geopatrimonial en la Provincia de Copiapó, Región de Atacama. En: *I Simposio de Geoparques y Geoturismo en Chile*. Libro de comunicaciones.

Castro, C., Pattillo, C., Rivera, J., Zuñiga, A. (2013): Valoración territorial del geopatrimonio de la zona costera del sur del Desierto de Atacama, Chile (27º S). Investigaciones geográficas, 45: 51-72.

De Lima, F.F., Brilha, J.B., Salamuni, E (2010): Inventorying Geological Heritage in Large Territories: A Methodological Proposal Applied to Brazil. *Geoheritage*, 2: 91–99.

González-Delgado, J.A., Martínez-Graña, A.M., Civis, J., Sierro, F.J., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Ruiz, F., González-Regalado, M.L. y Abad, M. (2014): Virtual 3D Tour of the Neogene Palaeontological Heritage of Huelva (Guadalquivir Basin, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 73(8): 4609-4618.

González-Guerra, S., Mansilla, G., Muñoz, B. *et al.* (2022): *Guía geoturística de Quebrada Descubridora y alrededores*. Arte Sonoro Austral Producciones, Chile, 59 p.

Martínez-Graña, A.M., Bajo, I., González-Delgado, J.A., Cárdenas-Carretero, J., Abad, M. y Legoinha, P. (2018): Virtual 3D Tour Applied to the Paleontological Heritage of the Neogene of Sevilla (Guadalquivir Basin, Spain). *Geoheritage*, 10(3): 473-482.

Quesada-Valverde, M.E., Quesada-Román, A. (2023): Worldwide Trends in Methods and Resources Promoting Geoconservation, Geotourism, and Geoheritage. *Geosciences*, 13(2): 39.

SERNAGEOMIN (2010): *Mapa Geológico de Chile Escala 1:1.000.000*. Serie Geología Básica nº 075. Santiago de Chile.

Extracción de perfiles estratigráficos de alta definición en materiales diversos como método de conservación de texturas y estructuras para su uso didáctico y científico.

Extraction of high-definition stratigraphic profiles in various materials as a method of preserving textures and structures for didactic and scientific use.

E. Baeza[1] y X. Moreno[1]

1 IGME-CSIC, Rios Rosas nº 23, 28003, Madrid. e.baeza@igme.es ; x.moreno@igme.es

Palabras clave: Perfil, estratigrafía, peel, geoconservación, La Palma.

Resumen

Proponemos una metodología de extracción de perfiles estratigráficos en materiales sueltos, como limos, arcillas, arenas, depósitos volcanoclásticos y perfiles de suelos de distinta naturaleza. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación del método para la obtención de perfiles en la caldera del Taburiente (La Palma), como una eficaz ayuda a la geoconservación de estructuras para su exhibición y uso didáctico y científico en diversos espacios públicos. Mediante la aplicación de diferentes consolidantes y soportes rígidos sobre un perfil original, podemos obtener secciones de cortes geológicos, suelos diversos y yacimientos arqueológicos, entre otros, con la importante característica de un espesor mínimo y la obtención de una imagen especular de los materiales sin que cambien de morfología, color o tono del perfil, siendo además un proceso rápido de solo unas pocas horas.

Key words:. Profile, stratigraphy, peel, geoconservation, La Palma.

Abstract

We propose a methodology for the extraction of stratigraphic profiles in loose materials, such as silts, clays, sands, volcanoclastic deposits, and soil profiles of different nature. In this work, we present the results of the application of the method for obtaining profiles in the Taburiente caldera (La Palma), as an effective aid to the geoconservation of structures for their exhibition and didactic and scientific use in different public spaces. By applying different consolidants and rigid supports on an original profile, we can obtain sections of geological sections, different soils, and archaeological sites, among others, with the important characteristic of a minimum thickness and obtaining a mirror image of the materials without changing morphology, colour or tone of the profile, being also a fast process of only a few hours.

Referencias

Díez-Herrero, A. (2016). Actuaciones para la conservación y estudio de los depósitos de paleoinundaciones en el yacimiento arqueológico musteriense del Abrigo del Molino (Segovia). En: *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro* (J. J. Durán Valsero, M. Montes Santiago, A. Robador Moreno y A. Salazar Rincón, Eds.). IGME, Madrid, 1987-194.

Douillet, G.A., Kueppers, U., Mato, C., Chaffaut, Q., Bouysson, M., Reschetizka, R., Hoelscher, I., Witting , P., Hess, K.-U., Cerwenka, A., Dingwell, D.B. y Bernard, B. (2018). Revisiting the lacquer peels method with pyroclastic deposits: sediment plates, a precise, fine scale imaging method and powerful outreach tool. *Journal of Applied Volcanology* 7, 11, https://doi.org/10.1186/s13617-018-0080-2.

Explorando la aplicación de funciones de densidad en evaluaciones numéricas de inventarios de lugares de interés geológico.

Exploring the application of density functions for numerical assessments of geosites inventories.

D. Ballesteros[1,2] y equipo de trabajo del inventario de LIG del UGGp Montañas do Courel[2].

1 Dpto. de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria 39005 Santander. ballesterosd@unican.es.
2 Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel, 27320 Quiroga.

Palabras clave: análisis de densidad, geoparque, lugar de interés geológico, patrimonio geológico.

Resumen

Los inventarios de lugares de interés geológico (LIG) y sus evaluaciones numéricas son herramientas para gestionar el patrimonio geológico. No obstante, los criterios de definición y evaluación numérica de los LIG son variables, lo que limita su utilidad. A fin de mitigar estas limitaciones, se han aplicado las funciones de densidad al inventario de LIG del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel. Para ello, se calcularon las curvas de densidad de cinco índices numéricos (el valor natural, el científico, el de geoconservación, el uso potencial y el uso real) calculados para cada LIG, y proyectados sobre un eje de abscisas que varía entre valores muy bajos y muy altos. Los resultados muestran una curva de densidad del valor natural semejante a una esperable distribución normal, lo que valida el criterio de puntuaciones empleado. En su conjunto, las curvas de densidad muestran que los LIG del Geoparque presentan valores naturales y científicos muy variables, que están infrautilizados, pero relativamente bien conservados. Por tanto, se considera necesario promover investigaciones adicionales e integrar más los LIG en las iniciativas de desarrollo local. En conclusión, la aplicación de las funciones de densidad permite sistematizar y mostrar visualmente la distribución que toman las variables numéricas de los LIG, lo que facilita su interpretación y utilidad, a la vez que abre un campo de investigación acerca de la comparación entre inventarios de LIG.

Keywords: density analysis, geopark, site of geological interest, geological heritage.

Abstract

The inventories of geosites and their numerical assessments are tools for managing geoheritage. However, the criteria for defining and numerically evaluating geosites are variable, limiting its utility. To mitigate these limitations, density functions have been applied to the geosite inventory of the Courel Mountains UGGp. For this purpose, density curves were calculated for five numerical indices (the natural value, the scientific value, the geoconservation value and the potential and real uses) calculated for each geosite and projected onto an x-axis ranging from very low to very high values. The results show that the density curve of the natural value fits to the expected normal distribution, validating the used scoring criterion. Overall, the density curves demonstrate that the geosites of the UGGp exhibit highly variable natural and scientific values are underutilized but relatively well conserved. Therefore, it is necessary to promote additional scientific research and integrate more geosites in the local development initiatives. In conclusion, the application of density functions allows for the systematic and visualization of the distribution taken by the numerical variables of geosites. This facility the interpretation and utility of inventories, while opening the door to rigorous comparisons between inventories.

Manual para la elaboración de carteles interpretativos para la divulgación de la geología.

Interpretative signs guideline for the dissemination of geology.

D. Brusi[1], M. González[2] y C. Puig[2]

1 Facultat de Ciències. Universitat de Girona. Carrer de Maria Aurèlia Capmany, 69, 17003 Girona. david.brusi@udg.edu
2 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Parc de Montjuïc. 08038 Barcelona marta.gonzalez@icgc.cat, Carme.Puig@icgc.cat|.

Resumen: Esta contribución tiene por objetivo presentar el *Manual para la elaboración de carteles interpretativos para la divulgación de la geología* que ha sido publicado recientemente por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Está dirigido a aquellas personas implicadas en la planificación, diseño, instalación y mantenimiento de carteles de temática geológica. En un capítulo inicial, el manual aborda algunas consideraciones previas como las partes de un cartel, el tipo de soportes y los materiales más comúnmente utilizados en este tipo de instalaciones. También se analizan algunos retos para la divulgación de la Geología y se discute la diferencia entre carteles informativos e interpretativos. El bloque más nuclear del manual está dedicado a los aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de realizar un cartel interpretativo de contenido geológico. Se establecen recomendaciones relacionadas con su planificación y sobre la elaboración de sus contenidos textuales y gráficos. También se incluyen ejemplos de carteles diseñados siguiendo las directrices que han sido definidas. Aunque la publicación pone el foco en los carteles divulgativos del patrimonio geológico al aire libre, muchas de las reflexiones e indicaciones pueden ser aplicadas a otras temáticas y a espacios expositivos de museos o centros de interpretación.

Palabras clave: carteles interpretativos, manual, patrimonio geológico,

Abstract: *This contribution aims to present the Interpretative signs guideline for the dissemination of geology recently published by the Cartographic and Geological Institute of Catalonia. It is intended for those involved in the planning, design, installation, and maintenance of geological-themed panels. In an initial chapter, the manual addresses some preliminary considerations such as the parts of a panel, the type of supports, and the materials most used in this type of installation. It also discusses some challenges for the dissemination of geology and explores the difference between informative and interpretive panels. The core of the manual is dedicated to aspects to consider when creating an interpretive panel with geological content. Recommendations are made regarding its planning and the development of its textual and graphic contents. Examples of panels designed following the defined guidelines are also included. Although the publication focuses on informative panels about outdoor geological heritage, many of the reflections and indications can be applied to other themes and exhibition spaces in museums or nature interpretation centres.*

Keywords: *interpretative signs, guideline, geological heritage.*

LOS CARTELES INTERPRETATIVOS

La señalización interpretativa en espacios al aire libre es un recurso muy común y eficaz para facilitar el descubrimiento de los valores naturales de un territorio y, lógicamente, también del patrimonio geológico. Los carteles constituyen una guía estática que nos destaca y presenta los elementos más relevantes de un lugar que las personas expertas han seleccionado para nosotros.

Los paneles son una herramienta muy importante en la divulgación del patrimonio y las directrices existentes para los profesionales que los elaboran suelen limitarse a una relación de prescripciones técnicas y de identidad visual. Por esta razón los objetivos de este manual (Brusi, 2023) (Fig. 1) se centran en determinar y describir aquellos aspectos básicos a considerar en la planificación, diseño y confección de los contenidos científicos de los carteles divulgativos.

Cuando un equipo de trabajo se plantea la elaboración de carteles interpretativos debe tener en cuenta consideraciones científicas, técnicas, artísticas, económicas, turísticas, educativas, museísticas o psicológicas, entre otras muchas. Probablemente a causa de esta transversalidad de enfoques, son pocos los trabajos que han abordado el tema desde la perspectiva de la geología. En nuestro caso, en la consulta de antecedentes, han resultado de gran utilidad algunas publicaciones que aportan recomendaciones prácticas desde el punto de vista de la comunicación en carteles interpretativos de contenidos genéricos o específicos sobre patrimonio natural (Morales, J., 2001; Colquhoun, F., 2005; Government of Nova Scotia, 2008; Caputo et al. (2008); Diaz, G. (2008); National Park Service, 2009 y 2020; Smithsonian Institution, 2018).



FIGURA 1. *Portada del Manual para la elaboración de carteles interpretativos para la divulgación de la geología, publicado como Monografía técnica 13 del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.*

Los artículos publicados en revistas científicas que profundicen específicamente en los carteles de contenidos geológicos son bastante escasos. La limitación a diez referencias bibliográficas de esta publicación no nos permite citarlas todas. Las personas interesadas podrán consultarlas en el propio manual.

Los carteles correctamente diseñados desde un punto de vista comunicativo atraen al público y le invitan a dedicar un tiempo a observar y comprender su entorno; a trasladarle un relato que le otorga un significado más perdurable. Permiten que los visitantes se lleven conocimientos, sensaciones y recuerdos que van más allá de una simple fotografía. Lo que uno percibe y aprende de la mano de un cartel interpretativo, probablemente, podrá ser explicado y compartido. Los carteles deben ser atractivos, fáciles de ver y de leer y deben favorecer la interpretación más que la información. Por todo ello, y sin ninguna voluntad de establecer unas normas cerradas de obligado cumplimiento, este manual incluye reflexiones y recomendaciones con el objetivo de aportar criterios y pautas que pueden ayudar a las personas implicadas en esta labor, a la hora de tomar decisiones.

¿CARTELES INFORMATIVOS O CARTELES INTERPRETATIVOS?

Freeman Tilden (1957) y, más recientemente, Sam H. Ham (1992) apostaron decididamente por las ventajas de un descubrimiento interpretativo de los valores patrimoniales.

Por lo que se refiere a los carteles divulgativos, es fundamental diferenciar entre los carteles informativos y los carteles interpretativos (Fig. 2). El objetivo de los primeros es que las personas que los leen sean conocedoras de unos hechos. Un cartel informativo nos comunica localizaciones, nombres, fechas, cifras, normas de seguridad o, incluso, en el caso de la Geología, descripciones detalladas de materiales o procesos. Sin embargo, raramente, por sí misma, la simple información interpela emocionalmente a los visitantes no expertos o es suficientemente significativa para ser recordada.

La señalización interpretativa, sin embargo, pretende transformar la información en un relato capaz de captar el interés de las personas. En Geología, busca provocar la curiosidad de los visitantes, implicarlos activamente en el descubrimiento de las evidencias escondidas en las rocas y en el paisaje que nos revelan los episodios de su historia. Un cartel interpretativo debe ser una experiencia que sumerja a quien lo lee en su temática.



FIGURA 2. *Cartel informativo del meteorito de Hoba, en Namibia (arriba) y cartel interpretativo de las formaciones tobáceas de Semuc Champey, en Guatemala (abajo)*

CONTENIDOS DEL MANUAL

El manual dedica un capítulo inicial a describir las tipologías de este tipo de soportes comunicativos (Fig. 3), los materiales utilizados y la estructura habitual en el diseño de carteles.

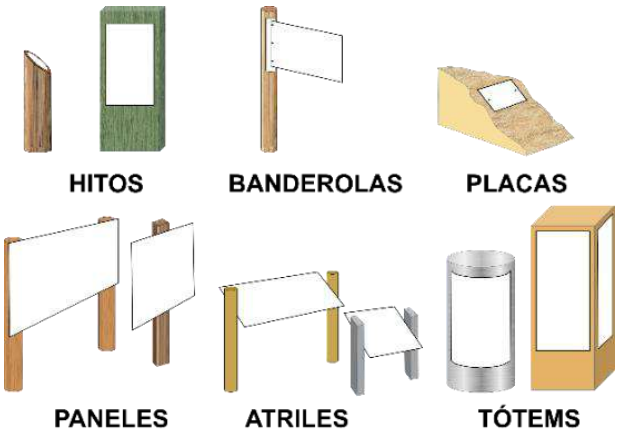


FIGURA 3. *Representación esquemática de algunas de las tipologías de soporte más habituales.*

También se definen brevemente la estructura de los bloques de contenidos y la tipología de los elementos textuales o gráficos que integran un cartel.

La parte más extensa del manual está dedicada describir los aspectos que se tendrían que considerar a la hora de realizar un cartel interpretativo. No se ha perseguido establecer unas directrices cerradas, sino más bien se ha pretendido plantear algunas orientaciones, basadas, por una parte, en el análisis crítico de ejemplos de carteles de distintos lugares del mundo, y por otra, en la revisión de algunas propuestas recogidas en diferentes publicaciones de referencia.

Dada la extensión limitada de esta contribución, resulta imposible pormenorizar los contenidos de cada una de las ideas desarrolladas. Por tanto, nos limitaremos a resumir algunos de los planteamientos más relevantes. Para una visión más minuciosa, remitimos a las personas interesadas a la publicación impresa o a su versión online descargable gratuitamente de la página web del ICGC:
https://datacloud.icgc.cat/datacloud/descarregues-web/bd/pubs/icgc_mt_13_cartells_interpretatius.pdf

Destacamos, por ejemplo, los apartados dedicados a:

1) La iniciativa e idoneidad de la propuesta de instalación de carteles.
2) La constitución de un equipo de trabajo.
3) La definición del perfil del público potencial.
4) El planteamiento de los objetivos.
5) La selección de los lugares de interés y temáticas abordadas.
6) La elección de la tipología de los soportes, el tamaño, las proporciones, los materiales, el tipo de impresión…
7) La propuesta de emplazamiento.

Una de las secciones a destacar es la que pone en valor los carteles como instrumento comunicativo reflexionando en torno a la regla del «3-30-3» que se utiliza en marketing, publicidad o en cualquier medio que persiga captar la atención y llegar a un público no especialmente interesado. La regla determina que frente a un mensaje gráfico o escrito solo disponemos de 3 segundos para captar la atención de una persona. Si ya lo hemos conseguido, esta solo dedicará un máximo de 30 segundos a seguir leyendo antes de perder el interés. Tan solo si hemos logrado atraparla e implicarla en un relato, estará en condiciones de continuar atenta, hasta un nuevo máximo de 3 minutos (Fig. 4).

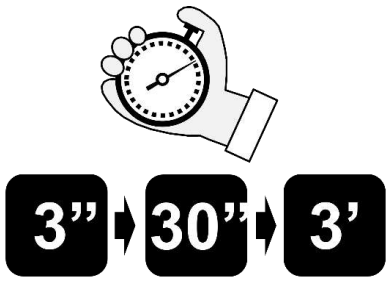


FIGURA 4. *La regla del «3-30-3» debe ser un referente en la confección de carteles interpretativos.*

La parte más práctica del manual puede que sea la referida a los contenidos textuales y gráficos. Respecto a los textos se recomienda:

1) Otorgar un gran protagonismo al encabezamiento. Debe indicar el topónimo del lugar y el título del cartel. Éste último debe ser breve, impactante, provocativo…
2) Estructurar el texto en unos pocos bloques temáticos.
3) Plantear una redacción con una extensión idónea de unas 80 palabras y máxima de 200 palabras en los carteles pequeños y de 350 en los carteles grandes.
4) Emplear un tono divulgativo, un lenguaje sencillo y claro pensado para personas no expertas.
5) Considerar la presentación de los contenidos textuales y gráficos en distintos idiomas.

Por lo que respecta al diseño gráfico, se aconseja:

1) Definir una plantilla del cartel que establezca las medidas, la geometría., la estructura, la retícula... Se sugiere que la superficie del cartel se distribuya con 1/3 de gráficos, 1/3 de textos y 1/3 en blanco., con un diseño simple (Fig. 5).
2) Seleccionar colores claros para el fondo y sólidos y bien contrastados para los textos. En lugares con elevada luminosidad se recomiendan colores oscuros en fondos y textos claros (también Fig. 5). En lugares con menos luminosidad fondos claros y textos oscuros.
3) Elegir unas tipografías “de palo” y utilizar bloques de texto con una longitud máxima de 12 palabras y 75 caracteres por línea. Tener en cuenta el tamaño óptimo de las letras. Justificar los textos “en bandera”.
4) Considerar la gran importancia de los elementos gráficos. Seleccionar e incorporar infografías, tablas, mapas, cortes geológicos, bloques diagrama, ilustraciones, fotografías, grabados… No olvidar nunca la orientación y la escala en los mapas.



FIGURA 5. *Cartel con un color de fondo negro mate y un texto y unos gráficos monocromos blancos en Mono Lake (California (EE. UU.).*

Las directrices incorporan también algunos aspectos no menos importantes que los anteriores que ponen el foco en valorar la necesidad o idoneidad de:



FIGURA 6. *Cartel interpretativo de la colada piroclástica del Puig d'Adri (Canet d'Adri, Girona).*

1) Incorporar recursos táctiles.
2) Incluir códigos QR, enlaces a apps, vídeos...
3) Proponer al público actividades ludificadas.
4) Contemplar los criterios de accesibilidad y sostenibilidad ambiental.

El último apartado del manual aporta algunos ejemplos de carteles pensados para ilustrar un tratamiento ajustado a las directrices que se han establecido. En primer lugar, se describe una propuesta existente en Islandia como ejemplo de creatividad y buenas prácticas comunicativas: Los carteles interpretativos y el puente entre la placa euroasiática y norteamericana en la península de Reykjanes, que se han convertido en uno de los lugares más visitados por los turistas. En segundo lugar, el manual incluye algunos ejemplos de carteles (Fig. 6) diseñados específicamente para mostrar la aplicación de las directrices.

TRADUCCIONES

El manual ha sido publicado originalmente en lengua catalana. Se prevé que para el mes de julio de 2024 ya estén disponibles sus traducciones al castellano e inglés.

REFERENCIAS

Brusi, D. (2023): *Atraure, descobrir i entendre! Manual per a l'elaboració de cartells interpretatius per a la divulgació de la geologia. Monografia tècnica nº 13* ICGC.

Caputo, P., Lewis, S. & Brochu, L. (2008): *Interpretation by design: Graphic design basics for heritage*. InterpPress.

Colquhoun, F. (2005): *Interpretation Handbook and Standard. Distilling the essence*. Department of Conservation, Wellington (Nueva Zelanda).

Diaz Meyer, G. (2008): Aspectos de la comunicación visual y gráfica en a comunicación del patrimonio cultural. En: *La comunicación global del patrimonio cultural* (Santos M. Mateos Rusillo, coord.). Ediciones Trea. 175-270.

Government of Nova Scotia (2008): *Outdoor Interpretive Signage*. Department of Tourism, Culture and Heritage and Business Service Centre. Canadá.

Ham, S. (1992): Environmental Interpretation: En *Practical guide for people with big ideas and small budgets*. Fulcrum Publishing.

Morales, J. (2001): *Guía práctica para la interpretación del patrimonio: el arte de acercar el legado natural y cultural al público visitante*. 2.ª ed. Sevilla: Junta de Andalucía, Consejería de Cultura.

National Park Service (2009): *Wayside Exhibits. A guide to developing outdoor interpretive exhibits*. EE. UU. National Park Service.

Smithsonian Institution (2018): *Guide to Exhibit Development*. Smithsonian Exhibits. Washington, DC, EE. UU.

Tilden, F. (1957): *Interpreting Our Heritage*. Chapel Hill, NC: University of North Carolina Press. EE. UU. (Edición de 1977).

El Máster Universitario en Patrimonio natural: valorización y gestión de la Universitat de Girona.

The Master's Degree in Natural Heritage: valorisation and management at the University of Girona.

D. Brusi[1], C. Rodríguez[1] y M. Casadevall[1]

1 Departament de Ciències Ambientals. Facultat de Ciències. Universitat de Girona. Carrer de Maria Aurèlia Capmany, 69, 17003 Girona. david.brusi@udg.edu , conxi.rodriguez@udg.edu , margarida.casadevall@udg.edu

Palabras clave: máster universitario, patrimonio geológico, patrimonio natural.

Resumen

En el curso 2023/24 la Facultad de Ciencias de la Universidad de Girona empezó un máster centrado en el Patrimonio Natural que otorga al patrimonio geológico un especial protagonismo. Tiene una duración de un curso académico y se realiza, en su mayor parte, de forma telemática. El máster va dirigido a graduados en Biología, Geología o Ciencias Ambientales. El plan de estudios es de 60 créditos: 30 de materias obligatorias, 6 a prácticas intensivas, 12 a prácticas en empresa y 12 al trabajo final de máster. Se ofrecen asignaturas centradas en las distintas parcelas del patrimonio natural: vegetal, faunístico y geológico. También se han impartido asignaturas de museología, gestión del patrimonio, valorización del patrimonio natural o recursos de divulgación y comunicación. La asignatura de prácticas intensivas se desarrolla presencialmente en espacios naturales de la provincia de Girona con metodologías de Aprendizaje basado en problemas (ABP). Los contenidos geológicos están presentes en tres asignaturas. Se abordan temas relacionados con la tipología de elementos valorizables y Lugares de Interés Geológico (LIG). También se tratan las fuentes de información y catalogación, el diseño de itinerarios, carteles interpretativos y el guiaje de campo y a definir las acciones y actividades constitutivas de amenazas, y las medidas preventivas, correctoras o de restauración.

Keywords: university master's degree, geological heritage, natural heritage.

Abstract

In the 2023/24 academic year, the Faculty of Sciences at the University of Girona began a master's program focused on Natural Heritage, giving special prominence to geological heritage. The program lasts for one academic year and is mostly conducted through online methods. The master's program is designed for graduates in Biology, Geology, or Environmental Sciences. The curriculum consists of 60 credits: 30 dedicated to mandatory subjects, 6 to intensive practical activities, 12 to company internships, and 12 to the final master's thesis. The courses cover various aspects of natural heritage, including plant, fauna, and geological components. Additionally, subjects related to museography, heritage management, natural heritage valorisation, and resources for dissemination and communication are offered. The practical activities take place in natural spaces within the province of Girona utilizing Problem-Based Learning (PBL) methodologies. Geological contents are present in three subjects. Topics related to the typology of valuable elements and geosites are addressed. Sources of information and cataloguing, design of itineraries, interpretive signs and field guidance are also discussed, and to defining the actions and activities that constitute threats, and preventive, corrective or restoration measures.

Referencias

https://www.udg.edu/ca/masters-en-mediambient-i-quimica/patrimoni-natural

Fotogrametría aplicada al seguimiento del estado de conservación del patrimonio geológico: estudio de caso del LIG del Yacimiento de Icnitas de Vale de Meios (Portugal)

Photogrammetry applied to the monitoring of the state of conservation of geological heritage: a case study of the Vale de Meios Ichnite geosite (Portugal)

T. S. Canesin[1], C. D. Viana[2], J. Vegas[3], M. Álvarez de Buergo[4], P. Pereira[1]

1 Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad de Minho, Campus Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal. thaissiqueirac@yahoo.com.br; paolo@dct.uminho.pt
2 Instituto de Geociencias, Universidad de São Paulo (IGc-USP), São Paulo 05508-080, Brasil. camila.viana@usp.br
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. j.vegas@igme.es
4 Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), C/ Doctor Severo Ochoa 7, 28040 Madrid, España. monica.alvarez@csic.es

Palabras clave: fotogrametría, geoconservación, icnitas, monitorización, patrimonio geológico.

Resumen

El LIG del Yacimiento de Icnitas de Vale de Meios está situado en el *Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros* (PNSAC), en la región centro-oeste de Portugal continental, en una cantera inactiva de calizas micríticas de edad Jurásico Medio (168 Ma) localizada en el Macizo Calcáreo *Estremenho*. El estrato expuesto de 11.400 m^2, presenta huellas de Terópodos y de Saurópodos, de las que es posible extraer importante información anatómica y paleoecológica sobre los dinosaurios de este periodo (Santos, 2008). La vulnerabilidad natural de este LIG reside en el aumento de fracturas, la erosión, el incremento de los sedimentos que rellenan las huellas, la colonización biológica y cambios en el color de la roca. Con el fin de registrar el estado actual de conservación del LIG y de evaluar mediante el método Structure-from-Motion–Multi-View Stereo (SfM-MVS) (Viana et al., 2018) la utilización de la herramienta para cuantificar y monitorizar este patrimonio geológico a lo largo del tiempo, se aplicaron técnicas de fotogrametría *in situ* a las huellas de dinosaurios.

Abstract

The Vale de Meios Ichnite geosite is in the Serras de Aire e Candeeiros Natural Park (central-western region of Portugal mainland), in an inactive quarry of micritic limestones dated at the Middle Jurassic (168 Ma) and located in the Estremenho Calcareous Massif. The exposed layer of 11.400 m^2, shows Theropod and Sauropod footprints, from which it is possible to extract important anatomical and palaeoecological information about the dinosaurs of this period (Santos, 2008). Natural vulnerability is mainly identified by increased fractures, erosion, sediments filling the footprints, biological colonization, and changes in rock colour. Photogrammetry techniques were applied to dinosaur footprints in situ in order to record the current conservation status and with the aim of evaluating the use of the tool and the Structure-from-Motion-Multi-View Stereo (SfM-MVS) method (Viana et al., 2018) for a possible quantification and monitoring of this geological heritage over time.

Referencias

Santos, V. F. (2008). Pegadas de dinossáurios de Portugal. *Museu Nacional de História Natural da Universidade de Lisboa*, 123.

Viana, C. D., Grohmann, C. H., dos Santos Toledo Busarello, M., & Garcia, G. P. B. (2018). Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion - Multi-View Stereo: A case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 48(4), 839–852. https://doi.org/10.1590/2317-4889201800201898

Espectroscopía vibracional (Raman e IR) de las veladuras y de las pinturas rupestres de La Chorrera, Los Yébenes, Toledo

Vibrational spectroscopy (Raman and IR) of the glazes and the cave paintings of La Chorrera, Los Yébenes, Toledo

A.I. Casado[1], R. Asiain[2], A. Lobato[1], M. Taravillo[1] E. Guillamet[3] y L.M. Muñoz-Fragua[4]

1 Dpto. Química Física. Facultad de Ciencias Químicas. Univ. Complutense de Madrid. 28040 Madrid. acasadogomez@ucm.es, a.lobato@ucm.es, mtaravil@ucm.es
2 Gabinete de documentación técnica. Museo Nacional del Prado. 28014 Madrid. raquel.asiain@ucm.es
3 Restaurador independiente. Andorra. eguillamet@yahoo.es
4 Alcaen restaura, S.L. C/ San Juan de la Penitencia, 9. 45002 Toledo. luismiguel@alcaenrestaura.com

Palabras clave: arte rupestre, arte parietal, espectroscopía Raman portable, restauración, cuarcitas.

Resumen

Presentamos la caracterización mineralógica de las pinturas rupestres y las veladuras de La Chorrera (Los Yébenes, Toledo). Estas pinturas de la Edad del Bronce se encuadran en el arte rupestre esquemático, siendo de los pocos ejemplos en Toledo provincia. El soporte es Cuarcita Armoricana, en la cara norte de la Sierra de los Yébenes. Las veladuras se restringen a las superficies con representación pictórica. Para el análisis *in situ* utilizamos espectroscopía Raman, una técnica no destructiva que puede transportarse al campo. Para el análisis infrarrojo (IR) de las veladuras tomamos muestras sin comprometer las pinturas. En los espectros Raman se han identificado bandas de cuarzo (205 y 466 cm^{-1}) y ópalo (1142, 1183 y 1200 cm^{-1}) por la cuarcita, y de magnetita (660 cm^{-1}) del pigmento mineral. En las veladuras, de whewellita (495, 517 y 915 cm^{-1}), y de compuestos de los grupos fosfato (591 y 978 cm^{-1}) y sulfato (1038 cm^{-1}). En los espectros IR identificamos bandas de whewellita, de yeso y de carboapatito amorfo. Ante estos resultados, las veladuras podría ser un precipitado mineral resultado de humedecer las pinturas, intervenciones habituales en el siglo XIX para aumentar el contraste de éstas para su registro sin sopesar su integridad.

Keywords: rock art, cave art, portable Raman spectroscopy, restoration, quartzites

Abstract

We present a mineralogical characterization of rock paintings at the La Chorrera site in Los Yébenes (Toledo) and the glazes covering them, aimed at potential restoration. These Bronze Age paintings are part of schematic rock art and represent one of the few examples in the province of Toledo. The lithic surface for the paintings consists of white-pink Armorican Quartzite, located on the north face of the Sierra de los Ebene's. Glaze is present only in the areas with pictorial representation. Portable Raman spectroscopy conducted in situ allowed for non-destructive mineralogical analysis. Additionally, glaze samples were obtained for infrared (IR) spectroscopy analysis in the lab, without compromising the paintings. Raman spectra revealed signals of quartz (205 and 466 cm^{-1}), opal (1142, 1183, and 1200 cm^{-1}), and magnetite (660 cm^{-1}). Glaze samples exhibited compounds such as whewellite (495, 517, and 915 cm^{-1}), phosphate (591 and 978 cm^{-1}), and sulphate (1038 cm^{-1}). IR spectra confirmed the presence of whewellite, gypsum-type sulphate, and amorphous carboapatite-type phosphate. Our results suggest that these glazes likely resulted from common nineteenth-century wetting interventions aimed at enhancing contrast, without consideration for integration or future conservation.

Lugares de Interés Geológico de Used. Ejemplo de La Cantera de "*La Ceyda*".

Geosites in Used. The example of "La Ceyda" Quarry.

J. Causape [1,3], P. Gisbert [2,3] y R. Soto [1,3]

1 Instituto Geológico y Minero de España. Residencia CSIC Campus Aula Dei. Av. Montañana 1005. 50059 Zaragoza. j.causape@igme.es
2 Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12. 50.009. Zaragoza. gisbert@unizar.es
3 Unidad Asociada en Ciencias de la Tierra. (IGME-UNIZAR)

Resumen: Used, un pequeño pueblo al sur de la provincia de Zaragoza, intenta promocionar su patrimonio mediante la puesta en valor de Lugares de Interés Geológico (LIG). La mina de hierro, manantiales, humedales, pozo surgente, fósiles, cuevas, geotermia y la historia del terremoto destructivo más reciente de Aragón son algunos ejemplos. En este trabajo se presenta información relacionada con uno de estos LIG, la relativa a la antigua cantera de "*La Ceyda"* cuya apreciada piedra ha venido siendo extraída desde el medievo hasta el siglo XX quedando constancia de su uso en edificios tan emblemáticos como la Colegiata de Daroca (1586) e indicios de su utilización en sitios tan lejanos como Madrid, hasta donde pudo transportarse siguiendo el camino real o más recientemente en ferrocarril. Esta iniciativa pretende poner en valor el patrimonio geológico de Used mediante la realización de diferentes fichas descriptivas que serán presentadas al público en formato digital.

Palabras clave: Patrimonio, Zaida, Piedra, Historia, Arquitectura

Abstract: *Used is a small town in the south of the province of Zaragoza. We are trying to promote its heritage by highlighting its geosites. Some of these geosites are an iron mine, springs, wetlands, spring well, fossils, caves, geothermal energy and the history of the most recent destructive earthquake in Aragón. This work describes one of these points, "La Ceyda" quarry, whose valued stone has been extracted from the Middle Ages to the 20th century. There is evidence of its use in such emblematic buildings as the Collegiate Church of Daroca (1586) and indications of its use in places as far away as Madrid, to where it could be transported following the royal road or more recently by rail. This initiative aims to highlight the geoheritage of Used by creating different descriptive sheets that will be presented to the public in digital format.*

Key words: *Heritage, Zaida, Stone, History, Architecture*

INTRODUCCIÓN

Used (Zaragoza) es uno de esos pueblos de la España vaciada que busca explorar nuevos recursos al margen de la agricultura. Su término municipal engloba la Sierra de Santa Cruz, en el corazón de la Cordillera Ibérica, y parte del extenso altiplano (1000 msnm) que abarca el complejo lagunar endorreico de Gallocanta.

La localidad de Used pertenece a la comarca Campo de Daroca, con una densidad de población de 3,8 hab/Km^2 y localizada al sur de la provincia de Zaragoza. El término municipal de Used presenta una alta variabilidad geológica debido a su localización mostrando una considerable diversidad de Lugares de Interés Geológico (LIG) a tan sólo unos pocos hectómetros o kilómetros de distancia unos de otros.

Pese a que en la actualidad no hay descrito ningún LIG en su término municipal (https://info.igme.es/ielig/), su patrimonio geológico está siendo puesto en valor mediante la elaboración de fichas, videos y documentación divulgativa.

Algunos de los elementos geológicos de interés que se presentan en estas fichas son: una mina de hierro, manantiales, humedales, pozo surgente, cuevas, fósiles, geotermia y la historia del terremoto destructivo más reciente de Aragón del cual se ha publicado un libro (Simón *et al*., 2021) con su correspondiente documental (https://www.youtube.com/watch?v=2Q2mjfdyL9A).

La información sobre estos elementos geológicos pretende ser incorporada en plataformas digitales como Google Earth, Geocaching e incluso en una app propia. De forma paralela, los LIG que se consideren de mayor valor se pretenden incorporar en el IELIG que gestiona el IGME-CSIC (https://info.igme.es/ielig/) y en el inventario de LIG del Gobierno de Aragón. En este trabajo se presenta, a modo de ejemplo, la información disponible y propuesta de ficha para uno de esos LIG, en concreto, el de la antigua Cantera de La Zaida o de "*La Ceyda"* según antiguos escritos. El objetivo es la creación de un recurso de turismo científico que dinamice la actividad socioeconómica de Used y anime a conocer y conservar su patrimonio geológico.

DESCRIPCIÓN DE LAS FICHAS REALIZADAS

Se están realizando fichas descriptivas de varios elementos geológicos de interés diferentes; mina de hierro, manantiales, humedales, pozo surgente, cuevas, fósiles, geotermia y paleo-sismicidad reciente. Cada una de las fichas recoge elementos geológicos relativos a diferentes especialidades dentro de las Ciencias de la Tierra, tales como, yacimientos y recursos minerales, hidrogeología, hidrología, paleontología, geotermia y geodinámica interna.

Las fichas constan de un texto que se organiza en; localización y contexto geológico, descripción del LIG e interés socioeconómico. El texto no sobrepasa los 1.000 caracteres, está acompañado de imágenes y se presentará en un formato apaisado con una relación de aspecto de aproximadamente 16:9. El anexo 1 muestra una de las fichas realizadas, la de la cantera de la Zaida, para cuya elaboración se ha tenido en cuenta la información adicional que se describe en el siguiente apartado.

LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

La cantera de la Zaida, antiguamente denominada de "*La Ceyda*" se localiza en el término municipal de Used (41.0056806, -1.5874167). Geológicamente, la cantera se encuentra en la Cordillera Ibérica, en el límite entre las Ramas Castellana y Aragonesa, y en el interior de la depresión lacustre y endorreica de Gallocanta. Las rocas que componen la cantera son calizas dolomíticas ocres del Cretácico Superior (Cenomaniense) depositadas hace 94-100 millones de años en un ambiente marino cercano a la costa. El afloramiento en el paisaje da lugar a un relieve en cuesta inclinado hacia el oeste. La dirección media de los estratos en la cantera es N150E, paralela a la dirección de su frente, y están inclinados entre 13-16º O. Todos los usedanos conocen la cantera situada en la orilla de la laguna de la Zaida. Los más mayores todavía recuerdan alguna extracción de su piedra durante el siglo pasado. Pero la cantera de la Zaida no se reduce al frente de explotación más reciente y visible, sino que hay vestigios de su antigua explotación a lo largo de todo el cerro del Costado (Fig. 1).



FIGURA 1. *Laguna (seca y cultivable) y cantera de la Zaida en el cerro del costado.*

DESCRIPCIÓN DE LA CANTERA

El camino que sale de la comarcal A-2506 hacia Used, justo cuando la carretera roza la laguna de la Zaida, bordea todas las explotaciones. En su extremo más meridional hay un frente de 1 a 5 m de altura con 50 m de recorrido (Fig. 2), donde se aprecian perforaciones verticales de barrena mecánica y plumas de rotura por explosivos. Esta parte de la explotación es del S.XX probablemente para grava de carretera, aunque no puede descartarse la extracción de algunos sillares.

Las explotaciones de roca presentan un frente de aproximadamente 1.000 metros de longitud, paralelo al límite occidental de la laguna de la Zaida, y están formadas por estratos de calizas bien definidos de escala métrica. En estos frentes se observan algunos desbastes y huellas de cuñas (Fig. 3). Son escasos, probablemente porque los bloques se extraerían en su mayoría aprovechando la fisuración natural.



FIGURA 2. *Frente de cantera del siglo XX.*



FIGURA 3. *Desbastes y huella de cuña*

También existen perforaciones de barrenas manuales especialmente patentes en algunos bloques (Fig. 4A), así como bloques parcialmente escuadrados (Fig. 4B).

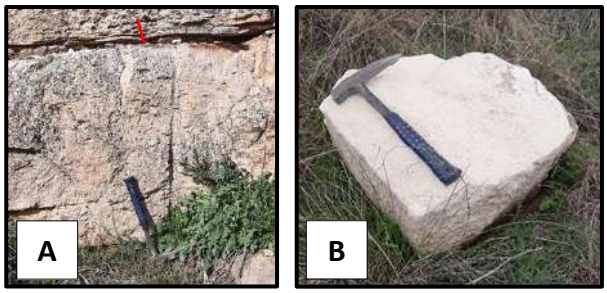


FIGURA 4. A-*Barrena manual,* B-*Bloque parcialmente descuadrado.*

La edad de esta explotación probablemente abarca del S.XV al S.XIX (deducido de los edificios donde se emplean los sillares de esta litología). Para encontrar datos más precisos sería necesaria una excavación arqueológica en los canchales junto a las frentes de cantera. Con esta actuación se podrían precisar los periodos históricos de mayor actividad extractiva, así como, el detalle de los métodos de extracción.

COMPOSICIÓN DE LA ROCA

La roca muestreada por nosotros es una dolomía calcárea (0% dolomita - 40% calcita) gris o amarilla con bioturbaciones de cangrejos y parches naranjas o rojos, con fósiles de bivalvos/ostreídos y gasterópodos, así como frecuentes geodas y estrías de falla. La dolomitización no afecta a los fósiles (Fig. 5).

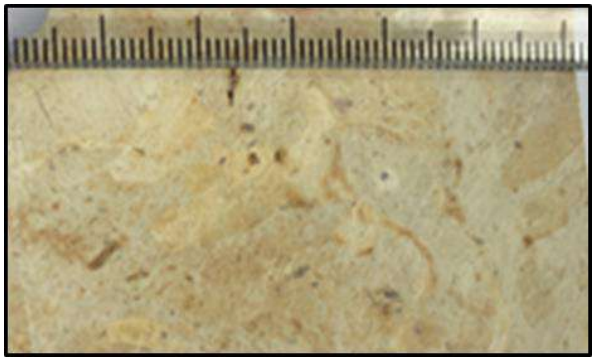


FIGURA 5. *Dolomía calcárea pulida de La Zaida.*

USO DE LA PIEDRA

Sabido es que la fachada de la Iglesia de Used (Fig. 6) fue construida con piedra de La Zaida, pero dicha cantera también debió abastecer a otros edificios singulares del pueblo como la Casa de la Mona o la Fuente vieja.

No obstante, la utilización de la piedra de esta cantera no se restringió únicamente a su municipio, si no que otras poblaciones más importantes y distantes como Daroca (a 25 km de La Zaida) se hicieron eco de su calidad y propiedades constructivas, utilizándola en sus edificios más emblemáticos.



FIGURA 6. *Fachada Iglesia de Used construida con piedra de Zaida.*

Así pues, el archivo de la Colegiata de Santa María de los Corporales de Daroca documenta como en 1586 se propone la construcción de la nueva iglesia aprovechando para su interior materiales del derribo de la vieja iglesia y en el exterior, piedra traída principalmente de "*La Ceyda*" en Used. Asimismo, también existe documentación de 1603 donde se condiciona la fábrica de la portada principal del templo al uso de piedra de "La Ceyda" (Fig. 7A).

Sin haber conseguido documentación al respecto, también se escuchan testimonios del uso de piedra de La Zaida en restauración de la muralla de Daroca e incluso en la construcción de algún Ministerio de Madrid sin descartar la hipótesis de que pudiera llegar a utilizarse en el Palacio Real, dada la condición de paso del Camino Real por Used. A nivel artístico la piedra de la Zaida también destaca por su calidad escultórica que artistas como José M. Fuertes han utilizado en su obra (Fig. 7B).



FIGURA 7. A-*Basílica de Santa María de los Sagrados Corporales. Colegiata de Daroca.* B-*Escultura José M. Fuertes (1982). Daroca.*

CONCLUSIONES

Este trabajo describe la iniciativa llevada a cabo en Used para poner en valor su geodiversidad y describir LIG en su término municipal. La iniciativa engloba la realización de fichas descriptivas que serán presentadas al público en formato digital.

REFERENCIAS

Simón, J.L., Simón, G. y Peiro, A. (2021). *El terremoto de Used de 1953: ciencia y memoria*. Departamento Ciencias de la Tierra. Universidad Zaragoza. 78 pp.

Lugares de Interés Geológico de Used

-Cantera de la Zaida-



La cantera de la Zaida se localiza al pie de la laguna del mismo nombre (1). Las rocas que la componen son calizas dolomíticas ocres del Cretácico Superior depositadas hace unos 100 millones de años en un ambiente marino cercano a la costa.

Con una longitud de 1 km, la ladera esta antropizada con frentes de extracción de 0,5 a 2 metros (2) de dolomías calcáreas con fósiles, geodas y estrías de falla (3). Se observan algunos desbastes y huellas de cuñas (4), perforaciones de barrenas manuales (5), así como numerosos bloques parcialmente escuadrados (6).











Piedra de la "Ceyda" fue utilizada en la iglesia de Used así como en la Colegiata de Daroca (1586) y su pórtico (1603). Más recientemente por el escultor José Miguel. Fuertes Gil (1982) (7).



Pep Gisbert, Ruth Soto y Jesús Causapé

Unidad Asociada en Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza – Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)

Geo-Temas 20, ISSN: 1576-5172 (versión impresa) 2792-2308 (versión digital)

Los informes de afectación a patrimonio geológico. Una herramienta de geoconservación preventiva en Cataluña.

Reports of impact on geological heritage. A preventive geoconservation tool in Catalonia.

A.I. de Paz[1], J. Piña [1], C. Puig[1] y E. Pujal[1]

1 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Parc de Montjuïc. 08038 Barcelona. ana.depaz@icgc.cat, jordi.pina@icgc.cat, carme.puig@icgc.cat, eulalia.pujal@icgc.cat

Resumen: El Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, en cumplimiento de sus funciones, emite informes en el procedimiento administrativo respecto a la afectación a elementos de interés geológico, entre otros temas. Tanto en la tramitación ambiental como en la urbanística el ICGC puede proponer medidas correctoras, compensatorias o alternativas. Por lo general, las propuestas son integradas e inciden directamente en la ejecución de los planes, programas o proyectos informados. De esta forma, los informes técnicos que el Instituto emite se convierten en una herramienta de geoconservación preventiva.

Palabras clave: Geoconservación preventiva, patrimonio geológico.

Abstract: *The Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, in compliance with its functions, issues reports in the administrative procedure regarding the impact on elements of geological interest, among other issues. Both in environmental and urban planning procedures, the ICGC can propose corrective, compensatory or alternative measures. In general, the proposals are integrated and have a direct impact on the execution of the plans, programs or projects reported. In this way, the technical reports issued by the Institute become a preventive geoconservation tool.*

Key words: *Preventive geoconservation, Geological heritage.*

MARCO LEGAL

La Ley 2/2014, de creación del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) y supresión del Institut Cartogràfic de Cataluña (ICC) y del Institut Geològic de Catalunya (IGC) se publicó en el Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya (DOGC), núm. 6551, el 30 de enero de 2014. Esta nueva institución entra en funcionamiento el 1 de febrero de 2014.

El ICGC asume las funciones y competencias de las dos instituciones precedentes. Dentro de las actividades y funciones que la Ley 19/2005, de 27 de diciembre, del Institut Geològic de Catalunya, le otorga en el artículo 3 cabe destacar las siguientes:

f) Elaborar los informes geológicos que soliciten otras administraciones o personas jurídicas para asuntos que afecten su territorio, su competencia o su interés.

j) Elaborar los informes preceptivos sobre el suelo y el subsuelo establecidos por la normativa vigente.

q) Elaborar, actualizar y mantener bases de datos de patrimonio geológico y paleontológico, en colaboración con los organismos competentes en la materia.

Así en el artículo 6 del Decreto 168/2009, de 3 de noviembre de despliegue parcial de la Ley 19/2005, indica que el IGC (ICGC en la actualidad) ha de emitir informe preceptivo en determinados procedimientos como en el proceso de aprobación de instrumentos de planificación, aprobación de proyectos de actuaciones específicas en suelo no urbanizable; estudios, estudios informativos o anteproyectos y proyectos en obras de túneles urbanos; autorización de nuevos cementerios y cualquier otro supuesto previsto en la normativa sectorial.

Por otra parte, en la legislación de urbanismo de Cataluña, en el artículo 52.1 del Decreto 64/2014 indica que en el procedimiento de aprobación de proyectos de actuación específica se ha de solicitar informe al ICGC sobre la eventual afectación a yacimientos paleontológicos o puntos geológicos de interés. Y en el artículo 75.1 del Decreto 305/2006, de 18 de julio, por el cual se aprueba el reglamento de la Ley de urbanismo, se indica que "El catálogo de bienes protegidos del plan de ordenación urbanística municipal determina los bienes inmuebles, singulares o de conjunto, que son objeto de protección por razón de sus valores arquitectónicos, arqueológicos, geológicos o, en general, culturales…"

Además, según las definiciones del artículo 5 de la Ley 9/2018, de 5 de diciembre, que modifica la Ley 21/2013 de evaluación ambiental, se consideran administraciones públicas afectadas "aquellas Administraciones Públicas que tienen competencias

específicas en las siguientes materias: población, salud humana, biodiversidad, geodiversidad, fauna, flora, suelo, subsuelo, agua, aire, ruido, factores climáticos, paisaje, bienes materiales, patrimonio cultural, ordenación del territorio y urbanismo." El ICGC cumple esa condición, y, por lo tanto, como administración pública afectada ha de ser consultada en los procesos de evaluación ambiental.

INFORMES DEL ICGC EN PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO

A parte de informar sobre afectación a patrimonio geológico o a elementos de interés geológico, también se informa sobre exposición a riesgos geológicos, afectación hidrogeológica del emplazamiento de nuevos cementerios o ampliación de existentes.

La afectación a patrimonio geológico o a puntos de interés geológico debe realizarse respecto a información oficial o proporcionada por los organismos oficiales. En este sentido, pronto se identificó la necesidad de disponer de una información más homogénea y actualizada tanto en contenido como en metodología. Por ello, inicialmente de forma natural, se empezó la colaboración con el Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda rural (que tiene las competencias) con el objetivo de mejorar y actualizar el contenido del Inventario de Espacios de Interés geológico de Cataluña (IEIGC). En la actualidad esa colaboración es oficial desde 2022 mediante una adenda anual que complementa el Contrato programa que el ICGC tiene con la Generalitat de Catalunya.

Desde que en 2005 el Instituto empezó a emitir informes en cumplimiento de la legislación urbanística, ambiental y sectorial, hasta 2023 se han emitido más de 14.000 informes (Figura 1)

Por el momento menos del 6% de los informes corresponden a actividades que se desarrollan dentro de espacios del IEIGC. Y de éstos, en muchas ocasiones, son actividades compatibles o que no tienen ninguna afección. Con la revisión, actualización y ampliación del inventario que estamos realizando, es previsible que este porcentaje aumente.

Aunque los informes no son vinculantes se advierte una aceptación del contenido que, en general, es incorporado al proyecto. Por lo tanto, el informe tiene incidencia en el proyecto y nos permite proponer medidas y actuaciones correctoras que inciden en la ejecución del proyecto e incluso en la modificación de éste; ya sea para evitar afectación a los elementos geológicos como para proponer medidas compensatorias o mejoras que potencien los valores geológicos de la zona.

Un ejemplo de medidas y resultados de la intervención propuesta por el ICGC es el acondicionamiento realizado en la carretera B-1200, a petición del ayuntamiento de Olesa de Montserrat. En el desvío de la carretera a la urbanización Ribes Blaves se acondicionó una zona de parada con buena capacidad y instalación de paneles explicativos de la formación de la harina de falla de Ribes Blaves que es uno de los espacios de interés geológico de Catalunya.

Por lo general, las propuestas a proyectos hacen referencia a establecer un seguimiento ambiental por parte de técnicos especialistas en geología, a la preservación y mejora de taludes para la observación de estructuras o depósitos, al acondicionamiento de accesos a los afloramientos, o a la restricción o cambio de emplazamiento de repoblaciones o instalaciones.

Así, los informes del ICGC se convierten en una herramienta de geoconservación preventiva. Entendiendo ésta, como el conjunto de acciones que favorecen la conservación de elementos geológicos de interés, en fase proyecto, y que inciden en su potenciación y puesta en valor.

En algunos informes de evaluación de proyectos de restauración de actividades extractivas se están



	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
URB	376	523	839	1045	950	779	777	598	543	558	656	741	630	628	587	580	726	784	773
TAM								12	10	22	100	153	174	227	262	184	261	263	342
Total	376	523	839	1045	950	779	777	610	553	580	756	894	804	855	849	764	987	1047	1115

FIGURA 1. *Evolución temporal (2005-2023) del número de informes emitidos dentro de los procedimientos de tramitación ambiental (TAM) y de tramitación urbanística (URB).*

proponiendo acciones de restauración en clave "geológica", independientemente de que coincida con algún espacio del inventario. El objetivo de estas acciones (recogiendo la resolución 88 de la UICN WCC-2020-Res-088-ES) es el de propiciar afloramientos estables y de calidad, y que también se ponga en evidencia la dependencia de la sociedad de los recursos naturales.
Más información disponible en la web del ICGC:

https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Planeamiento-del-territorio-y-urbanismo/Suport-tecnic-a-la-legalitat/Informes-geologics-emesos-per-l-ICGC-en-el-procediment-administratiu

https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Planeamiento-del-territorio-y-urbanismo/Suport-tecnic-a-la-legalitat/Patrimoni-geologic/Geoconservacio-preventiva

REFERENCIAS

WCC-2020-Res-088-ES (2020) Conservación de la diversidad natural y el patrimonio natural en entornos mineros. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2020_RES_088_ES.pdf

Avances en la actualización del Inventario de Espacios de Interés Geológico de Cataluña (IEIGC), noreste de España.

Progress in updating the Inventory of geosites of Catalonia (IEIGC), northeast Spain.

A.I. de Paz[1], C. Puig[1], N. Herrero[2] y P. Casanovas[2]

1 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Parc de Montjuïc. 08038 Barcelona. ana.depaz@icgc.cat; carme.puig@icgc.cat
2 Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural. Provença, 204-208. 08036 Barcelona. nherrero@gencat.cat; pilar.casanovas@gencat.cat

Resumen: El Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya y el Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda rural continúan su colaboración, iniciada formalmente en 2022, con el objetivo de actualizar el Inventario de Espacios de Interés Geológico de Catalunya. Se presentan los resultados, dinámicas de trabajo y proyectos futuros a corto plazo.

Palabras clave: Patrimonio geológico, inventario, SIG, Cataluña (España).

Abstract: *The Cartographic and Geological Institute of Catalonia and the Department of Climate Action, Food and Rural Agenda continue their collaboration, that formally began in 2022, with the aim of updating the Inventory of geosites of Catalonia. The results, work dynamics and short-term future projects are presented.*

Key words: *Geological heritage, inventory, SIG, Catalonia (Spain).*

ANTECEDENTES

La colaboración entre el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) y el Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda rural (DACAAR) se inició, entre otras razones, debido a la necesidad del primero de disponer de una información suficientemente robusta y oficial con la que poder informar en cumplimiento de sus funciones sobre afectación a elementos de interés geológico (de Paz et al., 2022).

La Generalitat de Catalunya mediante La Ley 16/2005, de 27 de diciembre, de la información geográfica y del Instituto Cartográfico de Cataluña, establece que "El Plan Cartográfico de Cataluña es el instrumento básico de la planificación cartográfica y de la información geográfica relacionada de la Generalitat, y tiene por objeto la determinación de los objetivos y la coordinación de las actividades cartográficas, la constitución y la mejora permanente de la infraestructura de información geográfica de Cataluña y el aprovechamiento y la coordinación de esta información con las políticas públicas sectoriales y con proyección territorial".

El Inventario de Espacios de Interés Geológico (IEIG) es uno de los conjuntos de información incluidos en el Plan Cartográfico de Cataluña (PCC) aprobado en el Decreto 53/2022, de 22 de marzo. Actualmente forma parte del tema "Lugares Protegidos" que, según la clasificación INSPIRE, corresponde a "Zonas designadas o gestionadas dentro de un marco legislativo internacional, comunitario o propio de los estados miembros para la consecución de unos objetivos de conservación específicos".

La oficialización de un conjunto de información la convierte en información de referencia y de uso obligatorio para cualquier gestión de la administración.

OFICIALIZACIÓN DE CONJUNTOS DE INFORMACIÓN

El inventario de Espacios de Interés Geológico de Cataluña fue elaborado entre los años 1999 y 2000. Desde 2003 los datos que contiene son públicos (Herrero et al. 2003) pero hasta 2020 éste no adquirió la condición de inventario oficial.

El procedimiento de oficialización de un conjunto de información se recoge en la Ley 16/2005 e implica superar los siguientes pasos:

- Elaboración de especificaciones técnicas que describan los datos.
- Aprobación de las especificaciones técnicas por parte de la Comisión de coordinación cartográfica de Catalunya (C4).
- Elaboración de un informe de control de calidad que certifique que los datos se ajustan a las especificaciones aprobadas.
- Inscripción en el Registro Cartográfico de Catalunya.

La primera versión, tanto de datos como de especificaciones (2020) incluyó, por una parte, un ajuste

de las delimitaciones de los espacios inventariados a algún elemento cartográfico identificable ya fuera de naturaleza geológica (según bases geológicas disponibles), antrópica (p.ej. carreteras y caminos), hidrográfica (p.ej. ríos y torrentes) o topográfica (p.ej. crestas o fondos de valle) y, por otra parte, la estandarización y homogeneización de atributos y diccionarios.

En 2022 se adoptó una nueva versión de datos que incluyó dos capas complementarias:

- La capa "Espacios de interés geológico". Corresponde a las geometrías del inventario de la primera versión (procedentes de los datos originales) a los que se han añadido atributos que recogen la información de la diagnosis realizada en 2021 y atributos definidos en la Ley de Patrimonio Natural y Biodiversidad (Ley 42/2007, Ley 33/2015 y Real Decreto 556/2011).

- La capa "Otros espacios de interés geológico pendientes de valoración". Comprende las geometrías (punto o polígono según precisión de localización) de elementos que forman parte de los inventarios de parques naturales, de otros espacios naturales protegidos gestionados por la Generalitat de Catalunya y de los dos Geoparques UNESCO (Geoparc Catalunya Central y Geoparc Origens).

GRUPO DE GEOCONSERVACIÓN

En 2021 se formalizó el denominado "Grupo de Geoconservación", grupo compuesto por personal técnico de parques, de otros espacios protegidos y del ICGC, con el objetivo de compartir necesidades y promover la puesta en valor de los aspectos geológicos de estos espacios.

Resultado del trabajo de este Grupo de Geoconservación ha sido la aportación de inventarios y documentos que han alimentado la capa correspondiente del inventario y puesto en evidencia una disparidad de situación entre los Espacios Protegidos catalanes. En situación óptima, están los espacios que han recogido los elementos geológicos en sus planes o proyectos de protección y en una situación a mejorar están los que carecen de información geológica.

La necesidad de equiparar el nivel de conocimiento y de reconocimiento de los valores geológicos en todos los Espacios Protegidos es uno de los objetivos de la colaboración entre las instituciones y en particular del Grupo de Geoconservación.

Para fomentar estos aspectos, en 2023, se han acordado las especificaciones de contenido y de formato para la elaboración de mapas geo-turísticos de todos los espacios protegidos con represetación en el Grupo de Geoconservación.

Los mapas incluirán los elementos geológicos significativos del espacio protegido y para ello, en algunos casos, se identificarán e inventariarán los elementos geológicos existentes. Estos elementos también se incluirán en el IEIG oficial.

REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO

El objetivo de actualización del IEIG es su mejora y ampliación. En este sentido se han elaborado unas especificaciones que pretenden unificar la metodología y los criterios de captura y documentación de los elementos objeto de trabajo.

El resultado de la aplicación de estas especificaciones da lugar a un conjunto de seis capas cartográficas atributos asociados y atributos relacionales de identificación, una caracterización geológica, una valoración del interés y una diagnosis. Todas ellas están integradas en un entorno SIG para su consulta y explotación.

Así la información se recoge en las siguientes seis capas cartográficas:

- Elemento geológico de interés. Aquel objeto geológico significativo que ilustra el relato de la historia geológica de Cataluña. La condición de significativo puede provenir de su relevancia científica o por la facilidad de observar y estudiar algún aspecto relacionado con sus características geológicas (litológicas, estructurales, procesos…). El criterio de delimitación (geológico, topográfico…) del elemento geológico está asociado a cada uno de los segmentos. Este criterio aporta robustez o debilidad a la delimitación.

- Ámbito de expectativas. Área que engloba el elemento geológico donde se podría dar el caso de nuevos yacimientos o de nuevos afloramientos de calidad en caso de una actuación sobre el territorio.

- Delimitación de afloramientos singulares dentro del elemento geológico. Pueden ser localizaciones muy concretas.

- Localización de puntos de observación óptima del elemento geológico.

- Localización de fotografías.

- Delimitación de áreas degradadas.

PROYECTOS FUTUROS A CORTO PLAZO

A finales de 2024 se tiene previsto haber completado los siguientes objetivos:

- La revisión de todos los espacios procedentes del inventario original y la información de más de la mitad de los parques y espacios naturales protegidos que participan en el Grupo de Geoconservación en la actualidad.

- La publicación de algunos de los mapas geoturísticos de los parques.

- La disponibilidad de una aplicación de consulta online y offline del inventario oficial sobre las bases cartográficas y geológicas del ICGC.

Se pretende, además, continuar la colaboración entre las dos instituciones según una planificación que se establece anualmente.

REFERENCIAS

DECRETO 53/2022, de 22 de marzo, por el que se aprueba la revisión del Plan cartográfico de Catalunya. https://dogc.gencat.cat/es/document-del-dogc/index.html?documentId=923653 (consultado 13/02/2024)

de Paz, A.I., Puig, C. y Herrero, N. (2022). Repositorio de datos para la actualización del Inventario de Espacios de Interés geológico de Cataluña (IEIGC), noroeste de España. *Geotemas* vol. 19 33-36.

Ley 42/2007, de 23 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-21490-consolidado.pdf (consultado 13/02/2024)

Ley 16/2005, de 27 de diciembre, de la información geográfica y del Institut Cartogràfic de Catalunya. https://portaljuridic.gencat.cat/ca/document-del-pjur/?documentId=440028

Herrero, N., Carreras, J. y Druguet, E. (2003). Inventario de espacios de interés Geológico de Catalunya 2. Base de datos y perspectivas de desarrollo. *VI Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico. Salardú (Vall d'Aran)*. Comunicaciones, 14-15.

Protección del patrimonio geológico urbano a través de normativa de jardinería: el nuevo Plan Director de Arbolado de la ciudad de Segovia

Protection of urban geoheritage through gardening regulations: the new Tree Master Plan for the city of Segovia (Spain)

A. Díez-Herrero[1], J. Vegas[1], A. Díez[2], y N. Sacristán[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. andres.diez@igme.es | j.vegas@igme.es
2 Programa municipal de educación ambiental 'Segovia Educa en Verde'. Talher, Avda. de Manoteras 46 bis, primera planta, 28050 Madrid. adiez@talher.com
3 Asociación Geología de Segovia (GSg). nuriasacistanarroyo@gmail.com

Resumen: La ciudad de Segovia cuenta con un nuevo "Plan Director del Arbolado del Paisaje Pintoresco y del Casco Urbano de la Ciudad de Segovia", aprobado en 2023, que viene a actualizar y completar el anterior plan de 1998. Gracias a la intervención de la asociación 'Geología de Segovia' en el proceso de participación pública se han incorporado recomendaciones y regulación expresa para la conservación y protección del patrimonio geológico de las zonas urbanas y periurbanas. Actuaciones que se concretan en las Directrices de Gestión en acciones como: vigilancia del arbolado con relación a elementos geológicos singulares; control del ailanto y la hiedra puntualmente donde puede afectar al patrimonio geológico; y una mayor intensidad de mantenimiento, encaminada a resaltar elementos geológicos singulares en algunos enclaves puntuales. De esta manera, la normativa sectorial de parques y jardines viene a completar la protección que el patrimonio geológico de la ciudad de Segovia ya tenía en la ordenación territorial y urbana.

Palabras clave: patrimonio geológico urbano, geoconservación, normativa, plan de arbolado, Segovia.

***Abstract**: The city of Segovia (Spain) has a new 'Master Tree Plan for the Picturesque Landscape and the Urban Area of the City of Segovia', approved in 2023, which updates and completes the previous plan dated in 1998. Thanks to the suggestions of the association 'Geology of Segovia' made during the public participation process, recommendations and specific regulations for the conservation and protection of the geological heritage of urban and peri-urban areas have been incorporated to the abovementioned planning document. Actions that are specified in the Management Guidelines in actions such as: monitoring of trees in relation to geosites; control of Ailanthus and ivy where it can affect geoheritage; and a greater intensity of maintenance, aimed at highlighting singular geological features in some specific enclaves. In this way, the sectorial regulation of urban parks and gardens completes the protection that the geological heritage of the city of Segovia already had through the territorial and urban planning.*

***Key words:** urban geoheritage, geoconservation, regulations, tree master plan, Segovia-Spain.*

INTRODUCCIÓN

La protección del patrimonio geológico a través de acciones normativas tradicionalmente se ha asociado a determinada legislación sectorial, entre la que destaca la dedicada a: i) patrimonio natural y biodiversidad (ley estatal y leyes y decretos autonómicos), espacios naturales protegidos (desde leyes y decretos para la red de parques nacionales, a leyes y decretos relativos a Planes de Ordenación de Recursos Naturales (PORN) o Planes Rectores de Uso y Gestión (PRUG) de parques naturales, reservas de la biosfera, monumentos naturales o paisajes protegidos, entre otros); ii) patrimonio cultural (leyes y decretos relativos a Bienes de Interés Cultural –BIC– y otras figuras en algunas comunidades autónomas para yacimientos paleontológicos o patrimonio mueble); y iii) ordenación territorial y urbanística (desde directrices de ordenación territorial –DOT– , planes territoriales parciales – PTP– o sectoriales –PTS–) a escala autonómica, a planes generales de ordenación urbana –PGOU– o planes especiales –PE– de ámbito municipal). Pero pocas veces se ha utilizado otra normativa sectorial de otros ámbitos, como la de jardinería y los parques urbanos para lograr una adecuada protección, conservación y gestión del patrimonio geológico, mediante las labores cotidianas de los operarios públicos y de las personas propietarias de parcelas privadas.

En este trabajo se presenta el proceso técnico llevado a cabo para la inclusión de recomendaciones y restricciones para la gestión del patrimonio geológico urbano y periurbano en una normativa de parques y jardines de un municipio: el "Plan Director del Arbolado del Paisaje Pintoresco y del Casco Urbano de la Ciudad de Segovia".

EL PATRIMONIO GEOLÓGICO DE SEGOVIA

El patrimonio geológico de la ciudad de Segovia y su entorno (área periurbana) ha sido ampliamente tratado en la literatura científico-técnica a lo largo de las últimas tres décadas (1989-actualidad; ver síntesis en Vegas y Díez, 2018 y 2021; y en las referencias citadas en ellos).

Desde el punto de vista de la catalogación de lugares de interés geológico, se dispone de inventarios desde los iniciales de ámbito provincial (Díez, 1991; Vegas y Díez, 1999; Vegas, 2000) a los catálogos detallados del casco urbano de la ciudad de Segovia (Díez y Martín Duque, 2001; Díez y Vegas, 2011 y 2018). En la actualidad están inventariados y descritos un total de 117 LIG, en su mayoría de entidad local o municipal, algunos de ámbito comarcal y provincial, pero ninguno de interés nacional.

La protección normativa para la geoconservación del patrimonio geológico catalogado en la ciudad de Segovia se ha basado, hasta el momento, en la inclusión de los inventarios y de limitaciones de uso en las DOT de Segovia y su Entorno (DOTSE, 2005; De las Rivas, 2006) y del PGOU de Segovia (Díez y Martín Duque, 2001) y sus sucesivas revisiones y actualizaciones (2007).

En cuanto a las actividades de divulgación y el aprovechamiento científico, didáctico y turístico, se han llevado a cabo diferentes actuaciones: publicaciones divulgativas (Díez y Vegas, 2011; Vegas y Díez 2018, 2019 y 2021); organización de congresos científicos patrimoniales (X RN CPG-SGE, 2013; ProGEO, 2021); excursiones divulgativas (Geolodía 2010 y 2014; Hidrogeodía, 2018; A todo riesgo, 2007-2023); rutas geoturísticas oficiales (Turismo de Segovia); aplicaciones en realidad aumentada para geoturismo (2013); actividades (visitas, talleres y actos) de educación ambiental con patrimonio geológico (Segovia Educa en Verde, 2017-actualidad); iniciativa ELIGES en diez Entornos con Lugares de Interés Geológico (LIG) para la Educación ambiental y el geoturismo en Segovia (libro, folletos y página web; 2018-2019).

ELABORACIÓN DEL NUEVO PLAN DIRECTOR DE ARBOLADO DE LA CIUDAD DE SEGOVIA

En la ciudad de Segovia el patrimonio natural y el histórico-artístico se funden, conformando un excepcional paisaje natural-cultural, modelado a partir de la integración entre la actividad humana y el medio. En 1947 se declara en el BOE el "Paraje Pintoresco del conjunto de arbolado y alamedas de la ciudad de Segovia"; y en 1985 la Ciudad Vieja y Acueducto de Segovia son incluidos en la lista de "Patrimonio Mundial de la Humanidad" por la UNESCO. Un hito importante para la infraestructura verde de la ciudad fue la redacción en 1998 del "Plan de Gestión Integral del Arbolado y de la Malla Verde de la Ciudad de Segovia", documento pionero, referente nacional en el desarrollo de posteriores planes directores y de gestión de arbolado en otras ciudades españolas (Ayuntamiento de Segovia, 2023).

A finales del año 2022, la Concejalía de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Segovia consideró oportuno actualizar y desarrollar un nuevo plan de arbolado, que permitiera a los técnicos municipales planificar sus actividades de gestión y manejo de este importante elemento en el ámbito urbano y periurbano. Dentro de las diferentes fases que se acometieron para la elaboración del citado Plan, se encontraba la realización del análisis de la situación actual del arbolado, desarrollado por la empresa TECNIGRAL S.A.

Antes de continuar con el desarrollo del proyecto, les resultó de gran interés contar con la opinión de las asociaciones, colectivos, profesionales y gestores vinculados con el medio ambiente de la ciudad, y su arbolado en particular. El objetivo era enriquecer el análisis con diversos puntos de vista y orientar las propuestas de gestión y acciones a incluir en el Plan Director. Para ello se contrataron los servicios de una empresa asesora (Dynamyca Sostenible), e iniciaron un proceso participativo para posibilitar a los colectivos ciudadanos (asociaciones, entidades privadas y públicas) y personas interesadas, intervenir en el proceso de redacción, aportando sus sugerencias y recomendaciones. Este proceso constó de dos encuentros, uno en los primeros momentos de la fase de análisis y diagnóstico de la situación actual, donde los asistentes expusieron sus ideas sobre distintos aspectos del arbolado y su gestión, mediante una dinámica participativa, y otro, en la fase final del proceso de redacción, en el que el equipo redactor expuso las conclusiones del diagnóstico y las metas, estrategias y líneas de acción para debatirlas con los asistentes.

La asociación Geología de Segovia, entidad sin ánimo de lucro creada en diciembre de 2011 y que en la actualidad cuenta con 183 socios, fue invitada desde el inicio del proceso participativo a través de convocatoria por correo electrónico. Conscientes de que, a pesar de disponer de normativa comarcal (DOTSE) y municipal (PGOU) para la protección del patrimonio geológico ante grandes proyectos o desarrollos urbanos, son las actuaciones cotidianas de la gestión de espacios ajardinados las que pueden deteriorar los LIG (Fig. 1), desde la Junta Directiva de la asociación se aceptó la invitación a participar.

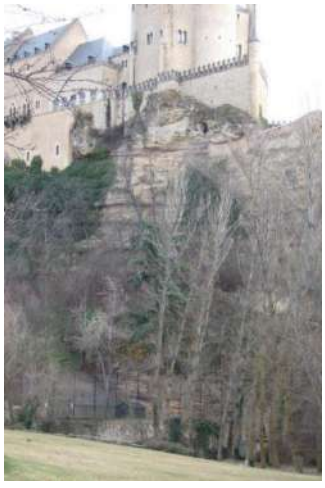


FIGURA 1. *Deterioro de las condiciones de observación, por ocultamiento progresivo en las últimas décadas debido al crecimiento*

de la vegetación arbórea y arbustiva, del afloramiento de la columna estratigráfica de la sucesión de rocas carbonáticas del Cretácico Superior bajo el Alcázar de Segovia, catalogado como LIG en las DOTSE y el PGOU de Segovia.

A las reuniones que fueron convocadas entre diciembre de 2022 y febrero 2023 asistió siempre un representante de la asociación (Presidente), aportando ideas y sugerencias en relación con: el patrimonio geológico en zonas con arbolado urbano; la hidrogeología y los recursos hídricos en relación con el arbolado; y con la situación de procesos activos, los riesgos geológicos y sus vínculos con la gestión del arbolado. Con posterioridad a estas reuniones, muchas de estas aportaciones además se entregaron por escrito a la empresa encargada, para su posible inclusión en informe del proceso participativo; en el que se incluyó el texto íntegro dentro del anexo de las aportaciones realizadas por escrito (páginas 18 y 19).

PROPUESTAS Y CONSIDERACIONES DE 'GEOLOGÍA DE SEGOVIA' AL PLAN DIRECTOR DE ARBOLADO DE SEGOVIA

Desde el punto de vista de la relación del arbolado de la ciudad de Segovia y su gestión con la gea de la ciudad y su entorno, desde la asociación Geología de Segovia se hicieron consideraciones sobre aspectos positivos y negativos que, una inadecuada gestión del arbolado urbano y periurbano podría tener para la gea y la dinámica geológica e hidrogeológica natural.

Gestión de arbolado y conservación y uso del patrimonio geológico y de la geodiversidad urbana

- Evitar que las nuevas plantaciones de arbolado o el crecimiento, podas, talas o gestión del existente, conlleven la cubrición, ocultación o deterioro por meteorización física, química o biológica del más de un centenar de LIG de la ciudad de Segovia y su entorno. Cabe recordar que muchos de los LIG de Segovia están protegidos por las DOT de Segovia y su entorno (DOTSE, 2005) como Lugar de Interés Natural (LIN) y no pueden ser deteriorados o modificados si no es para potenciar su valor; y delimitados y protegidos como suelo rústico con especial protección ambiental en la revisión del PGOU de Segovia (PGOU, 2008). Además, existen inventarios municipales de estos LIG (PGOU, 2005; De roca a roca, 2011; ELIGES, 2018-2019) y guías de buenas prácticas para su gestión, publicadas por el propio Ayuntamiento, que deberían ser tenidas en cuenta.
- Fomentar y proteger la presencia de afloramientos rocosos entre el arbolado, matorral y césped de los espacios ajardinados y periurbanos de la ciudad, como elemento de diversidad natural, cortafuegos naturales, hábitats de especies y elementos para la reducción del consumo de agua de riego. En esta línea, hace más de una década se entregó al Ayuntamiento un manifiesto titulado "Rocas en la ciudad", avalado con más de un centenar de firmas de prestigiosos naturalistas, ecólogos, paisajistas y profesorado universitario.

Gestión de arbolado, procesos naturales y eventos geológicos

- Adecuar el arbolado (tipología, densidades, etc.) a los procesos naturales geológicos que tienen lugar en cada espacio urbano y periurbano (fluviales, gravitacionales, subsuperficiales), para que no interfieran con los mismos acelerando sus tasas (erosión de suelos) o frecuencias de eventos extremos (desprendimientos, deslizamientos, colapsos de sufusión, avenidas torrenciales, etc. por efecto de sus sistemas radiculares, porte o caída de fustes, concentración de humedad por sombras o cepellón, etc.
- Vigilar las actividades de gestión del arbolado que puedan producir alteraciones edáficas en los suelos, como compactación por circulación de maquinaria de actuaciones forestales, inversión de perfiles edáficos o niveles del suelo en procesos de plantación, o erosión por arroyada.
- Preservar ejemplares arbóreos que contienen información dendrogeomorfológica (evidencias externas o internas en la secuencia de anillos) de eventos geológicos pretéritos (desprendimientos, deslizamientos, avenidas torrenciales) útiles para el estudio de la frecuencia y magnitud de estos eventos en el pasado y la incidencia del cambio climático en el entorno de la ciudad. Estos ejemplares, frecuentemente con portes anómalos y formas y fustes irregulares, suelen ser objeto de talas, clareos o podas, perdiendo esta valiosa información científica.

Gestión de arbolado y aguas subterráneas

- Adecuar el arbolado (tipología, densidades, portes...) a la disponibilidad y circulación de agua subterránea subsuperficial (zona vadosa o no saturada) o freática de cada elemento fisiográfico del espacio periurbano de Segovia (lastras, laderas, llanuras aluviales, piedemonte cristalino, etc.), evitando que se produzcan consumos excesivos y efecto de descenso del nivel freático con la desecación de manantiales y zonas de descarga; o, al contrario, concentraciones anómalas de humedad subsuperficial que pueden producir marras o enfermedades en el arbolado.
- Utilizar arbolado adecuado como elemento de drenaje por evapotranspiración de zonas con problemas de encharcamiento no natural, como lenguas y pies de deslizamientos rotacionales que hayan sido desencadenados por actividades antrópicas.

EL PATRIMONIO GEOLÓGICO EN EL NUEVO PLAN DE ARBOLADO DE LA CIUDAD DE SEGOVIA

Tras su redacción final, su presentación pública preliminar y su aprobación por el Pleno del Ayuntamiento de Segovia, el nuevo Plan de arbolado se encuentra vigente y será empleado por los técnicos municipales durante, al menos, la próxima década. En el nuevo Plan de Arbolado se han incluido, de forma destacada, las aportaciones de la asociación Geología de Segovia en varios documentos de la Memoria (Ayuntamiento de Segovia, 2023):

- Apartado General: LIG (página 8) interacción del arbolado con elementos geológicos y arqueológicos (positivos y negativos; páginas 10 y 11);

interacciones del arbolado con el paisaje (positivas y negativas; páginas 20 y 21).
- Análisis y diagnóstico: problemas y conflictos del arbolado con otros elementos (4 citas con LIG).
- Nuevo modelo de arbolado. Propuestas de gestión: estrategias y líneas de actuación en LIG.

Destacar entre los aspectos normativos contenidos en el Plan que contribuirán a la protección del patrimonio geológico, los comprendidos en la Estrategia 7 "Integrar el arbolado en el paisaje cultural", dentro de la Línea de actuación "Compatibilizar el arbolado con el patrimonio geológico", que reza:

"La ciudad de Segovia y su entorno cuenta con más de un centenar de LIG, muchos de ellos protegidos por las DOTSE como LIN y no pueden ser deteriorados o modificados si no es para potenciar su valor, y están delimitados y protegidos como suelo rústico con especial protección ambiental en la revisión del PGOU de Segovia. Por tanto, la gestión del arbolado debe cumplir lo estipulado en la normativa citada y en las guías de buenas prácticas para la gestión de estos LIG publicadas por el Ayuntamiento de Segovia. Se evitará que las nuevas plantaciones o su crecimiento, las podas y talas los cubran, oculten o conlleven su deterioro por meteorización física, química o biológica."

Actuaciones que se concretan en las Directrices de Gestión en acciones como:
- Control del ailanto (*Ailanthus altissima*), con especial atención al acceso a elementos de interés geológico.
- Vigilancia del arbolado en relación a elementos geológicos y arqueológicos singulares, con intervención sobre el arbolado en el caso de que pudieran generar daños.
- Se hace necesario el control puntual de la hiedra en elementos antrópicos o de interés geológico que puedan verse dañados.
- En algunos enclaves puntuales puede haber una mayor intensidad de mantenimiento, encaminada a resaltar elementos singulares (árboles notables, lugares de interés geológico, elementos arquitectónicos, etc.).

CONCLUSIÓN

La ciudad de Segovia cuenta, además de con la legislación de ordenación del territorio y urbanística, con una nueva herramienta normativa para la protección del patrimonio geológico urbano: el Plan Director del Arbolado del Paisaje Pintoresco y del Casco Urbano de la Ciudad de Segovia. La intervención de la asociación Geología de Segovia, en procesos de participación pública de normativas sectoriales permite la inclusión de aspectos de geo-conservación y potenciación del patrimonio geológico que garantizan la protección de los LIG frente a actuaciones cotidianas de los servicios de parques y jardines y de particulares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración a: la asociación Geología de Segovia, de la que son miembros; el programa municipal de educación ambiental 'Segovia Educa en Verde' (Sara González y Andrea Miguel); la Concejalía de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Segovia por la invitación a participar en el proceso; la empresa TECNIGRAL S.A. (Moisés Cecilia), encargada de la elaboración del Plan de Arbolado de la Ciudad de Segovia; la empresa y técnicos responsables del proceso de participación pública (Dynamyca Sostenible); y los técnicos municipales de parques y jardines, en especial a Felipe Arroyo, Vicente Alonso y María Gris.

REFERENCIAS

Ayuntamiento de Segovia (2023). *Plan Director del Arbolado del Paraje Pintoresco y del Casco Urbano de la Ciudad de Segovia.* Memoria (3 vols.), Propuestas (3 vols.), Informes (2 vols.) y Directrices (2 vols.), Excmo. Ayuntamiento de Segovia, Segovia.

De las Rivas, J.L. (Dtor.) (2006). DOTSE. *Directrices de Ordenación de Ámbito Subregional de Segovia y Entorno*. Consejería de Fomento, Junta de Castilla y León, Salamanca, 91 pp + Planos de Ordenación formato DIN A-3.

Díez Herrero, A. y Martín Duque, J.F. (2001). *El patrimonio geológico e hidrológico en el término municipal de Segovia. Revisión del P.G.O.U. de Segovia*. Informe inédito para Melissa Consultores y Ayuntamiento de Segovia, Madrid.

Díez Herrero, A. y Vegas, J. (2011). *De roca a roca. Descubre el patrimonio geológico de la ciudad de Segovia*. Concejalía de Turismo, Ayuntamiento de Segovia, Segovia, 95 pp.

Vegas, J. y Díez-Herrero, A. (2018). *Manual de buenas prácticas para el uso del Patrimonio Geológico en la ciudad de Segovia: un modelo sostenible para la sensibilización medioambiental y el geoturismo urbano. Best practice guidelines for the use of the geoheritage in the city of Segovia. A sustainable model for environmental awareness and urban geotourism*. Ayuntamiento de Segovia, Segovia, 120 pp.

Vegas, J. y Díez-Herrero, A. (2021). An Assessment Method for Urban Geoheritage as a Model for Environmental Awareness and Geotourism (Segovia, Spain). *Geoheritage*, 13:27, 17 pp. https://doi.org/10.1007/s12371-021-00548-w

Propuesta de un Lugar de Interés Geológico: Peña Beneita, un olistolito de cuarcita tipo armoricano con icnitas (Ordovícico Inferior) dentro de un depósito sinorogénico varisco de bloques-en-matriz (Carbonífero inferior).

A Geological Site proposal: Peña Beneita, an Armorican-type quartzite olistolith displaying icnites (Lower Ordovician) inside a synorogenic Variscan block-in-matrix formation (lower Carboniferous).

J.M. Domínguez Fernández[1], E. González Clavijo[2] y E.J. González Clavijo[3]

1 Sociedad Geológica de España, Circunvalación 18, 45223. Seseña. Toledo. jmd_fernandez@yahoo.es
2 CN-IGME-CSIC, Unidad de Salamanca. Plaza de la Constitución, 1. 37001. Salamanca. e.clavijo@igme.es
3 Sociedad Geológica de España, Peña Trevinca 34, 4 B, 32005. Ourense. egclavijo@gmail.com

Resumen: En una unidad de bloques-en-matriz de edad Carbonífero inferior, situada en el núcleo del sinforme tardi-varisco de Alcañices (Zona Galicia Tras-os-Montes), se ha identificado un gran bloque deslizado de cuarcita blanca de tipo armoricano, con abundantes pistas fósiles compatibles con el Ordovícico Inferior. Sus buenas condiciones de exposición, su valor científico como evidencia de la naturaleza olistostrómica de la unidad en la que se dispone y su fácil accesibilidad, nos llevan a proponerlo como Lugar de Interés Geológico (LIG). La proximidad de otros 2 LIG (CIs013: Batolito granítico de San Martín del Pedroso, y CI045: meta-riolitas de Nuez) y las cercanas cuarcitas tipo armoricano de la Sierra de la Culebra, posible origen de este olistolito, aumenta su valor divulgativo y didáctico al poderse visitar todos ellos conjuntamente. El roquedo es conocido desde antiguo, pero sus icnitas venían siendo consideradas arte esquemático rupestre; estas conclusiones geológicas son un ejemplo de la evolución del conocimiento e incrementan el valor del lugar.

Palabras clave: Olistolito, icnofósiles, Carbonífero, Zona Galicia Tras-os-Montes, patrimonio geológico.

Abstract: *In a lower Carboniferous block-in-matrix unit, placed at the core of the late-Variscan Alcañices sinform (Galicia Tras-os-Montes Zone), a big glided rock-block was identified; it is made of Armorican-type white quartzite and displays a good deal of fossil tracks compatible to a Lower Ordovician epoch. The good exposure conditions, scientific value as a token of the olistostromic nature of the containing unit, and the easy access result in this Geosite proposal. Other 2 nearby geosites (CIs013: San Martín del Pedroso granitic batholith, and CI045: Nuez meta-rhyolites) and the neighbouring Armorican-type quartzites of the Sierra de la Culebra, possible origin of this olistolith, increase the didactic and disseminative importance as they can be visited jointly. The crag was earlier known as a place with prehistoric schematic engravings; but the geological conclusions provide an added value as an example of the knowledge evolution.*

Key words: *olistolith, ichnofossils, Carboniferous, Galicia-Tras-os-Montes Zone, geological heritage.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Un Lugar de Interés Geológico (LIG), según la definición de García-Cortés et al. (2018), es aquel que merece ser destacado y catalogado "por su carácter único y/o representativo, para el estudio e interpretación del origen y evolución de los grandes dominios geológicos españoles, incluyendo los procesos que los han modelado, los climas del pasado y su evolución paleobiológica. Estas áreas deberán mostrar, de manera suficientemente continua y homogénea en toda su extensión, una o varias características notables y significativas del patrimonio geológico de una región natural". Aplicando este concepto, consideramos que el lugar conocido desde antiguo como Peña Beneita, en Nuez (provincia de Zamora), reúne condiciones suficientes para ser declarado LIG y, por lo tanto, para ser incluido en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG); principalmente al ser un ejemplo representativo de los depósitos de bloques-en-matriz Variscos y ayudar a comprender su génesis simultánea con el desarrollo de la orogenia.

Peña Beneita es un roquedo de cuarcita blanca que está situado cerca de la cumbre de una colina en el alomado paisaje de la región occidental de la Comarca de Aliste (Zamora) (Fig. 1). Tradicionalmente ha sido considerada una peña singular por su buena exposición, su color blanco y, especialmente, por la existencia en ella

de lo que se consideraban grabados de origen antrópico (Sastre Blanco y Vázquez Fadón. 2013).

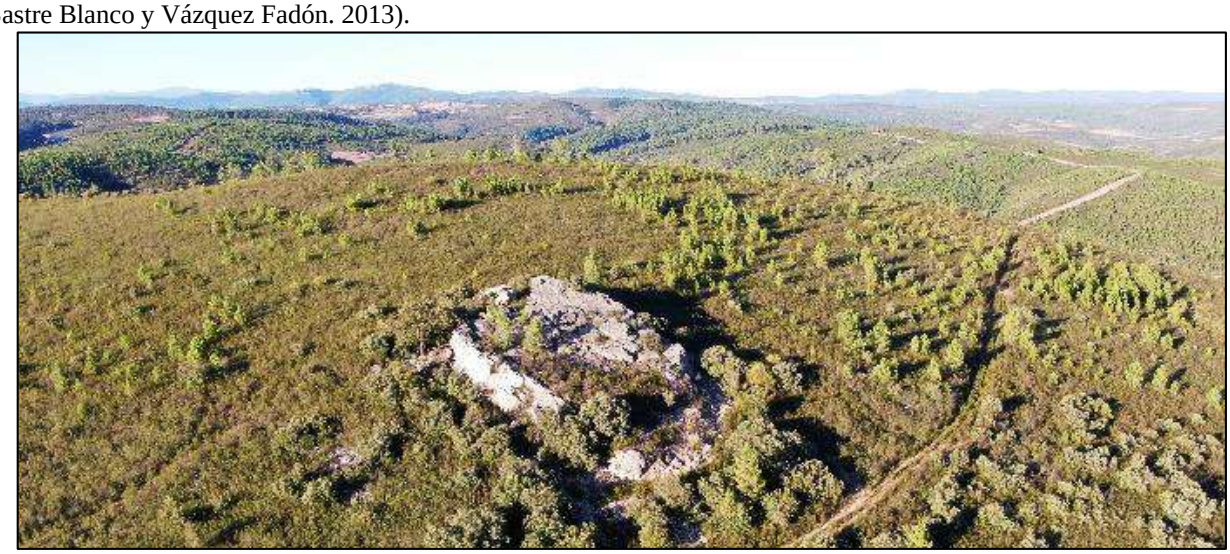


FIGURA 1. *Vista aérea de Peña Beneita. Se observa la falta de continuidad del afloramiento de cuarcitas, que está rodeado por un wild-flysch sinorogénico varisco. La Sierra de la Culebra, formada por cuarcitas de tipo Armoricano, se aprecia en el horizonte. Fotografía aérea cortesía de Abel Fernández Domínguez.*

CONTEXTO GEOLÓGICO

El sector que nos ocupa fue considerado tradicionalmente perteneciente a la Zona Centro Ibérica del Macizo Varisco Ibérico (Julivert et al., 1972). Posteriores trabajos (González Clavijo et al., 2016) revelaron una situación estructural más compleja. Siguiendo el criterio de Farias et al. (1987) para la zona de Verín, el sinforme tardivarisco de Alcañices fue dividido en una unidad autóctona y otra alóctona, separadas por un despegue tectónico de carácter regional. Los flancos del sinforme (secuencia estratigráfica Cambro-Silúrica) serían parte de la Zona Centro Ibérica, mientras que su núcleo alóctono pertenecería a la Zona Galicia Tras-os-Montes, en concreto a la unidad denominada Parautóctono Inferior (Dias da Silva et al. 2016), constituida por depósitos sinorogénicos de edad Devónico Superior a Misisípico. Estas unidades sinorogénicas -apiladas tectónicamente- contienen depósitos de bloques-en-matriz y flyschs turbidíticos con diversos nombres y características. Su unidad superior (formación Rábano) constituye el núcleo del sinforme de Alcañices y en ella los depósitos de bloques-en-matriz son muy voluminosos (Fig. 2).

En los bloques de variadas litologías incluidos en la formación Rábano, se han identificado fósiles con un rango temporal desde el Ordovícico Inferior al Devónico Medio. En los bloques de vulcanitas se obtuvieron edades radiométricas U/Pb en circones que abarcan desde el Cámbrico superior al Ordovícico Superior (González-Clavijo et al. 2021); mientras que los estudios de circones detríticos de la matriz ofrecen edades radiométricas U/Pb que indican una edad Devónico Superior o más reciente para la sedimentación de esta formación sinorogénica (Martínez Catalán et al., 2008). En este contexto, el olistolito de Peña Beneita sería un magnífico ejemplo de los depósitos de bloques-en-matriz generados durante el choque continente-continente que dio lugar a la orogenia Varisca, ya que añade a sus características litológicas una espectacular muestra de pistas fósiles. Todos los rasgos distintivos del bloque sugieren que se deslizó desde una unidad litoestratigráfica constituida por cuarcitas de tipo Armoricano.

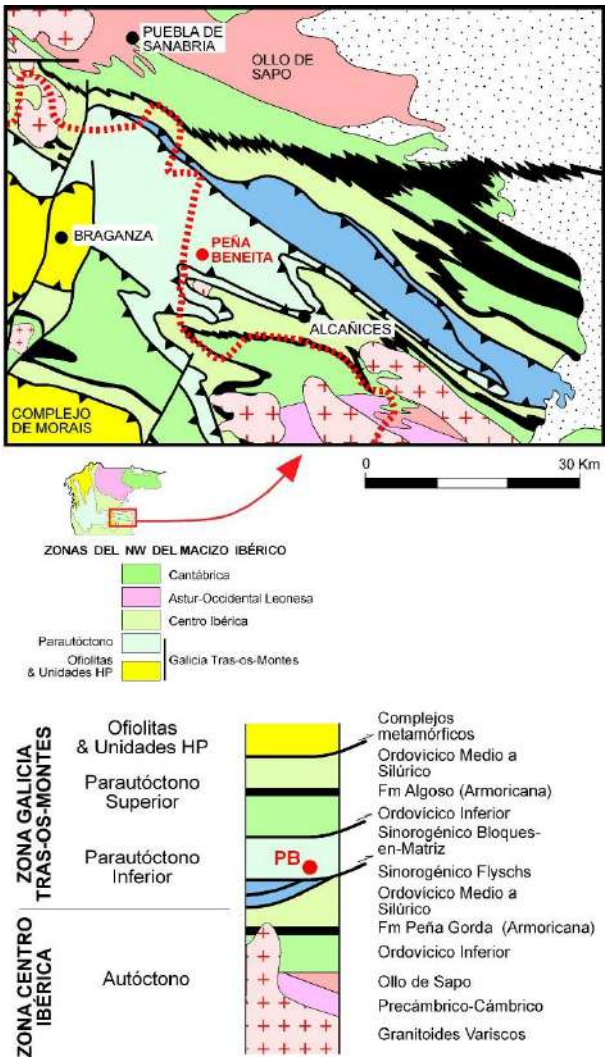


FIGURA 2. *Esquema geológico del sector de Peña Beneita y columna litoestratigráfica sintética. Modificado de González Clavijo et al. (2016).*

PEÑA BENEITA (COORDENADAS UTM: EPSG:25829 707771.4630096). DESCRIPCIÓN Y NUEVOS DATOS

El color blanco y su prominente situación en el paisaje han atraído la atención desde antiguo. Las evidentes y abundantes pistas fósiles que presenta fueron tradicionalmente consideradas muestra de arte prehistórico esquemático (Sastre Blanco y Vázquez Fadón, 2013). Nuevos datos regionales sobre la abundancia de olistolitos en la formación Rábano llevaron a revisar este roquedo, realizando una descripción litológica y desvelando que los grabados son pistas fósiles (Domínguez Fernández, 2021).

Las pistas identificadas son de dos tipos. Unas son rastros horizontales, de tipo Cruziana, en los que resulta difícil apreciar la huella bilobulada y las impresiones de apéndices características de este icnogénero debido a que se conservan, casi en su totalidad, como endorelieves y tan solo, muy puntualmente, como epirelieves negativos bilobulados (Fig. 3). Otras son madrigueras verticales, de sección casi circular y rellenas de material pelítico gris que parecen corresponder al icnogénero *Skolithos* sin que hayan podido identificarse las secciones verticales propias de estas pistas fósiles (Fig. 4).



FIGURA 3. *Detalle de las pistas bilobuladas en posición normal. Martillo de un pie como escala.*

Peña Beneita está formada por una cuarcita blanca con pátinas de óxidos-hidróxidos de hierro y en ocasiones de tonalidades grisáceas debido a la mayor presencia de impurezas en su composición. Muestra laminación paralela, estratificación cruzada hummocky y excelentes ejemplos de ripples de oscilación que, además de revelar depósitos de plataforma costera, demuestran la posición normal de las cuarcitas coincidente con la deducida de las pistas fósiles.

Esta litología y estructuras sedimentarias, junto con las pistas fósiles, permiten considerar que se trata de un bloque deslizado en ambiente submarino desde una formación cuarcítica de tipo Armoricano (tramo superior del Ordovícico Inferior). Rodeando al bloque se encuentra un flysch terrígeno que localmente tiene conglomerados de cantos redondeados y con litologías variadas y coincidentes con las de los olistolitos. La edad sedimentaria Carbonífera obtenida para la formación Rábano ha sido posteriormente extendida a otros sectores del límite entre las zonas Galicia Tras-os-Montes y Centro Ibérica (González-Clavijo et al., 2021).

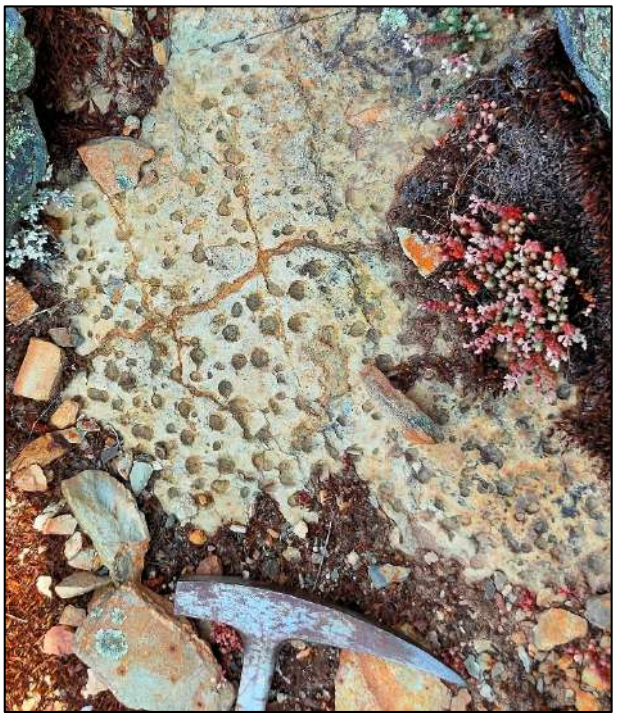


FIGURA 4. *Detalle de las pistas subcirculares rellenas de material pelítico en posición normal (Skolithos). Martillo de un pie como escala.*

Desde lo alto de la peña se puede ver en el horizonte la Sierra de la Culebra, un relieve creado por la cuarcita blanca de la formación Peña Gorda (tipo Armoricano en la unidad autóctona: Zona Centro Ibérica). La litología general de la formación Peña Gorda es idéntica a la de Peña Beneita, y se podría suponer que este olistolito deslizó bajo el nivel de mar desde esa unidad; pero la formación Peña Gorda está en el autóctono y se considera que, mientras se generaban los depósitos de bloques-en-matriz, la orogenia Varisca aún no había afectado esa unidad estructural y por lo tanto no podría ser su área fuente (Dias da Silva et al., 2016). Un origen más probable sería la formación Algoso, de la misma litología y edad, pero situada en el Parautóctono Superior, unidad estructural ya cabalgante cuando se depositaban las unidades sinorogénicas (Fig. 2) y, por ello, un posible origen de estos bloques transportados desde el margen activo a la cuenca sedimentaria mediante deslizamientos submarinos.

CONSIDERACIONES FINALES

El interés geológico de Peña Beneita es múltiple. En primer lugar, es un buen ejemplo de olistolito de decenas de metros de longitud deslizado desde el margen activo de la orogenia Varisca hacia la parte más profunda de la cuenca sinorogénica, que se estaba rellenando entre dos continentes mientras colisionaban (Gondwana y Laurasia). La abundancia de pistas fósiles claramente observables en el bloque, junto con su litología y estructuras sedimentarias, sugieren que su origen es una cuarcita de tipo Armoricano del tramo superior del Ordovícico Inferior.

El olistolito es representativo de una extensa unidad geológica de bloques-en-matriz, la formación Rábano. Esta unidad sinorogénica, junto con otras unidades de características flyschoides, se extienden por todo el NW de Iberia. El avance del frente orogénico formó con ellas una escama tectónica compleja, a modo de alfombra, en una posición intermedia entre el autóctono (Zona Centro Ibérica) y el alóctono (Zona Galicia Tras-os-Montes) según González Clavijo et al. (2021). Esta unidad estructural de bloques-en-matriz se extiende por todo el NW del Macizo Varisco Ibérico.

La existencia de otros LIG oficialmente reconocidos en las proximidades (CIs013: Batolito granítico de San Martín del Pedroso, y CI045: meta-riolitas de Nuez) incrementa su atractivo como sector de divulgación de las ciencias de la Tierra. La realización de un Geolodía Transfronterizo España-Portugal en este sector confirma el interés didáctico de la geología de Peña Beneita y su comarca (GeoloDía23 Transfronterizo Espanha & Portugal: González Clavijo et al. 2023).

La región ofrece un atractivo paisaje con gran riqueza de flora y fauna. Desde el punto de vista cultural, las localidades cercanas presentan excelentes ejemplos de arquitectura tradicional y conservan magníficamente su cultura y tradiciones. Hoy en día, la Comarca de Aliste es un excelente destino turístico y gastronómico.

Finalmente, la accesibilidad a Peña Beneita es buena y sin limitaciones, pudiéndose llegar con vehículos a motor hasta un punto muy cercano. También existen zonas recreativas próximas. Estas características, por otro lado, la hacen vulnerable a amenazas antrópicas como viene siendo la obtención de piedra para mampostería. Actividades de divulgación, como el Geolodía, contribuyen sin duda a la reducción de estos riesgos al concienciar a la población local, pero la protección propia de un Lugar de Interés Geológico mejoraría las herramientas disponibles para que las autoridades locales puedan salvaguardar Peña Beneita.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo económico la de la Sociedad Geológica de España, que permitió realizar el GeoloDía Transfronterizo España & Portugal de 2023. De sus trabajos preparatorios ha surgido esta propuesta.

REFERENCIAS

Dias da Silva, Í., Díez Fernández, R., Díez-Montes, A., González Clavijo, E., y Foster, D. A. (2016). Magmatic evolution in the N-Gondwana margin related to the opening of the Rheic Ocean – evidence from the Upper Parautochthon of the Galicia-Trás-os-Montes Zone and from the Central Iberian Zone (NW Iberian Massif), *Int. J. Earth Sci*., 105, 1127–1151, https://doi.org/10.1007/s00531-015-1232-9.

Domínguez Fernández, J, M, (2021). "Peña Beneita": from engraved schematic art to a new palaeoichnological site in the Alcañices synform (Nuez de Aliste, Zamora, Spain). En: *3rd Palæntological International Virtual Congress.* 1-15 diciembre.

Farias, P., Gallastegui, G., González-Lodeiro, F., Marquínez, J., Martín Parra, L. M., Martínez Catalán, J. R., de Pablo Maciá, J. G., y Rodríguez Fernández, L. R. (1987). Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafía y estructura de Galicia Central, *Memórias da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*, 1, 411–431, 1987.

García-Cortés, Á., Carcavilla, L., Díaz- Martínez, E. y Vegas, J. (2018): Documento metodológico para la elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG). *Informe*, IGME, Madrid.

González Clavijo, E., Dias da Silva, Í., Gutiérrez-Alonso, G. y Díez-Montes, A. (2016). U/Pb age of a large dacitic block locked in an Early Carboniferous synorogenic mélange in the Parautochthon of NW Iberia: New insights on the structure/sedimentation Variscan interplay. *Tectonophysics*, 681, 159-169.

González Clavijo, E., Dias da Silva, Í., Martínez Catalán, J.R., Gómez Barreiro, J., Gutiérrez-Alonso, G., Díez Montes, A., Hofman, M., Gärtner, A. y Linnemann, U. (2021). A tectonic carpet of Variscan flysch at the base of a rootless accretionary prism in NW Iberia: U-Pb zircon age constrains from sediments and volcanic olistoliths. *Solid Earth* (EGU), 12. 835-867.

González Clavijo, E., Frois da Silva, Í y Domínguez Fernández, J.M. (2023). GeoloDía23 Transfronterizo Espanha&Portugal. *Guía de campo*, SGE. 8 p.

Julivert, M., Fonboté, J.M., Ribeiro, A. y Conde, L. (1972). Memoria explicativa del Mapa Tectónico de la Peninsula Ibérica y Baleares, escala 1.1.000.000. IGME, Madrid.

Martínez Catalán, J.R., Fernández-Suárez, J., Meireles, C., González Clavijo, E., Belousova, E. y Saeed, A. (2008). U-Pb detrital zircon ages in synorogenic deposits of the NW Iberian Massif: interplay of syntectonic sedimentation and thrust tectonics. *Journal of the Geological Society* 165. 687-698.

Sastre Blanco, J.J. y Vázquez Fadón, J., 2013. Puesta en valor y estudio del arte rupestre esquemático de la Sierra de la Culebra (Zamora)". En: *Arqueología en el valle del Duero. Del Neolítico a la Antigüedad Tardía: nuevas perspectivas*. La Ergástula. Zamora, pp. 333-342.

Caracterización petrográfica y mineralógica de las rocas utilizadas como materiales de construcción en el itinerario urbano geológico-histórico de Candelario (SE de Salamanca, España)

Petrographic and mineralogical characterization of plutonic rocks used as building materials in the geological-historical urban itinerary of Candelario (SE of Salamanca, Spain)

A. Fernández-Fernández[1], A.M. Martínez-Graña[1], C.E. Nieto-Martín[1], J.A. González-Delgado[1], J.M. Gasca-Pérez[1]

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Pza. de Los Caídos, s/n, 37008 Salamanca
aff@usal.es, amgranna@usal.es, carlosenriquenm@usal.es, angel@usal.es, gasca@.usal.es

Palabras clave: Itinerario Geológico-histórico, Rocas plutónicas, Materiales de Construcción, Candelario.

Resumen

En este trabajo se han realizado un estudio geológico, petrográfico y mineralógico de las rocas metamórficas (migmatitas) y plutónicas (leucogranitos con nódulos y monzogranitos-granodioritas biotíticas porfídicas) que afloran en el entorno de Candelario (Salamanca) y un análisis de los materiales de construcción de sus edificaciones históricas (ermita, iglesia) y tradicionales (casa serrana y chacinera). Su comparación ha permitido establecer un itinerario urbano geológico-histórico.

Los materiales de construcción originales más utilizados en la envolvente externa de estas edificaciones son mampuestos y/o sillares de leucogranitos con nódulos, mientras que en las restauraciones son más frecuentes los monzogranitos biotíticos porfídicos, con diferentes proporciones de megacristales de feldespato. Estos materiales fueron usados en las reconstrucciones históricas de la iglesia, en algunos de sus elementos arquitectónicos más relevantes, como el rosetón y las jambas y arquivoltas de sus entradas, y en los sillares de las esquinas de su torre, lo que puede ser debido a la mayor durabilidad observada en este tipo de rocas. Igualmente, son los materiales constructivos habituales en restauraciones más recientes (escaleras y zócalos de la iglesia), en la pavimentación de las calles y en los edificios de nueva construcción.

Keywords: Geological-historical itinerary, Plutonic Rocks, Construction materials, Candelario.

Abstract

In this work, a geological, petrographic and mineralogical study of the metamorphic rocks (migmatites) and plutonic rocks (leucogranites with nodules and biotitic porphyritic monzogranites-granodiorites) that outcrop in the surroundings of Candelario (Salamanca) and an analysis of the building materials of its historical (hermitage, church) and traditional ("serrana" and "chacinera" house) buildings has been carried out. Their comparison has allowed establishing a geological-historical urban itinerary.

The original building materials most commonly used in the external sides of these buildings are masonry and/or ashlars of leucogranites with nodules, while in the building restorations, biotitic porphyritic monzogranites, with different proportions of feldspar megacrystals, are more frequent. These materials were used in the historical reconstructions of the church, in some of its most relevant architectural elements, such as the rose window and the jambs and archivolts of its entrances, and in the ashlars of the corners of its tower, which may be due to the greater durability observed in this type of rock. They are also common building materials in more recent restorations (staircases and plinths in the church), in the paving of the streets and in newly constructed buildings.

Inventario de Patrimonio geológico y paleontológico en L´Alfàs del Pi (Alicante): resultados en el marco del proyecto FOPALI

Paleontological and geological heritage inventory in L'Alfàs del Pi (Alicante): results within the framework of FOPALI project.

I. Fierro[1], J. Navarro-Almendro[2], A. Aberasturi[2], A. Giannetti[3], A. Yébenes[3] y C. Frías[4]

1 GeaLand Patrimonio S.L., Calle Tibi, 3, 3, E1, 03010 Alicante. fierro@gealandpatrimonio.com;
2 Museo Paleontológico de Elche- Fundación Cidaris, Plaça de Sant Joan s/n 03203 Elche. jnavarro@cidarismpe.org; ainara@cidarismpe.org;
3 Departamento Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig; alice.giannetti@ua.es; ayeb@telefonica.net
4 Técnico Patrim. Cultural, Ayto. L´Alfàs del Pi, C/ Federico García Lorca, 03580 L´Alfàs del Pi; museovillaromana@lalfas.com

Palabras clave: inventario, L´Alfàs, LIG, paleontología, patrimonio geológico.

Resumen

El proyecto FOPALI (Fósiles y Patrimonio de Alicante) se inicia en el año 2007 por iniciativa de la Fundación Cidaris (Sánchez-Ferris *et al*., 2019). Las actividades de este proyecto se vinculan con la gestión del patrimonio geológico y paleontológico de la provincia de Alicante, respondiendo a una necesidad legal y medioambiental. L´Alfàs del Pi es un término municipal de unos 19 km^2, situado entre Benidorm y Altea, en las Zonas Externas de la Cordillera Bética. Como resultado del proyecto FOPALI en esta localidad se han identificado 7 unidades geológicas y 29 Lugares de Interés Geológico (LIG). De ellos, 10 LIG presentan interés paleontológico. El resto presenta otros tipos de interés como el geomorfológico, el estratigráfico, el minero-industrial o el mineralógico, entre otros; compartiendo algunos LIG más de un tipo de interés. Entre los LIG inventariados se encuentran distintas localidades-tipo de fósiles del Mesozoico y Cenozoico. Como mínimo, estos lugares deberían ser candidatos a formar parte de un inventario del patrimonio de carácter autonómico. En el futuro, la valoración objetiva del interés científico y de la potencialidad de uso de todos los lugares (Sánchez-Ferris *et al*., 2019), determinará su posible inclusión en el Catálogo Municipal de protecciones.

Keywords: inventory, L'Alfàs, geosite, paleontology, geological heritage.

Abstract

The FOPALI project (Fossils and Heritage of Alicante) starts in 2007 as an initiative of the Fundación Cidaris (Sánchez-Ferris et al., 2019). The activities of this project are relative to the management of the geological and paleontological heritage of the province of Alicante, responding both to a legal and environmental need. L'Alfàs del Pi is a municipality of about 19 km^2, located between Benidorm and Altea, in the External Zones of Betic Cordillera. Because of the FOPALI project, we identify in this village 7 geological units and 29 geosites. Ten geosites of them, present paleontological interest. The rest, have other types of interest such as geomorphological, stratigraphic, mining-industrial or mineralogical, among others. Some of the geosites present more than one type of interest. Among the geosites inventoried are different type-localities of fossils dated in the Mesozoic and the Cenozoic. At a minimum, these places should be candidates to be part of the geoheritage inventory of the Region. In the future, the objective assessment of their scientific interest and potential use (Sánchez-Ferris at al., 2019), will determine their inclusion in a local protection inventory.

Referencias

Sánchez-Ferris, E.J., Fierro-Bandera, I., Aberasturi-Rodríguez, A., Navarro-Pedreño, J. & Montoya-Belló, P. (2019). *Spanish Journal of Palaeontology*, 34(1), 35-56.

Geodiversidad del Camino de Santiago entre volcanes en la isla de Gran Canaria. Una georuta jacobea singular.

Geodiversity of the Camino de Santiago among Volcanoes on the island of Gran Canaria. A singular Jacobean georoute.

J. Mangas [1] y J. Yepes [1]

1 Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. jose.mangas@ulpgc.es, jorge.yepes@ulpgc.es

Palabras clave: Georuta jacobea, geoturismo, geodiversidad, isla volcánica intraplaca, Gran Canaria.

Resumen

El Camino de Santiago entre volcanes es una actividad geoturítica en la isla de Gran Canaria, con una longitud de unos 70 km, que va desde el Faro de Maspalomas, en el Sur de la isla (municipio de San Bartolomé de Tirajana), hasta la iglesia de Santiago Apóstol, al Norte, en el municipio de Gáldar. Este camino Jacobeo contiene elementos de la historia geológica de una isla volcánica intraplaca oceánica, con materiales, geoformas y estructuras volcánicas y sedimentarias formadas desde el Mioceno medio (14,1 Ma) hasta la actualidad. En esta georuta se han definido 18 paradas distribuidas en 3 etapas: a) meridional, incluye las 7 primeras paradas, que ofrecen una gama de elementos geológicos típicos de la etapa miocena de declive alcalino de la isla (borde de la caldera del estratovolcán Cruz Grande y las formaciones Traqui-riolítica y Traqui-fonolítica); b) central, que abarca las paradas 8 a la 11, que presenta una muestra de la geodiversidad característica de la fase de reactivación volcánica insular del estratovolcán plioceno Roque Nublo (Grupo Roque Nublo); y, por último, c) septentrional (paradas 12 a 18), que resalta los variados elementos geológicos plio-cuaternarios que caracterizan el Grupo Post Roque Nublo (erupciones estrombolianas y procesos sedimentarios).

Keywords: Jacobean Georoute, geotourism, geodiversity, intraplate volcanic island, Gran Canaria.

Abstract

The almost 70-km long Camino de Santiago Among Volcanoes is a geotourism activity on the island of Gran Canaria (Canary Islands, Spain), begins at the Maspalomas Lighthouse, in the south of the island (municipality of San Bartolomé de Tirajana) and concludes at the Church of St James the Apostle in the northern municipality of Gáldar. This Camino contains important elements of the geological history of a volcanic island, with materials, landforms and structures of volcanic and sedimentary origin formed from the middle Miocene (14.1 Ma) to the present. In this georoute, 18 stops of geological interest have been identified distributed over the 3 following stages: a) southern, which includes the first 7 stops and offers a range of geological elements typical of the alkaline decline Miocene stage of the island (the caldera rim of the Cruz Grande stratovolcano and the trachyrhyolitic and trachyphonolitic formations); central, which covers stops 8 to 11 and presents a sample of the geodiversity characteristic of the insular volcanic reactivation phase of the Pliocene stratovolcano Roque Nublo (Roque Nublo Group); and, finally, northern (stops 12 to 18), which highlights the varied Plio-Quaternary geological elements that characterize the Post-Roque Nublo Group (strombolian eruptions and sedimentary processes).

Las esponjas marinas del Cámbrico de la Zona Centroibérica: relevancia de los LIG en la divulgación y conservación del patrimonio geológico.

Cambrian marine sponges of Central Iberian Zone: relevance of LIG in the dissemination and conservation of geological heritage.

S. Menéndez[1], M. Rodríguez-Martínez[2], E. Moreno-Eiris[2] y A. Perejón[2]

1 Museo Geominero, CN IGME-CSIC, C/ Ríos Rosas, 23 28003, Madrid. s.menendez@igme.es.
2 Dpto. GEODESPAL, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid. martarm@geo.ucm.es, eiris@ucm.es, aparqueo@ucm.es.

Resumen: EL IELIG es una potente herramienta de gestión del conjunto de LIG seleccionados por su relevante valor científico, didáctico y/o turístico. Se destaca la presencia en el IELIG de dos yacimientos de arqueociatos, poríferos marinos extintos que vivieron exclusivamente en el Cámbrico, de la Zona Centroibérica en las localidades de Urda (Toledo) y Casafranca (Salamanca). Las asociaciones de arqueociatos de estas localidades Cámbrico *Serie 2*, *Piso 3* (Ovetiense superior, zona VII de arqueociatos) presentan la más alta diversidad taxonómica de la ZCI, así como una de las mayores concentraciones registradas en España. Por tanto, el valor de estos LIG para establecer posibles correlaciones bioestratigráficas y reconstrucciones paleogeográficas de las plataformas marinas del margen oeste de Gondwana es muy alto. Las calizas con arqueociatos en ocasiones han sido utilizadas en el patrimonio histórico y cultural antiguo, habiendo sido documentado el Palacio Real de Madrid y la Catedral de Toledo para las calizas de Urda, y recientemente identificado un cancel visigodo cuya procedencia preliminarmente se asigna a las calizas de Casafranca. Esto confiere un valor extra a ambos LIG no recogido en el IELIG. Son necesarias medidas de divulgación y conocimiento de la importancia de ambos LIG, labores imprescindibles para su conservación.

Palabras clave: Arqueociatos, Cámbrico *Serie 2***,** Casafranca, IELIG, Urda.

Abstract: *Spanish Inventory of Geosites (IELIG, in its Spanish acronym) is a powerful tool for the management of geosites selected for their relevant scientific, didactic and/or touristic value. It is highlighted the presence in the IELIG of two archaeocyaths sites, extinct marine porifera that lived exclusively in the Cambrian, from the Central Iberian Zone: Urda (Toledo) and Casafranca (Salamanca). The archaeocyaths assemblages of these localities (Cambrian* Series 2, Stage 3 *(Late Ovetian, Zone VII of archaeocyaths) are the most diverse in the CIZ, as well as one of the highest concentration recorded in Spain. Therefore, these LIG are very valuable for establishing biostratigraphic correlations and palaeogeographic reconstructions of the marine platforms of the western margin of Gondwana. Limestones with archaeocyaths have sometimes been used in ancient historical and cultural heritage. It has been documented in the Royal Palace of Madrid and the Cathedral of Toledo for the Urda limestones. Recently archaeocyaths has been identified in a Visigothic cancel whose provenance is preliminarily assigned to the Casafranca limestones. This confers an extra value to both LIG not included in the IELIG. It is necessary to disseminate and raise awareness of the importance of both LIG, which is essential for their conservation.*

Key words: *Archaeocyaths, Cambrian* Series 2, *Casafranca, IELIG, Urda.*

INTRODUCCIÓN

El Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) es un catálogo de los lugares más representativos de la diversidad geológica española. Tiene su origen en el Inventario Nacional de Puntos de Interés Geológico (INPIG), proyecto impulsado por el IGME a finales de los años 70 del siglo pasado. Algunas Comunidades Autónomas (CC.AA.) también llevaron a cabo inventarios autonómicos que fueron aprobados por organismos competentes en la materia. Pero fue a raíz del R.D. 556/2011 cuando se exige la creación del Inventario Español del Patrimonio Natural y la Biodiversidad y, en concreto, el IELIG que debía aglutinar todos los inventarios oficiales realizados hasta la fecha. Actualmente el IELIG está coordinado y centralizado por el CN IGME-CSIC ya que el R.D. 1274/2011 encomendó a esta institución su finalización.

La metodología utilizada para la elaboración del IELIG establece que el interés del lugar candidato a ser LIG esté definido por un conjunto de parámetros evaluables cuantitativa y cualitativamente en tres ámbitos: científico, didáctico y turístico-recreativo. El valor científico es evaluado por separado del valor didáctico y del turístico-recreativo ya que la gestión de los LIG con mayor valoración científica prioriza la conservación, mientras que la de aquellos con alto valor

didáctico o turístico se centra más en facilitar esta posibilidad de uso (García-Cortés et al., 2019).

Por tanto, el IELIG y su gestión se articula como una poderosa herramienta para establecer actuaciones coordinadas a escala nacional en cuanto a prioridades de conservación y uso de los LIG incluidos. Este inventario permite la revisión y actualización de la información que se consigna para cada uno de los LIG. Además, posibilita hacer el seguimiento de los parámetros cuya valoración le han conferido a un LIG poder ser adherido al IELIG, de modo que, si en algún momento estos varían su estatus, podría ser modificado.

La importancia del registro fósil del Cámbrico es incuestionable ya que nos refiere aspectos de una vida pretérita muy diferente a la que se desarrolla en la superficie terrestre actualmente. Dado su valor científico cabe pensar que muchos de estos afloramientos deben conservarse adecuadamente para su estudio presente y futuro declarándose LIG. En España existen ejemplos muy notables, reconocidos tanto nacional como internacionalmente, que han sido incluidos en el IELIG, como por ejemplo el yacimiento de Murero (Zaragoza), el yacimiento de medusas fósiles de Constantina (Sevilla) o las sucesiones de la Formación Pedroche en el Arroyo Pedroche (Córdoba) y de la Formación Calizas de los Navalucillos en Los Navalucillos (Toledo). Sin embargo, es de destacar dos yacimientos cámbricos incluidos dentro del IELIG, que presentan algunas características comunes y que a priori su valor científico, divulgativo y turístico-recreativo podría pasar inadvertido en comparación con los ejemplos dados. Se trata de dos yacimientos de esponjas marinas cámbricas que afloran en sendas canteras de las localidades de Urda (Toledo) (Fig. 1A) y Casafranca (Salamanca) (Fig. 1B), figurando como CI191 y CI058 respectivamente, en el IELIG. Se pretende la puesta en valor de estos dos yacimientos, ponderando la importancia de los mismos y su equiparación dentro del IELIG.

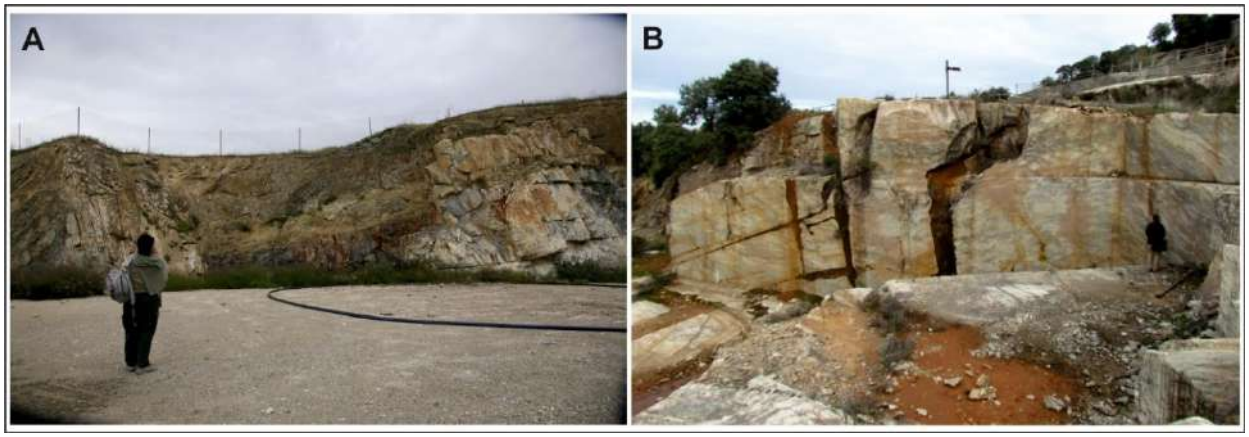


FIGURA 1. *Frente de canteras donde se explotaba para áridos y roca ornamental calizas del Cámbrico y que actualmente su extracción comercial se encuentra en desuso. A. Formación Calizas de Los Navalucillos. Urda (Toledo). B. Formación Calizas de Tamames. Casafranca (Salamanca).*

LA RELEVANCIA DE LAS ESPONJAS MARINAS CÁMBRICAS DE LA ZONA CENTROIBÉRICA

Los arqueociatos son un grupo fósil de poríferos extintos que vivió exclusivamente durante el Cámbrico. En la Península Ibérica se registran desde el *Piso 2* (Terreneuviense) hasta el *Piso 4 (Serie 2)*, comenzando su declive global inmediatamente después, hasta desaparecer por completo al final del Cámbrico. Habitaban ambientes cálidos someros en plataformas carbonáticas marinas, donde podían formar importantes bioconstrucciones junto con comunidades bentónicas microbianas. Su distribución paleobiogeográfica en zonas tropicales-templadas en las plataformas carbonáticas del Cámbrico es prácticamente global. El rápido desarrollo y evolución en el tiempo de estos fósiles hace que sean muy útiles en los análisis bioestratigráficos, así como en los estudios paleobiogeográficos por su amplia distribución geográfica.

El registro fósil de los arqueociatos en España es muy amplio, incluyendo la totalidad de las zonas tectonoestratigráficas del Macizo Ibérico (excepto la Zona Surportuguesa) y el área oriental de Pirineos. Su distribución temporal ha permitido establecer una precisa división en diez zonas de arqueociatos para la mitad inferior del Cámbrico (Perejón y Moreno-Eiris, 2006). En concreto, en el *Piso 3* (Ovetiense superior, zonas IV a VII) se registra la distribución geográfica más amplia de facies con arqueociatos en la zona VI (Zonas de Ossa-Morena, Centroibérica, Asturoccidental-Leonesa y Pirineos). Sin embargo, la zona VII sólo se registra en la Zonas Centroibérica y Asturoccidental-Leonesa (ZAOL). Por lo que las asociaciones de arqueociatos de la Zona Centroibérica (ZCI) son claves en las reconstrucciones ambientales, paleobiogeográficas y paleogeográficas del margen oeste de Gondwana.

En la última década se ha retomado el estudio de las localidades de la Zona Centroibérica. Esto ha permitido la revisión y actualización de su registro fósil, así como el hallazgo de nuevas localidades (Menéndez, 2014; Menéndez et al., 2015). Estos estudios han puesto de manifiesto el interés que presentan las localidades de Urda en Toledo y Casafranca en Salamanca (ZCI sector oriental y occidental, respectivamente).

LAS CANTERAS DE URDA Y CASAFRANCA EN EL IELIG

Los intereses geológicos principales valorados dentro del IELIG para las canteras de Urda y Casafranca son diferentes, para Urda se destaca el interés paleontológico mientras que para Casafranca es el estratigráfico. En el caso de los intereses secundarios esos criterios se invierten, añadiendo otros como el sedimentológico, geomorfológico, etc. Ambos criterios, por tanto, son los principales parámetros evaluables que dotan a estas localidades de su valor como LIG (Tabla I). A través del visor del IGME (http://info.igme.es/ielig/) se puede acceder a la información relacionada con los criterios seleccionados, salvo en el caso del yacimiento de Urda por tratarse de un lugar con la categoría de "Confidencial", no indicándose su ubicación exacta ni toda la información que usualmente aparece de forma publica en esta base de datos.

LIG	IGP	IGS	ING
Urda (CI191)	Paleontológico	Estratigráfico Sedimentológico Historia de la Geología	Histórico-Cultural
Casafranca (CI058)	Estratigráfico	Paleontológico Tectónico Geomorfológico	Histórico-Cultural

TABLA I. *Elementos considerados en el IELIG como Interés geológico principal (IGP) e Interés geológico secundario (IGS) para los LIG mencionados en el texto. Elementos de interés a considerar en el IELIG en el futuro para el epígrafe Interés No Geológico (ING) para los LIG mencionados en el texto.*

El interés paleontológico en ambos casos alude a la presencia de arqueociatos, donde un factor a destacar para la localidad de Urda, es su excelente conservación teniendo en cuenta que los materiales donde se encuentran están afectados por metamorfismo de contacto en facies de corneanas albito-epidóticas. Sin embargo, la conservación de los ejemplares en el caso de Casafranca es peor debido al grado de recristalización que han sufrido al verse afectados por metamorfismo regional de bajo grado. Otros aspectos interesantes a considerar para una futura valoración del interés paleontológico de ambos LIG, es su biodiversidad y concentración. En la ZCI se registran 14 familias de arqueociatos, 8 en la zona VI y 13 en la VII, mientras que en la ZAOL se registran únicamente 4 familias, 1 en la zona VI y 3 en la VII. En la ZCI, la máxima diversidad familiar se da en las localidades de Urda y Casafranca (10 y 9 respectivamente). Asimismo, ambas localidades tienen una de las mayores concentraciones de arqueociatos observada en toda España (Fig. 2).



FIGURA 2. *Detalle de la concentración de cálices de arqueociatos en diversas facies de las localidades de Urda (Toledo)* (A-B) *y de Casafranca (Salamanca)* (C).

Existen otros intereses no geológicos evaluables a la hora de establecer las características de cada LIG, como el histórico y cultural. En el caso de la cantera de Urda existen documentos que acreditan que llevan siendo explotadas desde mediados del siglo XVIII. Determinadas obras del Palacio Real de Madrid fueron esculpidas en estos mármoles en el taller de escultura de Olivieri (Tárraga Baldó, 1992, 2009) y también se pueden observar en el transparente de la Catedral de Toledo. Por otro lado, recientemente se ha identificado la presencia de cálices de arqueociatos en un cancel visigodo depositado en los fondos del Museo de Salamanca. Las características que se observan en esta caliza con arqueociatos se asemejan a las que presentan las que afloran en las canteras de Casafranca, por lo que, provisionalmente se asigna esta localidad como su posible procedencia (Rodríguez-Martínez et al., 2024). Por tanto, la importancia histórica y cultural de estas calizas cámbricas es significativa (Tabla I).

En la Tabla II se recogen los valores numéricos asignados de acuerdo con la metodología del IELIG (García-Cortés et al., 2019), para diferentes parámetros correspondientes al valor de ambos LIG. Se observa que el valor científico para ambos es alto siendo el valor numérico algo superior para el yacimiento de Casafranca. Teniendo en cuenta que, para el valor intrínseco o científico, también son evaluables parámetros tales como la diversidad geológica que encierra el LIG, espectacularidad y belleza o la relación de cercanía con otros elementos del patrimonio natural y/o cultural, se

deduce la influencia positiva de los mismos en la valoración numérica más alta para Casafranca. También es mayor la valoración para este LIG en los casos de los valores didácticos y turísticos. Las actuaciones en la localidad de Casafranca dirigidas en este sentido son diversas ya que es objeto de vistitas educativas o divulgativas como el Geolodía, es promocionado a través de webs locales y está incluida la visita en itinerarios de caminos o rutas locales. La obra de adecuación instalando una barandilla de protección a la caída en los distintos niveles de la cantera, aunque básica, probablemente ha propiciado más visitas. El caso de Urda, a pesar de su potencial para poder ser objeto de visitas divulgativas, es distinto ya que el acceso no es libre y no hay ningún tipo de adecuación.

LIG	VC	VD	VT	SDN	SDA	RDN	RDA	PP
Urda (CI191)	3.6 (Alto)	4.9 (Medio)	4.9 (Medio)	0.4 (Baja)	3.1 (Alta)	0.18 (Bajo)	1.51 (Alto)	Alta
Casafranca (CI058)	5.1 (Alto)	7.8 (Alto)	8.8 (Alto)	0.4 (Baja)	1.4 (Media)	0.33 (Bajo)	1.25 (Alto)	Alta

TABLA II. *Valoración del interés científico (VC), didáctico (VD) y turístico (VT), de la susceptibilidad a la degradación natural (SDN) y antrópica (SDA), del riesgo de degradación natural (RDN) y antrópica (RDA), y de la prioridad de protección (PP) resultante para cada uno de los LIG analizados.*

Con respecto a los parámetros que miden la vulnerabilidad natural, estos no suponen una amenaza para ninguno de los dos LIG. Sin embargo, la vulnerabilidad antrópica sí comprende riesgos en ambos casos por lo que la prioridad de protección propuesta es alta. Las posibles acciones antrópicas por las cuales pueda peligrar la integridad de ambos LIG se presentan de diferente forma. El régimen y la facilidad de acceso, así como la afluencia de visitantes es de mayor amenaza sobre Casafranca que sobre Urda, mientras que estar bajo figuras de protección legal favorece a Casafranca [Ley 8/2000, de 11 de julio, de Declaración del Parque Natural de Las Batuecas-Sierra de Francia (Salamanca)].

CONCLUSIONES

El interés y valor que poseen los LIG de Urda y Casafranca son altamente reseñables como se ha expuesto. La diversidad taxonómica y abundancia genérica para estas localidades es la más alta descrita hasta el momento para cualquier localidad citada previamente con presencia de arqueociatos en la Zona Centroibérica. Esta gran diversidad y concentración de arqueociatos confiere a estos LIG un potencial muy alto a la hora de establecer criterios para las correlaciones bioestratigráficas no solo locales, sino globales y para la reconstrucción paleogeográfica de las plataformas marinas del margen oeste de Gondwana.

Un aspecto que puede revalorizar el interés de ambos LIG, es la relación que poseen con el patrimonio histórico y cultural como ya se ha mencionado. Por lo que se propone la reconsideración del valor del interés no geológico de ambos LIG debido a la relación que poseen con el patrimonio histórico y cultural.

Actuaciones que potencien la divulgación y el conocimiento de la importancia de estos LIG y fomenten su uso es esencial para su conservación. Es una oportunidad de ampliar las propuestas de actividades culturales y relacionadas con el patrimonio natural de las comarcas implicadas, para beneficio de la población local y atraer turismo a entornos de la "España vaciada". En este sentido, los LIG pueden ser el núcleo de acciones de divulgación, rutas temáticas o senderistas, así como de conservación del patrimonio geológico.

AGRADECIMIENTOS

Es una contribución al Proyecto AEI: "Perturbaciones ambientales y biogeoquímicas asociadas a la explosión cámbrica y la biodiversificación ordovícica en Gondwana Occidental y Báltica". Ref. PID2021-125585NB-I00.

REFERENCIAS

García-Cortés, Á., Vegas, J., Carcavilla, L. y Díaz-Martínez, E. (2019): *Bases conceptuales y metodología del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG).* Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 104 p.

Menéndez, S. (2014): El registro de arqueociatos del Cámbrico en los Montes de Toledo (España) *Cuadernos del Museo Geominero*, 17: 1-204.

Menéndez, S.; Perejón, A. y Moreno-Eiris, E. (2015): Late Ovetian (Cambrian Series 2, Stage 3) archaeocyathan biostratigraphy from Spain *Annales de Paleontologie*, 101: 161-166.

Perejón, A. y Moreno-Eiris, E. (2006): Biostratigraphy and paleobiogeography of the archaeocyaths on the south-western margin of Gondwana. *Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 157(4): 611-627.

Rodríguez-Martínez, M., Moreno González, I., Menéndez, S., Pérez Martín, R., Pieren Pidal, A.P., Moreno-Eiris, E. y Perejón, A. (2024): Ruta del "mármol" de Monreal: viaje desde un fondo marino con esponjas del Cámbrico a un cancel visigótico en Salamanca. Geotemas (En prensa).

Tárraga Baldó, M.L. (1992): *Giovan Domenico Olivieri y el taller de escultura del Palacio Real.* Vol. II. *El taller y sus vicisitudes.* CSIC, Patrimonio Nacional, Instituto Italiano de Cultura, Madrid. 413-1108 p.

Tárraga Baldó, M.L. (2009): Mármoles y rocas ornamentales en la decoración del palacio Real de Madrid. *Archivo español de arte*, 328: 367-392.

La diversidad de la legislación autonómica española en relación con la geoconservación. Cuatro ejemplos: Aragón, País Vasco, Castilla y León, y Cataluña.

The diversity of Spanish regional legislation in relation to geoconservation. Four examples: Aragón, Basque Country, Castile and León, and Catalonia.

M. Monge-Ganuzas[1], N. Herrero[2], P. Infante[3], C. Martínez-Jaráiz[4]

1 Aita Luis Villasante, 9 48300 Gernika-Lumo, Bizkaia. erakatxo@gmail.com
2 Dirección General de Políticas Ambientales y Medio Natural. Generalitat de Cataluña. Foc, 27. 08038 Barcelona. nherrero@gencat.cat
3 Escultor Moreto, 15 50008 Zaragoza. paola_infante@yahoo.es
4 Grupo de Investigación Geodiversidad y Patrimonio IGME-CSIC. C/Ríos Rosas,23.28003 Madrid. carolina.martinez@igme.es
Palabras clave: Comunidad Autónoma, España, geoconservación, legislación.

Resumen

En España, diversos enfoques legislativos abordan la geoconservación. En Aragón, el Decreto 274/2015, del 29 de septiembre, establece el régimen de protección e inventario de LIG. El Decreto 6/1990, del 23 de enero, regula las actividades paleontológicas, mientras que el Decreto 202/2014, del 2 de diciembre, integra el patrimonio geológico en la ordenación territorial y promueve directrices para recursos minerales y geológicos. En el País Vasco, la Ley 9/2021, del 25 de noviembre, regula el inventario de LIG. Además, la Ley 6/2019, del 9 de mayo, aborda actividades paleontológicas y la Ley 4/1990, del 31 de mayo, define la categoría de Suelo de Especial Protección para LIG vascos. En Castilla y León, la Ley 4/2015, del 24 de marzo, crea la categoría de lugares geológicos o paleontológicos de interés especial y permite acuerdos para su gestión, clasificándolos como suelo rústico con protección natural según la Ley 5/1999, del 8 de abril. El Decreto 37/2007, del 19 de abril, de gestión de bienes culturales excluye los restos paleontológicos no humanos. En Cataluña, la Ley 12/1985, del 13 de junio, asigna a las administraciones públicas la protección del patrimonio geológico, y el Decreto Legislativo 1/2010, del 3 de agosto, destaca la necesidad de informes previos para acciones que lo afecten. La Ley 9/1993, del 30 de septiembre, incluye bienes paleontológicos y colecciones mineralógicas en el patrimonio cultural, estableciendo la categoría de zona paleontológica.

Keywords: Autonomous Community, Spain, geoconservation, legislation.

Abstract

In Spain, various legislative approaches address geoconservation. In Aragon, Decree 274/2015, dated September 29, establishes the protection and inventory regime for Geological and Paleontological Sites (LIG). Decree 6/1990, dated January 23, regulates paleontological activities, while Decree 202/2014, dated December 2, incorporates geological heritage into territorial planning and encourages guidelines for mineral and geological resources. In the Basque Country, Law 9/2021, dated November 25, regulates the inventory of LIG. Additionally, Law 6/2019, dated May 9, addresses paleontological activities, and Law 4/1990, dated May 31, defines the category of Special Protection land for Basque LIGs. In Castilla y León, Law 4/2015, dated March 24, establishes the category geological or paleontological sites of special interest and allows for agreements for their management, categorizing them as protected rustic land under Law 5/1999, dated April 8. Decree 37/2007, dated April 19, on the management of cultural assets, excludes non-human paleontological remains. In Catalonia, Law 12/1985, dated June 13, assigns the protection of geological heritage as one of the functions of public administrations, and Legislative Decree 1/2010, dated August 3, emphasizes the need for prior reports on actions affecting it. Law 9/1993, dated September 30, includes paleontological movable assets and mineralogical collections in cultural heritage, establishing the category of paleontological zone.

Papel de la dinámica litoral en la preservación de un afloramiento patrimonial: la superficie de pisadas de El Pichilín (Huelva).

Role of littoral dynamics on the preservation of a heritage outcrop: the footprint surface of El Pichilín (Huelva).

J. A. Morales[1], A. Rodríguez Ramírez[1], E. Mayoral[1], R. Díaz-Delgado[2], J. Duveau[3], I. Díaz-Martínez[4], A. Gómez Olivencia[5] y A. Santos[6]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, CCTH-Centro de Investigación Científico Tecnológico, Campus de El Carmen, Universidad de Huelva, 21071 Huelva, España. jmorales@uhu.es
2 LAST (Remote Sensing & GIS Lab), Estación Biológica de Doñana-CSIC, 41092 Sevilla, España.
3 DFG (Center for Advanced Studies "Words, Bones, Genes, Tools: Tracking Linguistic, Cultural and Biological Trajectories of the Human Past"), Eberhard Karls University of Tübingen, Rümelinstrasse 23, 72070 Tübingen, Alemania.
4 Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, Cantabria, España.
5 Dept. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, España.
6 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 33005 Oviedo, España.

Palabras clave: Paleoicnología, dinámica litoral, patrimonio geológico, preservación.

Resumen

Trabajos previos realizados unos 2 km al NO de la playa de Matalascañas (Almonte, Huelva) han revelado la existencia de varias decenas de pisadas humanas (Mayoral et al., 2021; Mayoral et al., 2022) y cientos de huellas de otros vertebrados del Pleistoceno (Neto de Carvalho et al., 2021). El afloramiento donde aparecen estas huellas se encuentra en la zona intermareal de la playa y está afectado por el oleaje. El descubrimiento coincidió con un periodo de temporales ocurrido durante el periodo de mareas muertas. Estas condiciones dieron lugar a la erosión la playa y al transporte de la arena intermareal hacia zonas más profundas. Sin embargo, temporales posteriores ocurridos durante un periodo de pleamares vivas equinocciales desmantelaron la base del acantilado que se encuentra por detrás del afloramiento, y aportaron arena que enterró de nuevo las huellas contribuyendo a su preservación. Este trabajo estudia la dinámica de la arena en diferentes situaciones de marea y oleaje identificando las condiciones que contribuyen a una mejor preservación del afloramiento patrimonial.

Keywords: Paleoichnology, coastal dynamics, geological heritage, preservation.

Abstract

Previous works developed 2 km at the NW of Matalascañas beach (Almonte, Huelva) have revealed the existence of dozens of human footprints (Mayoral et al., 2021; Mayoral et al., 2022) and hundreds of other Pleistocene vertebrate tracks (Neto de Carvalho et al., 2020). The outcrop where these footprints appear is located on foreshore level and is affected by tidal and wave dynamics. Its discovery coincided with a period of storms during neap tides. These conditions eroded the beach and removed the sand to deeper shoreface areas. However, subsequent storms occurred during high spring tides attacked the base of the cliff behind the outcrop, providing abundant sand that reburied the footprints and contributed to their preservation. This work studies the sand dynamics under different tidal and wave situations, establishing the conditions that contribute to a better preservation of the heritage outcrop.

Referencias

Mayoral, E., Díaz-Martínez, I., Duveau, J. et al. (2021): Tracking late Pleistocene Neandertals on the Iberian coast. *Scientific Reports*, 11: 4103.

Mayoral, E., Duveau, J., Santos, A., et al. (2022): New dating of the Matalascañas footprints provides new evidence of the Middle Pleistocene (MIS 9-8) hominin paleoecology in southern Europe. *Scientific Reports*, 12: 17505.

Neto Carvalho, C., Belaústegui, Z., Toscano, A., et al. (2020): First vertebrate tracks and palaeoenvironment in a MIS-5 context in Doñana National Park (Huelva, SW Spain). *Quat. Sci. Rev.,* 243: 106508.

Uso del decomiso de material geológico sustraído como herramienta de concienciación para la geoconservación.

Using the confiscation of removed geological material as a geoconservation awareness tool.

A. Rodríguez [1] y M. Carreras[2]

1 Comisión de Patrimonio de la Sociedad Geológica de España y Geoservei. c/ Himàlaia, 37 Maó (Menorca). a.rodriguez@geoservei.com
2 Consell Insular de Menorca. Departamento de Medio Ambiente, Reserva de Biosfera y Cooperación. Edificio Es Castellet, ctra. Maó-Es Grau km 0,5 Maó (Menorca). marta.carreras@cime.es

Resumen: La sustracción de elementos geológicos en entornos naturales es una práctica frecuente que puede ponerse de manifiesto en los controles de seguridad aeroportuarios. Se expone el ejemplo de la Reserva de Biosfera de Menorca, en donde el material requisado en el Aeropuerto es clasificado y restituido gracias a la colaboración entre el Consell Insular de Menorca, Mestral Menorca y AENA, que trabajan conjuntamente para devolverlo al medio natural. Aunque hasta el momento no se ha identificado que la sustracción de material haya supuesto un impacto sobre el entorno de la isla, la incautación de material recibe una atención mediática que no se alcanza a través de ninguna de las otras acciones de sensibilización impulsadas por la Agencia Menorca Reserva Biosfera. Por ello, esta acción, conjuntamente con otras relacionadas como la de un llamamiento al retorno de cantos rodados sustraídos a los ecosistemas en el Geolodía Menorca 2023, suponen una excelente oportunidad para promover la conservación del patrimonio geológico.

Palabras clave: concienciación, geoconservación, geodiversidad, sustracción.

Abstract: *Geological elements removal in natural environments is a common practice evidenced in airport security controls. The example of the Menorca Biosphere Reserve is shown, where the material confiscated at the Airport is classified and relocated thanks to the collaboration between the Consell Insular de Menorca, Mestral Menorca and AENA, who work together to return it into the natural environments. Although we do not identify that material removal generates impacts on the environment of the island, the dissemination about confiscations receives a media attention not reached by any other actions promoted by the Menorca BR Agency. Therefore, this action, together with other related actions such as the call for returning pebbles to their environment claimed at the Geolodía of Menorca 2023; represent an excellent opportunity to promote the conservation of geological heritage.*

Key words: *awareness, geoconservation, geodiversity, removal.*

INTRODUCCIÓN

En el año 2013 se establecieron las bases para desarrollar una línea de trabajo en geoconservación en la isla de Menorca bajo el amparo de la Agencia Menorca Reserva de Biosfera del Consell Insular de Menorca. Esta organización especializada, sin personalidad jurídica propia, tiene como principal finalidad cumplir con los objetivos contenidos en la declaración de Menorca como Reserva de Biosfera por el programa MaB (Man and Biosphere) de la UNESCO.

Entre los logros esenciales de esta estrategia de trabajo cabe destacar las labores de inventariado de LIG, centradas en un proceso de participación adaptado a la metodología desarrollada en el IELIG, teniendo en cuenta los inventarios elaborados con anterioridad (Geoservei, 2016) y la habilitación de un centro de interpretación de la geología de Menorca. Este centro dispone de una colección museográfica y actúa como eje vertebrador de la estrategia, al centralizar el desarrollo de actividades educativas, culturales y lúdicas, con la finalidad de fomentar el conocimiento y difundir el valor geológico de la isla (Rodríguez et al., 2017). Además, cabe destacar la incorporación del inventario de LIG a la revisión, aprobada en 2023, del Plan Territorial Insular de Menorca (PTI) que establece, con carácter de instrumento general, la ordenación territorial de la isla. Mediante este instrumento las localidades geológicas inventariadas se consideran suelo rústico protegido. Cuando la delimitación de los LIG recae sobre suelos ya clasificados como urbanos o urbanizables, el PTI establece que será preceptiva la tramitación ante el Consell Insular de Menorca de informe ambiental específico que justifique la no afección a éstos, previamente a la aprobación de la ordenación u obtención de licencia, según corresponda.

En cualquier caso, la divulgación y la educación han sido desde el primer momento el pilar de las actuaciones de geo-conservación desarrolladas en Menorca. Así, de entre todos los logros alcanzados, hay que resaltar el de

consolidar un mensaje sencillo y claro, que hoy en día es utilizado por numerosos centros educativos y otras entidades para enseñar y promover el conocimiento de la geodiversidad menorquina.

Así, el leitmotiv de la estrategia de gecoconservación se centra en el concepto de la *Menorca de los colores* (Obrador, 2010), donde rocas, colores y disposición estructural permiten diferenciar cuatro tipos de paisajes que se pueden identificar con claridad y que representan una potente herramienta para la educación y la divulgación de la geodiversidad insular: la Menorca oscura, roja, gris y blanca. Este discurso, clave para que año tras año el conocimiento de las características geológicas de Menorca vaya creciendo y, en consecuencia, se avance en su preservación, también es utilizado para desarrollar otra actuación de concienciación relacionada con la sustracción de material geológico, que está recibiendo una gran repercusión mediática.

MÉTODOS

Desde el año 2012 el control de seguridad del Aeropuerto de Menorca requisa a los pasajeros cualquier material de naturaleza geológica que transporten en su equipaje de mano. Aunque esta acción nace por motivos de seguridad, con el fin de evitar la introducción en cabina de materiales contundentes que pudieran suponer un peligro durante el trayecto, la implicación de la Agencia Menorca Reserva de Biosfera en la gestión del material decomisado ha permitido acometer acciones de geo-conservación. Cualquier elemento que esté prohibido llevar en el equipaje de mano de un avión y sea requisado en el control de seguridad del Aeropuerto es entregado a Mestral Menorca. Esta entidad concierne a una iniciativa de economía social y solidaria impulsada por Cáritas Diocesana de Menorca que tiene como principal objetivo la inserción socio-laboral de personas en situación o riesgo de exclusión social mediante actividades de reutilización y reciclaje. De este modo, Mestral Menorca recicla e impulsa acciones de reutilización con el material decomisado. En el caso de los elementos geológicos, colabora con la Agencia Menorca Reserva de Biosfera, que clasifica el material para ser devuelto al medio natural (Figura 1).

Mensualmente, Mestral Menorca recoge, cuantifica y deposita temporalmente en sus instalaciones los elementos incautados. Entre el 2015, año en que se empieza a contabilizar este material y, el 2023, se han decomisado 15.094 kg con un promedio de 1.677 kg anuales (Tabla I). Cabe remarcar que este material únicamente corresponde al recogido en el arco de seguridad del Aeropuerto y, por tanto, no se dispone de un control del material geológico sustraído que sale de la isla en el equipaje facturado o en puertos.

Entre el material requisado sobresalen especialmente los cantos rodados, especialmente del Paleozoico, aunque también del resto de las eras representadas en el registro geológico de la isla. Estos cantos son conocidos localmente como *macs*. En un segundo grupo se encuentran otras rocas muy variadas, habitualmente con algún elemento que les confiere un atractivo especial, como pueden ser laminaciones o erosiones, sobre todo, de tipo nido de abeja. Las arenas de las playas forman un tercer grupo tomando como base la abundancia de los materiales sustraídos. De forma más puntual se identifican fósiles y, esporádicamente, minerales.

Cabe señalar que, durante los primeros años de recogida de materiales, era frecuente la presencia de abundante arcilla roja, pero actualmente la identificación de este material entre el material decomisado es muy ocasional. El detrimento de decomisos a este respecto se asocia con un trabajo de concienciación pública que se ha centrado en frenar su aplicación, supuestamente terapéutica, en la piel de bañistas; ya que esta actividad ocasionaba una importante alteración del entorno y manifestaciones de inestabilidad en los acantilados.



FIGURA 1. *Acumulación de material geológico decomisado en el Aeropuerto antes de su clasificación y restitución.*

Año	Material geológico decomisado (kg)
2015	2.086
2016	1.160
2017	1.715
2018	1.683
2019	1.479
2020	1.162
2021	3.904
2022	867
2023	1.038

TABLA I. *Material geológico confiscado en los controles de seguridad del Aeropuerto de Menorca desde el año 2015 (Mestral Menorca).*

Para su retorno, las rocas y los sedimentos se seleccionan en función de las cuatro unidades geológicas principales de Menorca. Hasta el año 2022, este trabajo ha sido desarrollado por el servicio de limpieza de playas siguiendo los criterios técnicos establecidos por el Consell Insular de Menorca y expertos colaboradores. Este servicio, a su vez, es el encargado de devolver el material al medio natural según las unidades geológicas diferenciadas.

En caso de identificar algún elemento de especial valor, éste, es depositado en el Centro de Geología de

Menorca. Aunque los hallazgos de estos elementos son puntuales, es habitual en las tareas de clasificación identificar algunas muestras, correspondientes esencialmente a fósiles, que presentan un interés suficiente para pasar a formar parte de la colección museográfica del Centro de Geología o, como mínimo, que presentan una utilidad especial para el desarrollo de las actividades didácticas y divulgativas que se programan regularmente en el Centro. Por lo tanto, en esta acción se recupera puntualmente patrimonio geológico mueble con la pérdida de buena parte del valor de la muestra, al no disponer ésta de la información sobre el lugar de recogida, aunque muchas veces éste puede aproximarse con certeza.

En 2023 se ha creído oportuno, como una acción más de educación ambiental ligada a la estrategia de geo-conservación, participar en la iniciativa social de Mestral Menorca, involucrando en la acción a los alumnos de uno de los itinerarios formativos del programa de inserción socio-laboral de la entidad. Los alumnos de este programa pre-laboral han asistido a un taller de formación sobre geoconservación y, a continuación, han participado activamente en la clasificación de los elementos requisados según sus características geológicas. Tras la clasificación, los participantes en la actividad, junto el personal técnico de la Agencia Menorca Reserva de Biosfera, han procedido a devolver al campo una parte simbólica del material a su correspondiente unidad geológica.

El material decomisado en el Aeropuerto se asocia esencialmente a los elementos geológicos sustraídos por la actividad turística. Aun así, se debe tener en cuenta que en Menorca es muy habitual encontrar rocas que son utilizadas como elementos decorativos en jardines particulares. Por ello, se ha creído conveniente organizar acciones siguiendo la misma línea, pero enfocadas a la población local. Hasta el momento, la principal actuación dirigida a la sociedad insular se asoció al Geolodía 2023 de Menorca. Paralelamente a la organización de la excursión, se hizo un llamamiento de retorno de unos *macs* característicos a una de las calas, el macar d'Alforinet, por donde transcurrió la actividad. Los cantos rodados de esta cala, asociados a la erosión de los acantilados rojizos del Pérmico y Triásico que la circundan, presentan la especial peculiaridad que habitualmente conservan las laminaciones paralelas o cruzadas en muy buen estado, lo que les confiere un especial atractivo que ha incitado a su sustracción desde hace décadas.

Se invitó a los asistentes al Geolodía a retornar estos cantos en caso de poseerlos, o bien, en caso de no asistir, a depositarlos momentáneamente en el Centro de Geología para ser devueltos por parte de la organización de la actividad. Se recogieron un centenar de *macs*, algunos de ellos sustraídos hasta sesenta años atrás. Se debe destacar que esta zona figura en todos los inventarios de LIG realizados en Menorca, habitualmente incidiendo en sus descripciones en la presencia de estos cantos como un elemento patrimonial más, por lo que, en este caso, esta acción de concienciación se puede considerar también de restablecimiento de patrimonio geológico.

DISCUSIÓN

La afluencia creciente de visitantes en los espacios naturales pone de manifiesto la necesidad de impulsar actuaciones que promuevan el respeto hacia la naturaleza. Entre ellas, se debe encontrar la de evitar la sustracción de elementos del medio, que en caso de concentrarse en lugares concretos pueden significar una amenaza para el entorno (Rebelo, et al., 2022).

En términos generales, se debe contextualizar adecuadamente el impacto de la sustracción de materiales de los ecosistemas. La arena de Menorca presenta una media del 78% de contenido en bioclastos y, los litoclastos (27%) y el cuarzo (6%), son componentes subordinados (Gómez-Pujol, et al., 2017). Sabemos que la producción carbonatada neta de las praderías de la fanerógama marina *Posidonia oceanica* ha sido estimada en Baleares en 65 g por metro cuadrado de pradera y año (Canals y Ballesteros, 1997). También sabemos que la superficie de *Posidonia* en Menorca se ha calculado en 81,8 km^2 (Julià, et al., 2018) lo que permitiría dar lugar a una producción de sedimento anual superior a 5.000 toneladas. Aunque una parte de este sedimento puede salir del sistema playa-duna o permanecer en la propia pradería, una cantidad indeterminada, pero nada despreciable, pasará a formar parte de las playas. Con este simple cálculo, podemos afirmar que la sustracción y restitución descrita en el presente artículo es insignificante si se compara con la importancia que para el mantenimiento de las playas presenta la conservación de las praderías y bermas de *Posidonia*, entre otros elementos del sistema, como son las dunas. Por este motivo y otros, es fundamental reducir al mínimo posible la retirada mecánica de restos de *Posidonia* de las playas, ya que el 82% del volumen retirado corresponde a sedimentos (Roig-Munar, F. X., et al., 2019).

Respecto a las rocas y, entre ellas, especialmente, a los cantos rodados, no se ha identificado ningún espacio donde se manifieste un detrimento del material geológico asociado a su sustracción. Aun así, existe el riesgo que esta acción suponga un impacto sobre el medio si se acaba volviendo frecuente en un espacio específico con un interés singular como podría ser el caso del macar d'Alforinet. Además, no se debe obviar la pérdida de patrimonio asociada en especial a fósiles de interés, habitualmente relacionados con icnofósiles del Paleozoico.

En cualquier caso, el planteamiento de las actuaciones descritas recibe un impacto mediático que representa una excelente oportunidad para la concienciación. Habitualmente, las acciones asociadas al trabajo en geo-conservación de Menorca reciben una atención de los medios de comunicación muy discreta que se limita, en el mejor de los casos, a alguna reseña o mención en los medios locales. En cambio, la sustracción del material decomisado en el Aeropuerto y las actuaciones asociadas despiertan un inusitado gran interés que no es comparable con ninguna otra actuación

impulsada desde la Agencia Menorca Reserva de Biosfera. La noticia se cubre ampliamente en los medios de comunicación locales y autonómicos, pero también despierta el interés en medios de ámbito nacional o de otras comunidades autónomas: en prensa (La Vanguardia, El País, El Periódico, El Mundo), radio (Cadena SER, COPE) o televisión (Antena 3, TV3).

Además, a partir de la recopilación de noticias y entrevistas efectuadas sobre el tema, se constata que la repercusión es mucho más importante si se plantea una clasificación y restitución que si únicamente se decomisa el material en el Aeropuerto. Así, en la acción de 2023 la atención de los medios ha sido mucho más notable que en años anteriores, un efecto que puede que sea debido a la novedad de participación en el programa de inserción socio-laboral de Mestral Menorca. Aunque el foco de atención de los periodistas se centra en la sustracción y la actuación que deriva de ella, las entrevistas efectuadas permiten exteriorizar entre un público poco habitual y muy amplio la estrategia de geo-conservación de Menorca y la necesidad de protección de la geodiversidad y el patrimonio geológico.

En el caso de la actividad de restitución relacionada con el Geolodía 2023, el impacto mediático no tuvo alcance nacional, pero sí fue muy importante a escala local y autonómica, siendo también objeto de entrevistas y encuestas en prensa o debates en la televisión autonómica de baleares (IB3) y en redes sociales. Además, su repercusión permitió ampliar con creces el conocimiento del Geolodía en las Islas Baleares, un hecho que se manifestó al recibir el mayor número de peticiones de información e inscripción desde su primera edición en Menorca en 2012.

CONCLUSIONES

La sustracción de elementos geológicos genera un interés mediático entre la sociedad que difícilmente es equiparable con ningún otro episodio asociado al ámbito de actuación de la Agencia Menorca Reserva de Biosfera. Su tratamiento, convenientemente asociado a acciones de clasificación, retorno al medio natural y educación representan una oportunidad única para promover el respeto hacia la geodiversidad que va mucho más allá del material que es restituido.

Por ello, en el caso particular de la Reserva de Biosfera de Menorca, además de seguir dando continuidad a las acciones desarrolladas, tanto relacionadas con el material requisado en el Aeropuerto como con actividades divulgativas como el Geolodía, resultaría de interés impulsar campañas de concienciación con la implicación del Aeropuerto y el sector turístico que utilicen el material confiscado como punta de lanza para fomentar la valorización de la geodiversidad en general y del patrimonio geológico en particular.

El conocimiento del volumen de material decomisado genera inquietud entre una parte del público receptor de los medios de comunicación y, especialmente, entre el local o el que mantiene un vínculo con el territorio afectado. En definitiva, despierta un sentimiento de preocupación entre parte de la sociedad hacia la geo-conservación.

REFERENCIAS

Canals, M. y Ballesteros, E. (1997): Production of carbonate sediments by phytobenthic communities in the Mallorca-Minorca Shelf, Northwestern Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part II*, 44: 611-629.

Geoservei (2016): *Inventari de Llocs d'Interès Geològic de la Reserva de Biosfera de Menorca.* Informe inédito, Agencia Menorca Reserva de Biosfera del Consell Insular de Menorca, 271 p. http://www.biosferamenorca.org/documents/documents/3561doc2.pdf

Gómez-Pujol, L., Compa, M., Orfila, A., Álvarez-Ellacuría, A., Balaguer, P., Roig-Munar, F.X., Fornós, J.J. y Tintoré, J. (2017): Las playas de Menorca: naturaleza y distribución. En: Gómez-Pujol, L. y Pons, G.X., (eds.), *Geomorfología litoral de Menorca: dinámica, evolución y prácticas de gestión.* Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, Societat d'Història Natural de Balears, Palma, 25: 67-85.

Julià, M., Marsinyach, E., Sales, M. y Carreras, D. (2018): *Actualización de la cartografía combinada de los fondos marinos de Menorca: compilación de capas y comunidades bentónicas.* Observatorio Socioambiental de Menorca del Institut Menorquí d'Estudis y Agencia Menorca Reserva de Biosfera del Consell Insular de Menorca, 45 p.

Rebelo, A.C., Martín-González, E., Melo, C.S., Johnson, M.E., González-Rodríguez, A., Galindo, I., Quartau, R., Baptista, L., Ávila, S.P. y Rasser, M.W. (2022): Rhodolith beds and their onshore transport in Fuerteventura Island (Canary Archipelago, Spain). *Frontiers in Marine Science* 9:917883. doi: 10.3389/fmars.2022.917883.

Rodríguez, A., Gelabert, B. y de Pablo, F. (2017): Paisaje y Geología: un proyecto de geoconservación centrado en el geodiversidad insular. En: Carcavilla, L., Duque-Macías, J., Giménez, J., Hilario, M., Monge-Gamuzas, M., Vegas, J., y Rodríguez, A. (eds.), *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*. Cuadernos del Museo Geominero, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 21: 477-499.

Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.Á., y Gelabert-Ferrer, B. (2019): Cuantificación de la pérdida de sedimento por la retirada mecánica de bermas *(banquettes)* de *Posidonia oceanica* en las playas de las islas Baleares: consecuencias geomorfológicas. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32(2): 73-86.

Obrador, A. (2010): Geología y estanques temporales. En: Fraga, P., Estaún, I. y Cardona, E. (eds.), *Estanques temporales mediterráneos. LIFE BASSES: gestión y conservación en Menorca.* Col. Recerca. Institut Menorquí d'Estudis, Maó, 15: 52-77.

Caracterización del sector profesional de la geo-conservación en España (2024).

Characterisation of the professional geo-conservation sector in Spain (2024).

A. Rodríguez-Florit[1], N. Herrero-Martínez[2], J.C. Utiel-Alfaro[3] y M. Monge-Ganuzas[4]

1 Comisión de Patrimonio de la Sociedad Geológica de España y Geoservei. c/ Himàlaia, 37, Maó, Menorca. a.rodriguez@geoservei.com
2 Comisión de Patrimonio de la Sociedad Geológica de España y Direcció General de Polítiques Ambientals i Medi Natural, Generalitat de Catalunya. c/ del Foc, 57, Barcelona. nherrero@gencat.cat
3 Comisión de Patrimonio de la Sociedad Geológica de España y Asociación Geocientífica de Burgos. Trasera de los Mesones, 5 Bajo A, Lerma, Burgos. utilerma@gmail.com
4 Comisión de Patrimonio de la Sociedad Geológica de España. Aita Luis Villasante 9, Gernika-Lumo, Bizkaia. presidencia.patrimoniogeo.sge@gmail.com

Resumen: La Comisión de Patrimonio Geológico de la Sociedad Geológica de España (CPG-SGE), fundada en 1993, busca fomentar la investigación, conservación, gestión y divulgación del patrimonio geológico y la geodiversidad en España. Para entender mejor el perfil de los profesionales en geo-conservación, la CPG-SGE llevó a cabo dos encuestas en 2019 y 2023, obteniendo respuestas de 101 participantes. Los encuestados, mayoritariamente hombres (81%), de edades entre 51 y 67 años, con formación universitaria (81% con doctorado, máster o postgrado), trabajan principalmente en la administración (62%), en geoparques o en educación formal. Aunque predominantemente trabajan en su comunidad autónoma de residencia, un 77% es activo en varias regiones. Se destaca una alta empleabilidad (89% en actividad), con el 69% trabajando en múltiples ámbitos relacionados con la geo-conservación. La experiencia mayoritaria se centra en divulgación e interpretación geológica (79%), con un 50% acumulando más de 15 años en la disciplina. A pesar de esto, el porcentaje de tiempo dedicado a la geo-conservación es mayormente reducido (59% entre 1-20%). El sondeo revela la falta de relevancia de la geo-conservación en el sector privado y una baja dedicación laboral al campo. Además, resalta la necesidad de formación en legislación y señala la urgencia de involucrar a la juventud y aumentar la presencia femenina en la geo-conservación en España. Los resultados plantean retos cruciales para el futuro de la disciplina en el país.

Palabras clave: diagnóstico, España, geo-conservación.

Abstract: *The Geological Heritage Commission of the Spanish Geological Society (CPG-SGE), established in 1993, aims to promote research, conservation, management, and dissemination of geological heritage and geodiversity in Spain. In order to better understand the profile of professionals in geo-conservation, the CPG-SGE conducted two surveys in 2019 and 2023, obtaining responses from 101 participants. The respondents, predominantly male (81%) and aged between 51 and 67 years, with university education (81% holding a Ph.D., master's, or postgraduate degree), primarily work in administration (62%), in UGGps or formal education. Although they mainly work in their autonomous community of residence, 77% are active in various regions. A high employability rate is highlighted (89% currently active), with 69% working in multiple areas related to geo-conservation. The majority of experience focuses on geological outreach and interpretation (79%), with 50% accumulating over 15 years in the discipline. Despite this, the percentage of time dedicated to geo-conservation is mostly limited (59% between 1-20%). The survey reveals the lack of relevance of geo-conservation in the private sector and a low dedication to the field. Additionally, it underscores the need for training in legislation and emphasizes the urgency of involving youth and increasing female representation in geo-conservation in Spain. The results pose crucial challenges for the future of the discipline in the country.*

Key words: *diagnosis, geo-conservation, Spain.*

INTRODUCCIÓN

La Comisión de Patrimonio Geológico de la Sociedad Geológica de España (CPG-SGE), creada en 1993, tiene como objeto primordial promover la investigación, conservación, uso, gestión y divulgación acerca de la Geodiversidad y del Patrimonio Geológico. Para poder realizar esta labor de la mejor manera posible, ha considerado conveniente conocer el perfil de los profesionales del sector de la geo-conservación de España, mediante la caracterización de su experiencia laboral y de su relación con la geo-conservación, así como, sus temas de trabajo y sus necesidades de formación.

Para caracterizar la actividad profesional y científica entorno a la geo-conservación en España, la CPG-SGE ha realizado dos encuestas dirigidas a todas aquellas

personas que de un modo u otro están vinculadas a este sector. La estructura de los sondeos se basó en la caracterización del sector profesional de la interpretación del patrimonio en España generada en el Seminario de Interpretación del Patrimonio del Centro Nacional de Educación Ambiental del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Este trabajo se inició en 2016, aunque fue revisado posteriormente y también contó con dos fases (Morales y Benítez, 2024).

La primera de las encuestas del sector geo-conservacionista se realizó en 2019, mientras que para matizar ciertos aspectos de su contenido y observar si existe algún tipo de evolución en este sector, se implementó un segundo sondeo en 2023. Para facilitar su comparación, las encuestas presentaron una estructura similar centrada en veinte preguntas. Sin embargo, las encuestas presentaron ciertas diferencias. Mientras la primera presentaba unas cuantas preguntas de respuesta abierta, la de 2023 presentaba preguntas cuya respuesta estaba acotada. Esta acotación pudo ser concretada a partir de las respuestas obtenidas en la de 2019.

RESULTADOS

El cuestionario de 2019 fue respondido por 57 personas y el de 2023 por 68. Un total de 24 participantes contestaron a las dos encuestas, por lo que entre ambas se obtuvo la participación de 101 profesionales residentes en España que presentan diferente grado de dedicación laboral con la geo-conservación.

El género de los encuestados coincidió en ambos sondeos, el 81% de las personas que participaron marcaron la opción de sexo masculino y el 19% restante la de femenino. Respecto a la edad, predominó el rango entre los 51 y los 67 años, que representó el 61% de las respuestas en 2019 y el 59% en 2023. Las personas más jóvenes, entre 18 y 30 años, representaron una única respuesta entre ambas encuestas y las mayores de 67 años supusieron un 5% en 2019 y un 12% en 2023. Se identificó que las mujeres participantes son algo más jóvenes que los hombres, ya que el rango de edad más representado de sexo femenino fue 41 a 60 años y el de masculino de 51 a 67 años.

Todas las personas que contestaron a las encuestas cuentan con titulación universitaria (licenciatura/grado) y un 81% ha cursado un doctorado, master o postgrado. Su formación académica está esencialmente asociada a la geología. Fuera de esta, se registraron cinco titulaciones relacionadas con ingeniería de minas, tres en geografía, dos en biología y una en derecho. El colectivo que respondió a los sondeos forma mayoritariamente parte de la CPG-SGE con un 98% de los participantes en la encuesta de 2019 y un 73% en la de 2023. Esta diferencia se debe a que en 2023 se solicitó al Foro Español de Geoparques y a la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (SEDPGYM) su colaboración en la difusión del sondeo, lo que implicó una mayor participación de profesionales no vinculados a la CPG-SGE.

Respecto al lugar de residencia habitual de los participantes en las encuestas, cabe señalar que los sondeos recibieron respuestas desde todas las comunidades autónomas. Entre ellas, Madrid y Andalucía fueron las más identificadas, mientras que, por el contrario, desde la Rioja e Illes Balears se recibió una única respuesta de ambas. Mayoritariamente, las personas que contestaron a las encuestas desarrollan su actividad en la misma comunidad autónoma en la que residen. De todos modos, el 77% de los encuestados de ambos sondeos respondió que trabajaba en varias comunidades. Andalucía, Aragón y Castilla y León se correspondieron con las comunidades con más respuestas en este sentido, mientras que Navarra, La Rioja y, especialmente, Illes Balears fueron las que menos. Las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla recibieron 2 y 1 respuestas respectivamente. Por otro lado, el 21% de los participantes del sondeo de 2019 y el 24% del de 2023 manifestó que trabajaba en el ámbito internacional.

El grado de empleabilidad de las personas participantes es elevado. Así, un 89% indicó que se encontraba en activo, un 13% en situación de jubilación, mientras que únicamente dos personas de la encuesta de 2023 señalaron estar en una situación de desempleo. Existe entre los encuestados un predominio importante de trabajadores en la administración (62%), especialmente relacionados con el personal funcionario (46%), frente el 18% que respondió que trabajaba por cuenta propia y el 8% por cuenta ajena (Fig. 1). Un 28 y 34% indicó que tenía personal a su cargo, mientras que el 86 y 97% señaló que colabora con otras personas o entidades con el siguiente orden de asiduidad: administraciones públicas, empresas y personas autónomas.

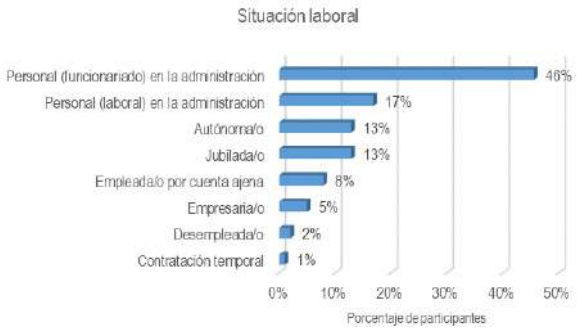


FIGURA 1. Situación laboral de los participantes de los sondeos de 2019 y 2023.

Un 77% de los encuestados en 2019 y un 93% de los de 2023 afirmaron contar con formación y/o experiencia en geo-conservación. Habitualmente, los encuestados apuntaron que su experiencia abarcaba más de un ámbito de trabajo. Por lo tanto, para el post-proceso de los datos obtenidos, acotamos siete grupos relativos a los ámbitos de trabajo identificados. El desarrollo de actividades relacionadas con la divulgación y la interpretación de la geodiversidad y del patrimonio geológico (1) representó, con diferencia, el principal campo de experiencia profesional entre las personas encuestadas. La siguieron las asociadas a la elaboración de inventarios (2), a la

educación formal (3) y a la investigación y diagnosis del estado de conservación del patrimonio geológico (4). Con menor representación se identificaron actuaciones relacionadas con el turismo geológico (5) y la gestión de espacios naturales (6), esta última, habitualmente relacionada con aspectos ligados a la legislación. Más puntalmente se señaló la experiencia relacionada con el patrimonio mueble y la gestión de museos (7).

El 50% de las personas que participaron en el sondeo de 2019 y el 53% del de 2023 señaló que su experiencia en geo-conservación es superior a 15 años. El resto de participantes se distribuyó de forma más o menos equitativa entre las siguientes categorías de menor experiencia señaladas en la encuesta. Cabe señalar que, aunque el puesto de trabajo de los profesionales esta muchas veces vinculado con la geo-conservación, no significa que el porcentaje de trabajo habitual dedicado a ella sea elevado en todos los casos. Así, los resultados reflejan que el porcentaje de trabajo habitual dedicado a la geo-conservación es principalmente reducido. De este modo, el 59% (el 56% de 2019 y el 62% de 2023) de las personas encuestadas lo estimaron entre un 1 y un 20%. El 27% de participantes señalaron un porcentaje mayor del 40%, entre los cuales, en un 15% de encuestados era superior al 60% (Fig. 2).



FIGURA 2. Porcentaje de trabajo habitual destinado a la geo-conservación estimado por los participantes de las encuestas de 2019 y 2023.

Los puestos de trabajo u ocupación principal de los encuestados se asocian predominantemente con los del perfil de técnico e investigadores en organismos públicos, seguidos de puestos localizados en el ámbito universitario. En cualquier caso, los ámbitos laborales indicados por los encuestados fueron muy variados. Un 69% de los encuestados en ambos sondeos desarrolla su trabajo en dos o más de los ámbitos apuntados en la encuesta. Estos campos de trabajo se encuentran mayoritariamente relacionados con la educación formal, los geoparques y parques geológicos y los espacios naturales protegidos. Les siguen la gestión pública, la educación ambiental, los equipamientos de uso público (centros de visitantes, de interpretación, etc.) y el sector turístico (Fig. 3).

En consonancia con los datos recogidos relativos a la experiencia de las personas encuestadas, entre las competencias que desenvuelven los encuestados en su actividad laboral referida a la geo-conservación destaca muy especialmente la de divulgación e interpretación del patrimonio geológico para el público general, desarrollada por un 79% de los participantes de ambas encuestas. La siguen la investigación y la realización de inventarios y propuestas de LIG. En un tercer orden de acciones se encuentra la educación formal, el desarrollo de acciones específicas en geo-conservación y la relacionada con el geoturismo y los geoparques. En menor medida se recogieron las relacionadas con la educación ambiental, el uso público de los LIG, la gestión de espacios naturales, los museos y el patrimonio mueble, la redacción y revisión de normativas y marco legislativo y, por último, los trabajos de asesoramiento (Fig. 4).

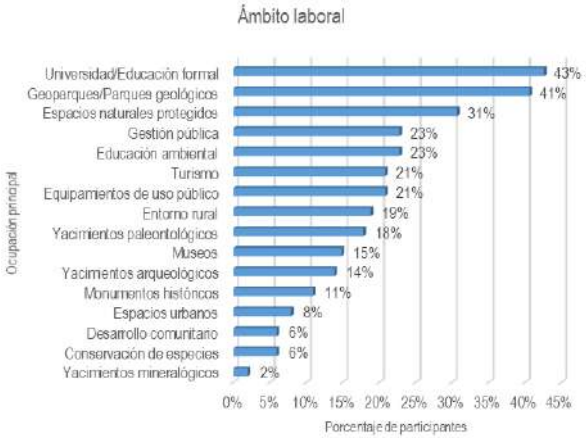


FIGURA 3. Porcentaje de participantes de las encuestas de 2019 y 2023 que desarrolla cada ámbito laboral considerado.



FIGURA 4. Tipos de competencias en geo-conservación consideradas en los sondeos de 2019 y 2023 y porcentaje de participantes en las encuestas que desarrollan cada una.

En relación a la formación necesaria para desarrollar mejor el trabajo en geo-conservación, en el sondeo de 2019 esta cuestión se formuló como una pregunta abierta y un 44% de los encuestados no aportó ninguna respuesta al respecto. En cambio, al proponer varias opciones en la de 2023, un 91% de los participantes manifestó su necesidad en formarse en geo-conservación en diferentes ámbitos, frente al 9% que indicó que no tenía necesidad. La variedad de respuestas en esta última encuesta de 2023

fue considerable, pero destacó, por encima del resto, la relacionada con la necesidad de conocimiento de los avances en normativas de legislación nacional, comunitaria e internacional, señalada por el 52% de los participantes. La siguieron aquellas asociadas al seguimiento e indicadores para la gestión y uso público de la geo-conservación y la planificación y gestión en geoparques mundiales de la UNESCO y entorno rural, ambas manifestadas por el 41% de los participantes. Con un porcentaje similar se recogió la formación en conceptos básicos y aplicaciones de la geo-conservación con un 40%. En un tercer lugar, pero también destacables, aparecieron las necesidades relacionadas con la elaboración de inventarios (31%), la planificación de espacios protegidos (29%), la restauración de entornos degradados (28%) y la gestión del patrimonio mueble (27%).

Finalmente, los sondeos preguntaron a los encuestados acerca la pertenencia a asociaciones profesionales o entidades vinculadas a la geo-conservación en España. Aparte de la CPG-SGE, un 53% de los participantes de la encuesta de 2019 y un 56% de la de 2023 afirmó pertenecer a alguna entidad que agrupa profesionales relacionados con esta disciplina. De 37 entidades citadas, destaca con un mayor número de respuestas la SEDPGYM (15%), seguida de la Red Mundial de Geoparques (7%), ProGEO (6%) y el ICOG (4%). El resto fueron indicadas por entre una y tres personas y hacen referencia tanto a otras entidades internacionales (IUGS, UICN, EuroGeoSurveys), como a otras sociedades de ámbito nacional (AEPECT, SEP), provincial o autonómico (Asociación Geología de Segovia, Associació de Geòlegs de les Illes Balears, Asociación Geocientífica de Burgos o Asociación Geológica de Extremadura, entre otras) o grupos de divulgación (Divulgación de Geología en Ávila o Universidad de Alicante).

DISCUSIÓN

El perfil tipo de la persona que trabaja en geo-conservación en España es el de un hombre, con edad comprendida entre los 51 y los 67 años, doctor, miembro de la CPG-SGE, que vive en Madrid y presenta un ámbito geográfico de trabajo amplio comprendido en España. Es en las comunidades autónomas de Castilla y León, Aragón y Andalucía en donde más se trabaja en geo-conservación en España y, por el contrario, en Navarra, La Rioja y Illes Balears, Ceuta y Melilla, está el menor número de personas dedicadas a esta disciplina. Su trabajo se desarrolla en la administración como personal funcionario, en geoparques mundiales de la UNESCO o en educación formal. No tiene personal a su cargo y colabora habitualmente con otras personas o entidades. Tiene más de 15 años de experiencia en geo-conservación y su conocimiento profesional en este campo proviene principalmente del desarrollo de actividades relacionadas con la divulgación y la interpretación de la geodiversidad y del patrimonio geológico. Su porcentaje de dedicación laboral a la geo-conservación es bajo.

Estos datos son preocupantes ya que se observa que la comunidad geo-conservacionista en España está claramente envejecida, no tiene un relevo generacional, y está distribuida geográficamente y temáticamente de una manera no equitativa en relación a las comunidades autónomas y las líneas de trabajo desarrolladas, respectivamente. Además, se observa también que la geo-conservación no ha arraigado ni genera trabajo significativo en el sector privado y que la dedicación a la geo-conservación de las personas que se dedican a ella es pequeña, pese a existir obligaciones normativas en las administraciones públicas españolas. Del sondeo efectuado también se deriva que entre las necesidades de formación de los encuestados predomina la relacionada con adquirir conocimientos relacionados con la legislación española. También se destaca la de obtener herramientas de seguimiento e indicadores de gestión y las relacionadas con los geoparques mundiales de la UNESCO. Estas necesidades junto con la caracterización de los geo-conservacionistas españoles son especialmente interesantes para diseñar las líneas futuras de trabajo de la CPG-SGE.

CONCLUSIONES

Del análisis de los sondeos expuestos se obtiene una primera caracterización del sector profesional de la geo-conservación sobre la que seguir profundizando, así como, orientaciones y aprendizajes a considerar en posteriores sondeos que se puedan realizar en el futuro.

Los resultados de las encuestas efectuadas ponen de manifiesto la necesidad de trabajar en incorporar a la juventud en las acciones geo-conservacionistas y en lograr un mayor protagonismo de las mujeres en el sector de la geo-conservación. Además, ponen el foco de atención en un conjunto de comunidades autónomas en donde se debe fomentar especialmente la geo-conservación. También permiten plantear entornos de colaboración en los actores identificados para lograr una mayor promoción de la geo-conservación.

Consideramos que de estas encuestas se derivan importantes retos para la geo-conservación en España: (1) necesitamos incrementar la dedicación a la geo-conservación en el trabajo habitual de los geo-conservacionistas; (2) debemos lograr una mayor presencia del sector privado en las acciones de geo-conservación; (3) debemos impulsar el desarrollo de competencias sobre la geo-conservación que vayan más allá de la divulgación e interpretación del patrimonio geológico para de esta manera, por un lado, atraer a la juventud hacia esta disciplina y por otro, aumentar las temáticas de trabajo geoconservacionista en España.

REFERENCIAS

Morales, J. y Benítez, M. (eds.) (2024): *Boletín de Interpretación. Marzo de 2024.* Asociación para la Interpretación del Patrimonio, 49. ISSN 1886-8274. https://interpretaciondelpatrimonio.com/boletin/

Puesta en valor y divulgación del patrimonio geológico fuera del IELIG: el caso de la costa de Gáldar (NO de la isla de Gran Canaria).

Highlighting and dissemination of geological heritage not identified in the Spanish Geosite Inventory: the case of the coast of Gáldar (NW of Gran Canaria Island).

A.J. Rodríguez-Rubio[1] y J. Mangas[1]

1 IOCAG, Instituto de Oceanografía y Cambio Global. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 35017 Las Palmas.
alejandro.rodriguez128@alu.ulpgc.es, jose.mangas@ulpgc.es

Palabras clave: geodiversidad costera, patrimonio geológico, LIG municipales, geo-rutas, Gáldar.

Resumen

300 Lugares de Interés Geológico (LIG) se han determinado en el archipiélago canario, dentro del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG), de ellos 53 LIG en la isla de Gran Canaria (Galindo et al., 2022). En los 24 km de costa en el municipio de Gáldar, no se han definido LIG y la única publicación que existe es el mapa geológico a escala 1:25.000. Por ello, en este trabajo se han caracterizado materiales, geoformas y estructuras de origen volcánico (Grupo Post Roque Nublo) y sedimentario (marino y terrestre), formadas desde el Pleistoceno medio hasta la actualidad. Así, para su puesta en valor y difusión se han definido 4 LIG, una georruta costera completa de 24 km, tres geo-rutas parciales de 8 km cada una, una georruta inclusiva en Sardina del Norte, una geo-ruta marítima en barco desde el Puerto de Sardina del Norte al Puerto de Las Nieves, y la terminación de la geo-ruta jacobea entre volcanes en el Faro de Sardina del Norte. Con estas estrategias de divulgación se pretende transferir conocimientos geológicos a las administraciones y, además, van a ser la base para futuros trabajos científicos, de divulgación educativa y geoturismo.

Key words: coastal geodiversity, geological heritage, municipal geosites, geo-routes, Gáldar.

Abstract

Among the 300 geosites in the Canary Archipelago (Spain) identified in the Spanish Inventory of Geosites (IELIG by its initials in Spanish), 53 are found on the island of Gran Canaria (Galindo et al., 2022). However, no geosite was identified along the 24 km of coastline in the municipality of Gáldar. The only relevant publication on this regard is a geological map at a scale of 1:25,000. In this study, a characterization of the materials, landforms and structures of volcanic (Post-Roque Nublo Group) and sedimentary (marine and terrestrial) origin formed from the Middle Pleistocene to the present is therefore. With the aim of highlighting and disseminating their importance, we identify 4 geosites, a coastal geo-route of 24 km comprised by three partial geo-routes of 8 km each, an inclusive geo-route in Sardina del Norte, a maritime geo-route by boat from the Port of Sardina del Norte to Puerto de Las Nieves, and the end of the Jacobean Camino de Santiago Among Volcanoes at the Sardina del Norte Lighthouse. The intention of this study is to communicate to the administrations the geological knowledge acquired and to establish the basis for future scientific work, educational transfer and the promotion of geotourism activities.

References

Galindo, I., Martín-González, E., Sánchez, N., Vegas, J., Romero, C., Lozano, G., Márquez, E., Coello, J.J., Casillas, R., Martín-Luis, C., León, R., Vázquez, J.T., Yepes J. y Mangas J. (2022). *Geo-Temas*, 19, 28-31.

Pangea Database®: Una vía hacia la estandarización de datos del patrimonio geológico y paleontológico mueble

Pangea Database®: A Pathway to the Standardization of movable Geological and Paleontological Heritage Data

M. Roquet[1], V. Vicedo[1], Y. Díaz-Acha[1], M. Campeny[1]

1 Museu de Ciències Naturals de Barcelona, Passeig Picasso s/n, 08003, Barcelona, España. cmcnb_pangeadb@bcn.cat, mcampenyc@bcn.cat, ydiaz@bcn.cat, vvicedov@bcn.cat

Palabras clave: Pangea Database®, Colecciones, Tesauros, Datos, Estandarización.

Resumen

Pangea Database® es una herramienta informática desarrollada por el Museu de Ciències Naturals de Barcelona para gestionar el patrimonio geológico y paleontológico mueble (Roquet *et al.,* 2019). Esta innovadora aplicación permite la gestión integral de las colecciones científicas, almacenando información detallada de los ejemplares en múltiples campos y facilitando la vinculación de imágenes y todo tipo de archivos. El potencial de PangeaDB® radica no solamente en su capacidad como gestor, sino, también, en que la totalidad de los datos introducidos están estandarizados. La elaboración de listados cerrados y tesauros jerárquicos, siguiendo estándares nacionales e internacionales, limita la introducción aleatoria de información, reduciendo así la posibilidad de errores. Esta metodología asegura la calidad de los datos asociados a los especímenes, facilitando su explotación, divulgación y uso. Este proyecto, ejemplo de co-creación, ha sido posible gracias a la colaboración de diversos técnicos especialistas en distintas áreas, que han trabajado en equipo para depurar y homogeneizar los datos para su uso común. Actualmente, el proyecto se desarrolla en colaboración con otras instituciones y dentro del ámbito de la Xarxa de Museus de Ciències Naturals de Catalunya, con el objetivo de ampliar la diversidad y, por ende, la riqueza de la información estandarizada. A largo plazo, se busca afianzar y ampliar la colaboración interinstitucional para disponer de listados y tesauros de términos científicos, geográficos, etc., facilitando la transferencia del conocimiento e impulsando el uso de las colecciones de rocas, minerales y fósiles.

Keywords: Pangea Database®, Collections, Thesauri, Data, Standardization.

Abstract

Pangea Database® is a computer tool developed by the Museu de Ciències Naturals de Barcelona for managing movable geological and paleontological heritage (Roquet et al., 2019). This innovative application enables comprehensive management of scientific collections by storing detailed information about specimens in multiple fields and facilitating the linking of images and various types of files. The potential of PangeaDB® lies not only in its management capabilities, but also in the standardization of all entered data. The creation of closed lists and hierarchical thesauri, following national and international standards, restricts the random input of information, thereby reducing the possibility of errors. This methodology ensures the quality of data associated with specimens, facilitating their exploitation, dissemination, and use. This project, an example of co-creation, has been made possible through the collaboration of various technical specialists in different areas who have worked together to refine and standardize data for common use. Currently, the project is being developed in collaboration with other institutions and within the framework of the Xarxa de Museus de Ciències Naturals de Catalunya, aiming to expand the diversity and, consequently, the richness of standardized information. In the long term, the goal is to strengthen and expand inter-institutional collaboration to have lists and thesauri of scientific, geographical terms, etc., facilitating the transfer of knowledge and promoting the use of rock, mineral, and fossil collections.

Referencias

Roquet, M., Campeny, M., Díaz-Acha, Y., Díaz-Ontiveros, I., Duque, S., Robles-Salcedo, R. Troya, L. Vicedo, V. (2019). En: *XXIII Bienal de la Real Sociedad Española de Historia Natural.* Libro de resúmenes, 265-266.

La subzona de Villarroya del Cabalgamiento de Cameros (LIG IB004), un lugar con una excepcional asociación patrimonial.

The subzone of Villarroya of the Cabalgamiento de Cameros (LIG IB004), a place with an exceptional heritage association.

L. Otaño[1], C. Laplana[2], M. A. Galindo-Pellicena[3], A. Garzón[4], C. Ezquerro[1], A. Muñoz[5], E. L. Pueyo[6]

1 Asociación de Amigos de Villarroya, c/ Capellanía 19, CP26587 Villarroya, La Rioja luis.otano@unirioja.es
2 Centro Mixto UCM-ISCIII de Evolución y Comportamiento Humanos, C/Monforte de Lemos 5, Madrid.
3 Museo Arqueológico y Paleontológico de la Comunidad de Madrid. Pza. Bernardas s/n, 28801 Alcalá de Henares, Madrid.
4 Jardín Botánico de La Rioja (JBLR) Carretera N-120, Km 32, 26323 Azofra, La Rioja.
5 Área de Estratigrafía. Dpto Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
6 IGME (CSIC), Unidad de Zaragoza. Campus Aula Dei, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. unaim@igme.es

Resumen: El Cabalgamiento de Cameros incluye una subzona en el área situada al este del mismo, que incluye al pueblo de Villarroya y en la que se encuentra una asociación múltiple de distintos tipos de patrimonios. Respecto del patrimonio de tipo natural, contiene el patrimonio geológico propio del Cabalgamiento de Cameros y las facies Escucha. Además, sobre el suelo antropizado por la explotación minera de carbón (escombreras) se ha desarrollado una población de al menos 13 especies de orquídeas que suponen un patrimonio natural de alto valor, en este caso de tipo biológico. La propia explotación de las minas de carbón, a su vez origina un patrimonio cultural. El patrimonio cultural existente en la zona es de tipo inmueble y está integrado por los edificios mineros y las escombreras de las minas. También la zona presenta patrimonio cultural mueble en cuanto a que disponemos de minerales singulares. La explotación minera a su vez ha producido un patrimonio cultural inmaterial como el culto religioso y la celebración de la fiesta de Santa Bárbara, patrona milagrosa del pueblo de Villarroya. La zona se encuentra ubicada en la Reserva de la Biosfera de los valles del Leza, Jubera Cidacos y Alhama en La Rioja.

Palabras clave: Villarroya, Patrimonio, Minas de carbón, Orquídeas

***Abstract*:** *The Cameros overthrust includes an eastern subzone which includes the village of Villarroya and in which there is a multiple association of different types of heritage. Regarding the natural heritage, it contains the geological heritage of the Cameros Overthrust and the Escucha facies. Moreover, on the soil anthropized by coal mining exploitation (slag heaps), a population of at least 13 species of orchids has developed that represent a high-value natural heritage, in this case of a biological type. The exploitation of coal mines itself, in turn, creates a cultural heritage. The existing cultural heritage in the area is real estate and is made up of mining buildings and mine tailings. The area also presents movable cultural heritage in that we have unique minerals. Mining exploitation, in turn, has produced intangible cultural heritage such as religious worship and the celebration of the festival of Santa Bárbara, miraculous patron saint of the town of Villarroya. The area is located in the Valles del Leza, Jubera, Cidacos y Alhama Biosphere Reserve in La Rioja.*

Key words: *Villarroya, Heritage, Coal mines, Orchids,*

INTRODUCCIÓN

El Cabalgamiento de Cameros fue inventariado como Lugar de Interés Geológico (LIG) IB004 en 2013. La extensión total de este sitio es de 2543,86 Ha. El LIG IB004 está dividido en dos subzonas. Sobre la subzona situada al este se encuentra la localidad de Villarroya. Por otro lado, el espacio forma parte de la Reserva de la Biosfera de los Valles del Leza, Jubera, Cidacos y Alhama (comúnmente denominada Reserva de la Biosfera de La Rioja).

En la subzona de Villarroya los materiales superiores de edad Jurásica están dispuestos por encima de facies Escucha de edad Cretácica y a su vez estos materiales cabalgan por encima del Eoceno de Turruncún.

Los materiales del Jurásico son clasificados como carniolas, dolomías y calizas dolomíticas de edad Hettangiense (Durantez et al., 1982). Estos materiales cabalgan sobre las facies Escucha, que presentan estratos con conglomerados, arenas caoliniferas y con cuarzo, lutitas y capas de carbón (Durantez et al., 1982). Fuera de la subzona perteneciente a este LIG IB004, se puede observar la asociación de las facies Escucha con el Urgon (Muñoz et al., 1997) que ha sido inventariado como LIG IB235.

La misma subzona de Villarroya establece contacto con el LIG EB004 Conglomerados del Paleógeno de Turruncún, un lugar geológico denominado “Los

Caballos de Turruncún y Villarroya" y del que surgen algunas leyendas.

Además del evidente interés como patrimonio geológico de la subzona de Villarroya, en este trabajo describiremos otras tipologías de patrimonio existententes en el espacio.

DATOS

Las tipologías de patrimonio presentes en la subzona de Villarroya del LIG IB004 son variadas.

Patrimonio natural geológico:

Para este tipo de patrimonio solamente realizamos una descripción muy resumida puesto que es conocido y referido en la catalogación del IGME como Lugar de Interés Geológico. Los elementos patrimoniales tienen interés tectónico, estratigráfico, hidrogeológico, minero-metalogenético, paleontológico y mineralógico. Como novedades reseñables al interés paleontológico de la subzona de Villarroya, indicamos la presencia de una flora fósil variada perteneciente a las facies Escucha con presencia de al menos helechos, coníferas y angiospermas. Esta flora hasta el momento no ha sido estudiada en el espacio concreto al que nos referimos. También en la subzona existe un afloramiento de basaltos que cruzan y engloban los materiales del Jurásico.

Patrimonio natural biológico:



FIGURA 1. Espacio de la mina de carbón La Abundante en el que se aprecian restos del edificio, escombreras y el avance de la vegetación en el ecosistema singular con alta presencia de orquídeas.

Recientemente hemos detectado la presencia de una colonia de orquídeas que crecen en cantidad importante y mostrando una biodiversidad sumamente alta para esta familia de plantas. La situación precisa de las mismas es el espacio que forma un triángulo entre las coordenadas: 30 T 576635 4665291; 30 T 576399 4665443 y 30 T 576487 4665317, encontrándose la zona a 950 m de altitud (Fig. 1).

El crecimiento de las orquídeas sorprendentemente se produce sobre los suelos modificados por el ser humano durante la explotación del carbón. Los lugares principales de crecimiento son las bases de las escombreras de la mina La Abundante en donde la escorrentía del agua acumula materiales procedentes de la propia escombrera.

En la zona de crecimiento de orquídeas la explotación y modificación del suelo más antigua se produce desde mitad del s. XIX y la transformación más moderna se produce hasta el año 1960, con lo que los suelos en los que encontramos el crecimiento tienen una edad mínima de 60 años hasta la actualidad.

La importancia del suelo es máxima en el crecimiento de las orquídeas debido a que estas necesitan para su desarrollo de la presencia de simbiontes fúngicos. Los simbiontes fúngicos proporcionan carbono y minerales a las semillas durante el desarrollo temprano de las semillas de orquídeas que llegan al suelo (Dearnaley et al., 2016). La dependencia de los hongos continúa hasta la etapa adulta, aunque en diferentes grados (Schweiger et al., 2018). Por tanto, el conjunto suelo-hongo es de vital importancia para el desarrollo de las orquídeas.



FIGURA 2. Vista del suelo antropizado en la mina La Abundante con una orquídea en momentos previos a florecer.

El suelo dónde crecen las orquídeas está fuertemente antropizado dado que se trata de la escombrera de la mina La Abundante en Villarroya. Las plantas crecen en los bordes y límites de la escombrera. El suelo es originado por dos tipos de rocas del Cabalgamiento de Cameros. Por un lado, las carniolas, dolomías y calizas dolomíticas que aparecen en la parte superior del espacio, en forma de frente rocoso suministran fragmentos rocosos hasta la zona de crecimiento de las orquídeas, proporcionando al suelo carbonatos de calcio y magnesio. Por otro lado, el suelo también lo integran los materiales procedentes de la actividad minera, formados por arcillas, limos y arenas blancas, grises y negras, con carbón lignito y nódulos de óxidos de hierro correspondientes a las facies Escucha. A estas dos fuentes de materiales, además tenemos que unir materiales de formación antrópica, como escombros de ladrillos y cemento procedentes de los edificios de la mina (Fig. 2). El conjunto del suelo formado por estas rocas y materiales antrópicos presenta un pH básico con contenido dominante de carbonato de calcio.

En el ecosistema crecen asociadas a las orquídeas, las especies de plantas Rosal silvestre (*Rosa canina*), Aulaga (*Genista scorpius*), Tomillo (*Thymus vulgaris*), Junquera (*Juncus acutus*), Zarzamora (*Rubus ulmifolius*), Pimpinela menor (*Sanguisorba minor*), Llantén

(*Plantago monosperma*), *Plantago media*, *Scorzoneroides duboisii* y *Pilosella officinarum* entre otras. Del mismo modo, necesariamente en el ecosistema entre otros, viven distintas especies de polinizadores en asociación simbiótica con las orquídeas.



FIGURA 3. *Ophrys incubacea*. Mayo de 2023, zona de la mina La Abundante, Villarroya.

Las especies de orquídeas detectadas durante los años 2021 a 2023 son: *Orchys anthropophora, Orchys mascula, Orchys purpurea, Anacamptis pyramidalis y Neotinea maculata.* Y a estas hay que añadir la presencia de hasta 8 especies del género *Oprhys: O. lutea, O. dirys, O. binilunata, O. sphegodes, O. incubacea (Fig. 3), O. riojana (Fig. 4), O. speculum (Fig. 5) y O. passionis.* Se han localizado por tanto 13 especies diferentes de orquídeas por el momento. No se descarta que en años sucesivos aparezcan más. Algunas de las orquídeas localizadas son especies endémicas.



FIGURA 4. *Ophrys riojana* especie endémica de La Rioja. Mayo de 2023, zona de la mina La Abundante, Villarroya.

Debido a que las facies Escucha contienen estratos con carbón lignito, este recurso se ha explotado desde mitad del s. XIX y ha generado un patrimonio cultural, que tanto de tipo inmueble como de tipo mueble.

El patrimonio cultural inmueble consta de tres tipos de elementos:

Edificios mineros en cierto estado de ruina, aunque claramente visibles correspondientes a minas del s. XX, explotaciones La Abundante y La Mari Pili.

Escombreras de minas tanto del s. XIX como del s. XX. La alta gama de tonalidades que presentan los materiales que forman las escombreras otorgan a las escombreras un atractivo especial a la vista, que enriquece el paisaje.

Suelos que han ardido. Los asociamos a la intervención humana ya que, aunque su combustión pudo iniciarse de forma espontánea, la causa inicial de esta combustión fue un aumento de la accesibilidad al aire de los estratos carbonosos. En este caso destaca el denominado paraje de "Mina Quemada" en el término de la Peña de Romartinez, con presencia de un suelo rojo con grandes masas de escorias (porcelanitas) de combustión.



FIGURA 5. *Ophrys speculum* en forma de rarísima variedad hipocromática. Mayo de 2023, zona de la mina La Abundante, Villarroya.

El patrimonio material mueble viene a estar integrado por los minerales y rocas procedentes de la formación Escucha, que hasta el momento son "Yesos Estrella Negra de Villarroya" (Jiménez et al., 2020), nódulos con contenido en hierro y porcelanitas de fusión de suelos que han ardido de forma espontánea. Actualmente estos minerales y rocas se encuentran en museos como el Museo Geominero del IGME, o el Museo de Ciencias Naturales de Álava entre otros. También a estos materiales podemos añadir minerales presentes en las rocas basálticas de la zona, principalmente jaspes y cuarzos.

Finalmente, dentro del propio espacio de la subzona de Villarroya, que linda con el casco urbano del pueblo, existe un patrimonio inmaterial, en forma de la fiesta de Santa Bárbara. Esta fiesta se celebra en honor a la patrona milagrosa del pueblo y de los mineros. A la santa se le adjudica el obrar milagros geológicos y la fiesta presenta peculiaridades como la petición de la iluminación de los mineros mediante sus candiles de carburo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El interés del patrimonio natural geológico del Cabalgamiento de Cameros es reconocido ya hace una

década. La asociación de este patrimonio natural Geológico con un patrimonio Cultural tampoco es sorprendente en cuanto a que al haber presencia de carbón se han llevado a cabo explotaciones mineras a las que típicamente va asociado el patrimonio cultural.

PRIMER NIVEL	SEGUNDO NIVEL	TERCER NIVEL	ELEMENTOS
Patrimonio natural	Geológico y Paleontológico		LIG IB004 Flora fósil Basaltos
	Biológico		Ecosistema con 13 especies de orquídeas en suelos antropizados
Patrimonio cultural	Material	Inmueble	Edificios de minas Escombreras Suelos de combustión espontánea
		Mueble	Minerales y rocas
	Inmaterial		Fiesta minera de Santa Bárbara

TABLA I. *Clasificación de los distintos tipos de patrimonio y los elementos*

La principal novedad presentada en este trabajo es el descubrimiento de un patrimonio natural biológico en forma de ecosistema absolutamente singular que aparece originado por la acción del ser humano sobre la geología. No hay referencias actuales respecto de la formación de ecosistemas con más de una decena de especies de orquídeas creciendo en gran número sobre un suelo derivado de la actividad minera. Generalmente se tiende a pensar que las escombreras de minas no son ecosistemas de interés, sino más bien al contrario. Pero como se demuestra en el caso de la subzona de Villarroya del LIG IB004, las escombreras de minas y suelos antropizados por la explotación de carbón, pueden dar lugar a ecosistemas excepcionales desde el punto de vista biológico.

Respecto de la conservación del conjunto del patrimonio natural de la zona debemos indicar dos riesgos principales en la actualidad:

Debido a que sobre las escombreras se han realizado plantaciones de pinos el crecimiento y extensión de los mismos por la zona puede afectar de forma muy negativa al patrimonio cultural, haciendo desparecer las escombreras y las minas. Todavía peor es el efecto sobre la biología de la zona ya que los pinos pueden ser sumamente perniciosos para la conservación del ecosistema de alta riqueza en orquídeas, ya que la inclusión de esta nueva especie vegetal cambia las relaciones entre las especies que crecen hasta el momento en la zona y da lugar a su modificación.

Por otro lado, el segundo riesgo detectado, y que afecta casi de forma exclusiva al patrimonio natural biológico, es la reducción de las precipitaciones sobre la zona. La sequía que va en aumento entre los años 2021 y 2023 provoca una reducción en el número de ejemplares de orquídeas que florecen en cada temporada.

Desde el punto de vista administrativo, la subzona especifica referida en este trabajo se encuentra incluida en la Reserva de la Biosfera de los Valles del Leza, Jubera, Cidacos y Alhama en La Rioja. Esto proporciona una oportunidad única para la Reserva de la Biosfera en cuanto a que se trata de un caso evidente de como la interacción del ser humano con la naturaleza, en este caso, a través de las explotaciones de carbón, ha transformado la naturaleza para acabar resultando en un ecosistema absolutamente excepcional a nivel mundial. Resulta excepcional encontrar un espacio en el que en muy pocos metros cuadrados coinciden patrimonio natural geológico, biológico, cultural material y cultural inmaterial.

Debido a la ingente cantidad e información encerrada en este pequeño espacio, que resulta ser fácilmente accesible y visitable, parece recomendable el trazar una ruta sostenible para divulgar el conocimiento patrimonial presente en el mismo. Esto puede ser facilitado por la aplicación de nuevas tecnologías de la comunicación, por ejemplo, mediante la creación de contenidos relacionados y su transmisión mediante realidad aumentada.

REFERENCIAS

Durántez, O., Sole J., Castiella, J., Villalobos, L. (1982): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 281 (Cervera del Río Alhama).* IGME, Madrid.

Muñoz, A., Soria, A., Canudo, J. I., Casas, A. M., Gil, A., Mata, M. P. (1997): Caracterización estratigráfica y sedimentológica del Albiense marino del borde Norte de la Sierra de Cameros. Implicaciones paleogeográficas. *Cuadernos de Geología lbérica*, 22: 139-16.

Jiménez Martínez, R., Hernández Pinilla, M.P., González Laguna, R., Torres Matilla, M.J. y Mayans López, C. (2020): *Colección de minerales de las Comunidades y Ciudades Autónomas 8. LA RIOJA*. Museo Geominero Instituto Geológico y Minero de España.

Dearnaley, J., Perotto, S. y Selosse, M-A. (2016): Structure and development of orchid mycorrhizas. En: *Molecular Mycorrhizal Symbiosis* (F Martin, ed.). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 63–86.

Schweiger, J.M.I., Bidartondo, M.I. y Gebauer, G. (2018): Stable isotope signatures of underground seedlings reveal the organic matter gained by adult orchids from mycorrhizal fungi. *Funct. Ecol.* 32: 870–880.

Identificación y caracterización del patrimonio geológico en la Reserva Nacional Magallanes (Patagonia chilena) para el desarrollo de actividades educativas, turísticas y de conservación

Identification and characterization of the geological heritage in the Magallanes National Reserve (Chilean Patagonia) for the development of educational, touristic, and conservation activities

F. Valenzuela[1], M. Schilling[2], S.N. Nielsen[2] y J. Pardo-Pérez[3]

1 Escuela de Geología, Universidad Austral de Chile 5090000, Valdivia, Región de los Ríos, Chile, fernando.valenzuela02@alumnos.uach.cl
2 Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile 5090000, Valdivia, Chile manuel.schilling@uach.cl, sven.nielsen@uach.cl
3 Centro de Investigación GAIA-Antártica, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile judith.pardo@umag.cl

Palabras clave: Patrimonio geológico, Reserva Nacional Magallanes, Patagonia, Chile

Resumen

La Reserva Nacional Magallanes (RNM) situada al extremo sur de Chile, es un Área Silvestre Protegida del Estado de 20.878 ha., localizada a 7 km de la ciudad de Punta Arenas. Destaca por la protección hidrográfica de la Cuenca del río Las Minas, sus bosques de *Nothofagus* y su historia ligada a la extracción de madera, oro y carbón. A partir de esos antecedentes, esta investigación busca identificar Lugares de Interés Geológicos (LIG) para potenciar el geoturismo dentro de la comuna y generar un interés hacia el patrimonio geológico local. La metodología de trabajo consistió en evaluar cualitativa y cuantitativamente diferentes sitios en la RNM que destacan por su valor científico, turístico y educativo. Para la identificación de LIG se realizó una revisión bibliográfica y trabajo de campo, incluyendo levantamiento de perfiles estratigráficos y fotografías en detalle. Los principales LIG destacan por presentar un componente continental con improntas fósiles y troncos de árboles fosilizados y uno marino, con niveles de areniscas fosilíferas. Este inventario de LIG corresponde al primero realizado en la comuna y de ser tomado en cuenta podrá servir de ejemplo para ser replicado en otras áreas protegidas públicas de la Patagonia chilena.

Keywords: Geological heritage, Magallanes National Reserve, Patagonia, Chile

Abstract

The Magallanes National Reserve (MNR) is situated at the southern edge of Chile and encompasses 20 878 hectares of Chilean public natural protected areas. It lies 7 km from Punta Arenas City. It stands out its protection of the hydrography of the Las Minas River, Nothofagus forests and the historical significance of the site linked to the extraction of wood, gold, and coal. Following this, the objective of this research is identifying geosites, to promote geotourism within the commune, and generate a geological valuation of the area. The methodology employed involves both qualitative and quantitative assessments of various sites within MNR, focusing on their scientific, tourist and educational significance. Furthermore, to pinpoint geosites, a combination of literature review and fieldwork tests needed to be conducted, involving the examination of stratigraphic profiles and detailed photography. The primary geosites are distinguished by their continental component, showcasing fossilized leaf imprints and tree trunks, as well as a marine component, featuring fossiliferous sandstone layers. This type of geosite inventory marks the first to be carried out within the commune. the findings could set a precedent for similar assessments to be conducted in other public protected areas throughout of the Chilean Patagonia.

Monitorización del impacto del cambio climático en el patrimonio geológico del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)

Monitoring of the impact of climate change on the geological heritage of the Teide National Park (Tenerife, Canary Islands)

J. Vegas[1], M. González-Roquero[2], A. Díez-Herrero[1], G. Lozano[1], E. Martín-González[2], N. Sánchez[1], C. Romero[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. jvegas@igme.es, andres.diez@igme.es, g.lozano@igme.es, n.sanchez@igme.es
2 Museo de Ciencias Naturales de Tenerife, Fuente Morales, 1, 38003 Santa Cruz de Tenerife. Tenerife. mgonzalez.noe@museosdetenerife.org, mmartin@museosdetenerife.org
3 Facultad de Geografía, Campus de Guajara, Universidad de La Laguna. 38200 Tenerife. mcromero@ull.edu.es
.

Resumen: Los estudios del impacto del cambio climático sobre el patrimonio natural son muy extensos, sobre todo los dirigidos a la componente biótica. Sin embargo, siguen siendo muy pocas las investigaciones dedicadas a los efectos que ocasiona en el patrimonio geológico. El parque nacional del Teide fue declarado Patrimonio Mundial por su diversidad geológica, de forma que en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) (http://info.igme.es/ielig/) se encuentran once sitios de relevancia internacional y nacional. Los efectos del cambio climático están produciendo modificaciones importantes en esos LIG y en otros de interés para el Parque Nacional, siendo los más vulnerables: las formas y procesos periglaciares del Llano de Maja, el campo pumítico de las Minas de San José, y los manantiales colgados de la Pared de las Cañadas, como el de El Riachuelo. En el presente trabajo se muestran las técnicas de monitorización instrumental que se están llevando a cabo para la caracterización y cuantificación de estos cambios. Los resultados obtenidos y los datos del instrumental instalado se interpretan en el marco de los modelos hidrogeológicos vigentes para la isla y de los escenarios previstos de cambio climático para el archipiélago canario.

Palabras clave: Cambio Global, patrimonio geológico, parque nacional, monitorización, Teide

***Abstract**: Research on climate change on the natural heritage are very extensive, especially those related to biodiversity. However, researchers dedicated to the impacts of climate change on geoheritage are scarce. The Teide National Park was declared World Heritage for its geological diversity, so that the Spanish Inventory of Geosites (IELIG: acronym in Spanish) (http://info.igme.es/ielig/) lists eleven geosites of national and international relevance. The effects of climate change are producing important impacts on these geosites and on others of interest to the National Park, such as the periglacial forms and processes of the Llano de Maja, the pumice field of the Minas de San José, and the hanging springs of the Pared de las Cañadas, such as the so-called the Riachuelo. The results and data obtained from the instrumentation are interpreted within the framework of the hydrogeological models and the climate change scenarios foreseen for the Canary Islands.*

***Key words:** Global Change, geoheritage, national park, monitoring, Teide.*

INTRODUCCIÓN

El proyecto IVRIPARC se ha diseñado con la finalidad de evaluar los impactos, la vulnerabilidad y la capacidad de resiliencia ante el cambio global del patrimonio geológico y la geodiversidad que son representativos de los sistemas naturales que identifican los parques nacionales (PN) de Canarias y sus repercusiones para el uso público (Vegas et al., 2022).

En cada uno de los parques canarios se han implementado diferentes técnicas de monitoreo para conocer el impacto de distintos procesos geológicos activos, que se han visto desencadenados e intensificados por el cambio global y, en especial, por el cambio climático. Entre los casos de estudio que aborda este proyecto están el impacto de la sequía en los Lugares de Interés Geológico (LIG) de los nacientes y manantiales el PN de Garajonay (Vegas et al., 2023); el análisis del efecto de las avenidas torrenciales y la erosión sobre los LIG del PN de Taburiente (Garrote et al., 2023); o la incidencia del ascenso del nivel del mar y los eventos extremos en el patrimonio geológico del litoral del PN de Timanfaya (Ferrer-Valero et al., 2023).

Este trabajo se centra en el PN del Teide (Tenerife), para detallar los métodos de monitorización implementados en tres de sus LIG, incluidos en el Inventario Español IELIG), que son más vulnerables a los impactos del cambio climático. El parque nacional del Teide, además, es Patrimonio Mundial UNESCO desde 2007 principalmente por sus valores geológicos (Carracedo, 2008). Con los resultados obtenidos se estimará el impacto de las variaciones en la precipitación, tanto en forma de lluvia como de nieve (Luis Álvarez y Martín-

Esquivel, 2022) y las variaciones de temperatura; así como, los efectos e impactos del alto número de visitantes que afectan directamente a la conservación y uso público del patrimonio geológico de este PN.

METODOLOGÍA

Durante las campañas de campo se han llevado a cabo la revisión y seguimiento de los LIG del Parque Nacional del Teide. De ellos, por las evidencias que muestran de su estado de conservación, se han seleccionado tres para monitorizar los efectos del cambio climático. Estos cambios, fundamentalmente, afectan a la frecuencia, magnitud y tipología de la precipitación, así como, a los ciclos de sequía, que inciden en la recarga de los acuíferos y tienen efectos negativos también para la conservación de la biota del parque. Los tres LIG seleccionados son (Figura 1):

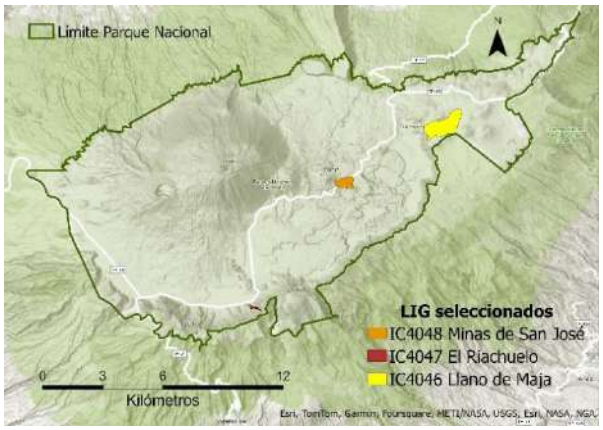


FIGURA 1. Mapa de situación de los 3 LIG seleccionados para el estudio: IC4048 Depósitos pumíticos de las Minas de San José; IC4047 Naciente de El Riachuelo; IC4046 Formas y depósitos periglaciares del Llano de Maja. PN del Teide (Tenerife). Mapa: elaboración propia del IELIG http://info.igme.es/ielig/.

i) LIG Depósitos pumíticos de las Minas de San José, mediante ensayo de infiltración con cilindro de anillo simple, para estimar la permeabilidad vertical saturada del terreno en diferentes zonas de tránsito de visitantes en sendero y fuera de él (Figura 2). Los ensayos se realizaron siguiendo el procedimiento simplificado descrito por Hatt y Le Coustumer (2008). Los valores de volúmenes infiltrados se analizaron con la formulación de Reynolds y Elrick (1990) y Wu et al. (1999); y calculados mediante las hojas de cálculo de Moreno et al. (2019 e *in press*).
ii) LIG Formas y procesos periglaciares del Llano de Maja. Recopilación de las series históricas de precipitación y temperatura en el PN. Instalación de un pluviómetro de cazoletas con registro continuo, para la caracterización de las precipitaciones en el Llano de Maja (Figura 3).
iii) LIG Naciente de El Riachuelo. Recopilación de datos de caudal de los nacientes del PN (Consejo Insular de Aguas de Tenerife). Muestreo de agua de este naciente para análisis químico e isotópico (tritio y estables O16/O18) (Figura 4).

RESULTADOS PRELIMINARES

LIG 'Depósitos pumíticos de las Minas de San José'

Las Minas de San José, por su fácil accesibilidad y por haber sido escenario de películas y series de acción (Furia de Titanes, 2010), son una de las zonas con mayor presión de visitantes. El principal problema se debe a que la inmensa mayoría de visitantes acceden a esta zona, ignorando los senderos habilitados para ello y transitan por todo el depósito. La compactación del suelo debido al pisoteo genera problemas de infiltración superficial.



FIGURA 2. Ensayos de infiltración en el LIG 'Depósitos de pómez de las Minas de San José', Parque Nacional del Teide (Tenerife).



FIGURA 3. Instalación de un pluviómetro de cazoletas en el Llano de Maja. Parque Nacional del Teide (Tenerife).



FIGURA 4. Muestreo de agua en el LIG 'Manantial de El Riachuelo'. Parque Nacional del Teide (Tenerife).

Los ensayos de infiltración se realizaron en tres puntos diferentes: i) sendero (MSJ-01); ii) zona más transitada y pisoteada por estar próxima al aparcamiento de vehículos y la carretera (MSJ-02) y iii) zona menos pisoteada por encontrarse protegida por un extraplomo bajo de un afloramiento rocoso de coladas fonolíticas (MSJ-03). Los resultados preliminares muestran notables diferencias de los volúmenes infiltrados en el tiempo del ensayo (Figura 5) y en la permeabilidad vertical saturada (Tabla I) entre las tres zonas ensayadas; aunque con cierta lógica de interpretación de los valores.

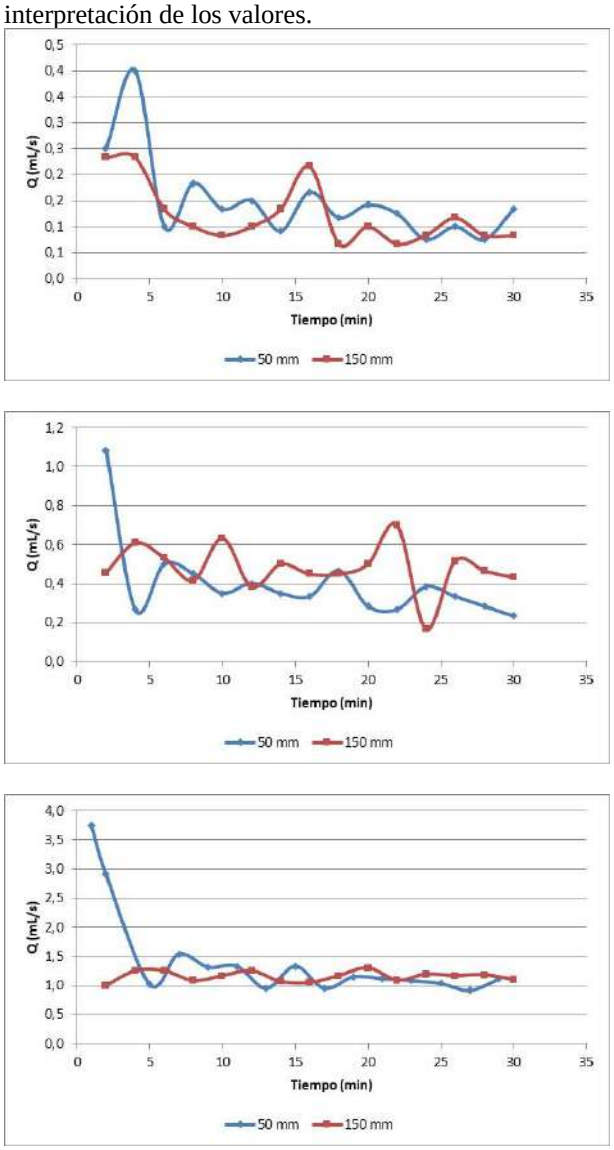


FIGURA 5. Caudales infiltrados (mL/s) en los ensayos MSJ-01 (camino muy transitado; arriba), MSJ-02 (superficie transitada; en medio) y MSJ-03 (superficie poco transitada; abajo) a lo largo de los 30 minutos del ensayo, tanto para una altura de lámina de agua de 50 mm, como de 150 mm.

Ensayo	Zona	φ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{fs} ($mm \cdot h^{-1}$)
MSJ-01	Camino muy transitado	1,222 E-06	(0)
MSJ-02	Superficie transitada	2,069 E-06	31,94
MSJ-03	Superficie poco transitada	9,628 E-06	37,36

TABLA I. Resultados preliminares de estimación de la permeabilidad vertical saturada (K_{fs}) y valores de potencial de flujo métrico (φ), obtenidos mediante ensayos de infiltración con anillo simple o cilindro único.

LIG Manantial de El Riachuelo

En el PN se localizan varios manantiales, algunos de los cuales ya no afloran, debido a las condiciones de aridez cada vez más manifiestas y a la mayor demanda de aguas subterráneas en la isla para abastecimiento público. Algunos de ellos continúan siendo de vital importancia para abastecer las instalaciones del parque, como es el Parador Nacional de Las Cañadas. Para monitorizar el acuífero que alimenta al manantial de El Riachuelo, se ha realizado el muestreo de aguas para el análisis químico y contenido en isótopos radiactivos (tritio) y estables (O^{16} y O^{18}) para determinar el tiempo de recarga de este acuífero y el impacto de la disminución de precipitaciones en la última década.

LIG Formas y procesos periglaciares del Llano de Maja

El Llano de Maja está a 2.284 m de altitud y forma una depresión endorreica rellena de arcillas, finos y cantos superficiales (Moreno, 2006), con abundantes suelos poligonales de origen periglaciar (Figura 6), con morfologías predominantemente hexagonales que oscilan entre los 20 y 50 cm de tamaño, con fragmentos de pómez más gruesas colocados en los bordes de los polígonos. También se han identificado gelifractos, suelos estriados, escalonamiento periglaciar y círculos de piedras (Martínez de Pisón y Quirantes, 1981). Estas estructuras se forman como consecuencia del movimiento convectivo de las partículas en el perfil del suelo en zonas periglaciares dominadas por procesos de de hielo-deshielo. Es una de las áreas del parque donde se produce la acumulación de aire frío a baja altura durante la noche, lo que genera los denominados “lagos fríos” en los que se detectan fuertes heladas del suelo (López et al., 2021). El aumento progresivo de las temperaturas debido al cambio climático, muy notables en la última década, junto con la disminución de las precipitaciones en Canarias (López et al., 2021; Martínez-Chamorro et al., 2023), conlleva a un descenso del número de ciclos por año, condiciones necesarias para el desarrollo y la conservación de estas formas.

En este LIG en noviembre de 2023 se ha instalado un pluviómetro de registro continuo para la caracterización de las precipitaciones a nivel del suelo y estimar los ciclos efectivos de helada. Los escasos datos de precipitación en los dos únicos eventos significativos ocurridos en los tres primeros meses permiten entrever cómo la precipitación registrada en el Llano de Maja es menor en cantidad e intensidad que la registrada en otras estaciones meteorológicas próximas en Las Cañadas a altitudes semejantes, como la ubicada en el Observatorio de Izaña y la situada próxima al Parador Nacional de Turismo.

AGRADECIMIENTOS
Investigación financiada por el OAPN, proyecto IVRIPARC 2779/2021. Agradecemos al personal científico-técnico del Parque Nacional del Teide, así,

como, a N. ben Abdellah Ismail (Museo de Naturaleza y Arqueología, Tenerife), por su colaboración en los muestreos de aguas. A nuestros compañeros, L. Moreno y A. de la Losa (IGME, CSIC), por la cesión del instrumental para los ensayos de infiltración y su hoja de cálculo inédita para la estimación de la permeabilidad vertical saturada.



FIGURA 6. Aspecto general de los suelos poligonales del LIG 'Formas y procesos periglaciares del Llano de Maja'. Parque Nacional del Teide (Tenerife).

REFERENCIAS

Carracedo, J.C. (2008). Outstanding geological values: the basis of Mt Teide's World Heritage nomination. *Geology Today*, 24, 104-111.

Ferrer-Valero, N., Vegas J., Martín-González, E., Lario J., Romero, C., Galindo, I., Lozano G., Sánchez N. (2023). Probable effects of coastal erosion and flooding on the geoheritage of Lanzarote and Chinijo islands in the 21st Century. En: *Abstract Book International Workshop on Geosciences in Active Areas*. Cabildo de Lanzarote Ed. Pp. 53.

Garrote, J., Vegas J., Ferrer, N., Mayer, P., Lorenzo, J.H., Perucha, M.A. y Díez-Herrero, A. (2023). Interacción de los procesos geomorfológicos activos y el patrimonio geológico ante el cambio climático. Parque nacional Caldera de Taburiente (La Palma). En: G. Desir, E. Nadal y D. Regües (Eds.). Libro actas XVI Reunión Nacional de Geomorfología, SEG, pp. 158-159.

Hatt, B. y Le Coustumer, S. (2008). *Practice Note 1: In Situ Measurement of Hydraulic Conductivity*. Facility for Advancing Water Biofiltration (FAWB).

López, A., Dorta, P., Díaz-Pacheco, J., Martín-Esquivel, J.L. y Marrero-Gómez, M. (2021). Rasgos climáticos del Parque Nacional del Teide. Singularidad y diversidad. En: Durbán, M. & Martín-Esquivel (Eds.), *Ciencia en el Parque Nacional del Teide 2009-2019*. Publicaciones Turquesa, Tenerife. 119-138 pp.

Luis Álvarez, T. y Martín-Esquivel, J.L. (2021). *Cambio Climático en Tenerife 2021. Observatorio del Cambio Climático y la Energía de Tenerife*. Informe inédito. 74 pp.

Martín Moreno, R. (2006). *Estudio comparativo de formas y procesos glaciares y periglaciares desde la pequeña edad del hielo: Altas latitudes noruegas (spitsbergen y jotunheimen) y altas altitudes españolas (Pirineos, Sistema Central y Teide)* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Madrid).

Martínez de Pisón, E y Quirantes, F. (1981). *El Teide. Estudio Geográfico*. Ed. Interinsular Canaria S.A. 187 pp.

Martínez Chamorro, J., Herrera, J. y Ramos, I.A. (2023). Plan Canario de Acción Climática. Gobierno de Canarias (Ed.), TRAGSATEC, 414 pp.

Moreno, L., De la Losa, A. y Baquedano, C. (2019). *Ensayo A1: Infiltrómetro de cilindro único*. Hoja de cálculo para Microsoft Excel. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ministerio de Economía y Competitividad, Madrid. Inédito.

Moreno, L., De la Losa, A. y Baquedano, C. (*in press*). *Measurement of the surface permeability of soils. Single ring methods*. MS Excel spreadsheet and R Infiltrometry User Guide. www//github.com. Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Madrid (Spain).

Reynolds, W. D. y Elrick, D. E. (1990). Ponded infiltration from a single ring: Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America journal*, 54, 1233-1241.

Vegas, J., Díez-Herrero, Herrera, R. y Márquez, A. (2023). Monitorización de nacientes en el parque nacional de Garajonay (La Gomera). El patrimonio geológico más vulnerable en el contexto del cambio global. En: G. Desir, E. Nadal y D. Regües (Eds.). *Libro actas XVI Reunión Nacional de Geomorfología*, SEG, pp. 160-161.

Vegas J., Baeza, E. Cabrera, A., Díez-Herrero, A., Ferrer, N., Galindo, I., Garrote, J., González-Laguna, R., Herrera R., Lario, J., Lozano, G., Márquez, Á., Martín-González, E., Máyer, P., Perucha, M.Á., Rodríguez-Pascua, M.A., Romero, C. y Sánchez, N. (2022). El proyecto IVRIPARC: metodología para estimar el impacto del cambio global sobre el patrimonio geológico de los parques nacionales de Canarias. *Geo-Temas* 19, 107-110.

Wu, L., Pan, L., Mitchell, J. y Sanden, B. (1999). Measuring Saturated Hydraulic Conductivity using a Generalized Solution. *Soil Science Society of America Journal*, 63 (4), 788-792.

Historiografía de fuentes de terremotos históricos en el noroeste peninsular (periodo 1755-1900).

Historiography of sources of historical earthquakes in the northwestern peninsular (1755-1900).

C. Crespo-Martín[1], F. Martín-González[1] y C. Portillo-Poveda[1]

1 Área de Geología, Tecvolrisk Research Group, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, 28933 Madrid, Spain. cristina.crespo@urjc.es; fidel.martin@urjc.es; c.portillop@alumnos.urjc.es

Palabras clave: terremotos históricos, catálogo preinstrumental. NO península ibérica, intraplaca.

Resumen

Para evaluar la peligrosidad sísmica es primordial la completitud de los catálogos de terremotos, especialmente en época preinstrumental (antes de 1900) ya que la información de los terremotos históricos es más imprecisa. Esta información se basa en catálogos, cuyas fuentes de información son catálogos o periódicos previos, que a su vez se basan en fuentes anteriores. En este trabajo, enfocado en el NW de la Península Ibérica, se identifican las fuentes de información más utilizadas en los catálogos de terremotos históricos y se establecen las relaciones entre ellas hasta llegar a las fuentes primarias, de donde se obtiene la información más fidedigna. Este estudio ha permitido identificar un cambio en las fuentes de información que registran la sismicidad. Previamente a 1840, los catálogos de terremotos representan el 77% de las fuentes utilizadas en el catálogo de Martínez Solares y Mezcua (2002), siendo el catálogo de Perrey (1847) la referencia más consultada. A partir de 1840, en España la prensa es la principal fuente primaria de obtención de información de terremotos históricos (59%), siendo el periódico *El Heraldo* la referencia primaria más consultada. Además, este trabajo permite establecer las relaciones que existen entre las fuentes de información y conocer las referencias frecuentemente consultadas por los distintos catálogos. Ello permite no sólo que se pueda conocer el posible origen de una descripción sísmica en caso de la ausencia de fuentes, sino que también encontrar más fácilmente los posibles errores sistemáticos en las descripciones sísmicas que se han transmitido entre catálogos con el tiempo.

Abstract

The completeness of the catalogs is essential to assess the seismic hazards, notably during pre-instrumental period (before 1900) due to the inaccuracy of information on historical earthquakes. This information is based on catalogs, whose sources of information are previous catalogs or newspapers, also founded on previous sources. This work focuses on the intraplate region of the northwestern Iberian Peninsula, and we identify the most used sources of information in the catalogs of historical earthquakes and the original sources from which the most reliable information is obtained are established. This study has allowed us to identify a period of change in the sources that record seismicity. Prior to 1840, earthquake catalogs represent the 77% of the sources used by Martínez Solares and Mezcua (2002) catalogue, being Perrey (1847) the most consulted reference. From 1840 onwards, in Spain, the press is the main source of information on historical earthquakes (59%), being the newspaper *El Heraldo* the original reference most consulted. In addition, this work makes possible to establish the relationships between the sources of information and to know the references frequently consulted by the different catalogues. This fact allows that not only to know the possible origin of a seismic descriptions if the absence of sources, but also facilitate to find possible systematic errors spread over time.

Referencias

Perrey, A. (1847): Sur les tremblements de terre de la Péninsule Ibérique. En: *Annales des Sciences Physiques et Naturelles, et d'Industrie* (Barret, ed.), Société royale d'agriculture, histoire naturelle et arts utiles de Lyon, Lyon, Tomo 10, 461-514.

Martínez Solares, J.M. y Mezcua Rodríguez, J. (2002): Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C. – 1900). *Instituto Geográfico Nacional, Madrid*, Monográfico 18, 256 p.

El incremento de la colección de minerales españoles del museo del IGME (Museo Geominero): una historia desde mediados del siglo XIX.

The increase in the collection of Spanish minerals of the IGME museum (Geominero Museum): a story from the mid-19th century.

R. Jiménez Martínez[1], R. González-Laguna[1], M.J. Torres Matilla[1] y M.P. Hernández Pinilla[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. r.jimenez@igme.es

Resumen: Se puede decir que la colección de minerales españoles del museo del IGME tiene una antigüedad pareja a la de la institución que la cobija, que se remonta al año 1849. En un principio se inició con los trabajos de recolección y documentación para la realización del mapa geológico de España, hasta que a partir de 1927 los ejemplares se instalaron en la ubicación que ocupa en la actualidad, en la sede central del IGME en Madrid. Desde entonces y hasta finales de la década de 1970, ha pasado por distintas ubicaciones dentro de la sala del museo, hasta quedar instalada en la segunda planta, donde permanece hoy en día. En las dos últimas décadas del siglo XX se sentaron las bases para llevar a cabo la actualización de la colección, que se inició a finales de 2008. Esta actualización llevó aparejado el incremento de la colección, que en 13 años se ha triplicado a pesar de que sólo se ha intervenido en aproximadamente la mitad de las Comunidades Autónomas. Actualmente este trabajo y por tanto el incremento de la colección, ha quedado interrumpido por la falta de personal con destino en las colecciones de minerales españoles, aunque se espera que en los próximos años se puedan reanudar las actividades.

Palabras clave: colección de minerales, historia del IGME, minerales españoles, Museo Geominero, patrimonio geológico mueble**.**

Abstract: *It can be said that the collection of Spanish minerals in the IGME museum is as old as that of the institution that houses it, which dates back to 1849. At first, it began with the work of collecting and documenting the geological map of Spain, until in 1927 the specimens were installed at the location they currently occupy, at the IGME headquarters in Madrid. Since then and until the end of the 1970s, it has moved through different locations within the museum room, until it was installed on the second floor, where it remains today. In the last two decades of the 20th century, the foundations were laid for updating the collection, which began at the end of 2008. This update led to an increase in the collection, which in 13 years has tripled despite that only about half of the Autonomous Communities have been intervened. At present this work, and therefore the increase in the collection, has been interrupted by the lack of personnel assigned to the Spanish mineral collections, although it is expected that activities can be resumed in the coming years.*

Key words: *mineral collection, history of the IGME, Spanish minerals, Geominero Museum, movable geological heritage.*

INTRODUCCIÓN

Las colecciones públicas de minerales constituyen parte del patrimonio geológico mueble y, en algunas ocasiones, se incrementan sus fondos de forma intencionada, bien porque no representan fielmente los rasgos geológicos o mineros para los que fueron creadas, bien porque presentan una serie de carencias que no permiten observar con claridad estos rasgos distintivos de la colección. Pero hay otros factores a considerar a la hora de abordar el aumento de una colección. De esta forma, para empezar esta tarea habrá que responder afirmativamente a tres preguntas: 1. ¿existe espacio físico para custodiar los nuevos ejemplares?, 2. ¿hay una dotación de personal suficiente como para acometer la tarea? y 3. ¿se cuenta con la infraestructura necesaria?

En este trabajo se hace un repaso por la historia de la colección de minerales españoles del museo del IGME (Museo Geominero), prestando especial atención a las variaciones en su incremento a lo largo de 175 años.

ANTECEDENTES

La institución predecesora del actual IGME-CSIC se denominó Comisión para la Carta Geológica de Madrid y General del Reino, creada por Real Decreto en 1849 por la reina Isabel II. Ya desde un principio, uno de los objetivos de la Comisión era formar colecciones de minerales (Luján, 1852). Estas colecciones se iniciaron con los ejemplares españoles que se iban recogiendo en campo durante los trabajos efectuados para la realización del mapa geológico: en 1852 se habían recogido los de

la provincia de Madrid (Luján, 1853) y posteriormente los de Palencia, Santander y León (Schulz, 1856), completándose toda la geografía española al mismo tiempo que se iba elaborando el mapa geológico.

LA CONSOLIDACIÓN DE LAS COLECCIONES

En 1927 se instalaron las colecciones en la sala que ocupa actualmente el museo, en la sede central del instituto, en la calle Ríos Rosas de Madrid. En un principio se ubicaron en la planta baja, donde se expusieron las colecciones de sistemática de minerales y fósiles y en la primera planta, donde se situaron los recursos minerales españoles distribuidos por regiones mineras (Jiménez Martínez et al., 2023). No se tienen datos sobre el número de ejemplares que contenía esta colección de recursos españoles, pero incluía, aparte de minerales, probetas talladas, materiales cerámicos y carbones.

Durante la guerra civil española, las colecciones fueron protegidas en los sótanos del Instituto, junto con libros y numerosos aparatos y muchos objetos desaparecieron o fueron destruidos (Moya, 1943). Es probable que entre estos objetos desaparecidos se encontraran algunos minerales.

Posteriormente, en los años 40, bajo la dirección de Primitivo Hernández Sampelayo, se produjeron numerosas entradas de minerales (IGME, 1944), aunque principalmente destinados a la colección de Sistemática.

En 1944 se instaló una vitrina en la planta baja que contenía sólo minerales españoles. Eran minerales clásicos de la mineralogía española y otros que habían sido descritos por primera vez en España (aunque posteriormente muchos serían considerados variedades de otros ya existentes). Entre estos minerales figuraban aerinita, andalucita, aragonito, bolivarita, calafatita, cervantita, esparraguina, glauconia, huelvita, iberita, jarosita, linarita, oruetita, quiroguita, rivotita, thenardita y teruelita (IGME, 1946).

Durante los últimos años de la década de los 40 y buena parte de la siguiente, se siguieron incorporando ejemplares a las colecciones, sobre todo gracias a los numerosos intercambios que se realizaron con otros museos y con coleccionistas del ámbito internacional. Algunos de estos minerales se incorporaron a la colección de menas españolas, que en 1954 contaba ya con 1.800 ejemplares (IGME, 1955).

UN PARÓN DE ALGO MÁS DE DOS DÉCADAS

En los últimos años de la década de los 50, algunas personas destinadas en el museo fueron asignadas a trabajos de prospección minera (IGME 1958, 1959), lo que redundaría en una merma en los recursos destinados a la gestión de colecciones. También, a mediados de los 60, se agruparon los departamentos de Laboratorio y Museo, pero tampoco resultó positivo para las colecciones.

En los siguientes años, apenas hubo actividad en la colección, salvo el cambio de ubicación realizado a finales de los 70, pasando los recursos minerales españoles a la segunda planta, donde permanecen en la actualidad. Se llegaba de esta forma a 1980 con prácticamente el mismo número de ejemplares que ya había a mediados de los años 50.

LA MODERNIZACIÓN DE LA COLECCIÓN

Nada más iniciarse la década de 1980, la empresa Geoprin, S.A. realizó un estudio para la reordenación y estructuración de las colecciones de minerales y rocas del museo. Este estudio se plasmó en el proyecto "Preparación para la reclasificación y reorganización de los minerales y rocas del Museo del IGME", que, entre otras cuestiones, proponía crear un "banco de intercambios" con minerales inventariados. El fin último de este banco sería enriquecer las colecciones mediante el intercambio con ejemplares teóricamente repetidos. Este propósito de intenciones se vio pronto satisfecho con el "Proyecto de acondicionamiento y mejora del Museo del IGME (1983-1984). Reorganización y catalogación de la colección mineralógica", desarrollado por la empresa Geotehic, S.A. Se creó un "banco de minerales" con los ejemplares alojados en la tercera planta, que serían objeto de intercambio con coleccionistas particulares. Este banco, que contaba con cerca de 2000 ejemplares, estuvo en funcionamiento varios años hasta que el responsable de las colecciones de minerales, Ángel Paradas Herrero, puso fin al mismo, incorporando los ejemplares sobrantes a las colecciones. De esta forma ingresaron varios cientos de ejemplares en la colección de minerales españoles.

A partir de 1991 se empiezan a tener registros de inventario fechados en la base de datos, por lo que se sabe que se empezaba el año con 3124 ejemplares en la colección.

Es indudable que las colecciones se modernizaban, ya que se estaban llevando a cabo importantes trabajos en los elementos expositivos, en la base de datos y en lo referente a la divulgación de los fondos, favorecidos por la llegada a la dirección del museo en 1993 de la Dra. Isabel Rábano Gutiérrez del Arroyo. Sin embargo, en la colección de minerales españoles se estaba produciendo un crecimiento muy moderado, ya que tan sólo se inventariaban unas decenas de ejemplares al año, de tal manera que se llegó al nuevo siglo con un total de 3242 ejemplares y numerosas carencias sin resolver.

Esta situación de *impasse,* aunque con pequeñas mejoras, se alargó hasta finales de 2008, donde se llegaba con un total de 3641 ejemplares. Es entonces cuando la dirección del museo propuso elaborar un proyecto para la revisión de la colección, que además llevaría acarreado el ingreso en el museo de uno de los autores de este trabajo (RJM), que fue el responsable de la colección hasta 2021.

EL PROYECTO DE ACTUALIZACIÓN

En septiembre de 2008 se inició el proyecto "Actualización y puesta en valor de la colección de minerales de las Comunidades Autónomas del Museo Geominero: Madrid y Castilla-La Mancha". Con una duración de tres años, sentaría las bases para implementar la actualización en las colecciones de otras Comunidades Autónomas, hasta el año 2021, fecha en la que la falta de personal obligó a cesar temporalmente los trabajos. Se trata de un proyecto integral que cubre todos los aspectos relacionados con la colección, incluyendo la divulgación y puesta en valor y la investigación de sus fondos.

En lo que respecta al incremento de la colección, este proyecto fue todo un hito en la historia del museo, ya que, por primera vez, se acometía la solución de las carencias presentes, teniendo en cuenta los aspectos geológicos y mineros que debían estar representados.

En cuanto al espacio físico para ubicar los ejemplares, resulta que las vitrinas de la segunda planta llevan adosados en la parte inferior 8 cajones por vitrina y, en líneas generales, esos cajones estaban vacíos. Por tanto, como son 27 vitrinas, se trata de unos 200 cajones, que admiten una media de 50 ejemplares por cajón, luego podrían almacenarse unos 10.000 ejemplares. Pero, además, en la tercera planta, hay algunas vitrinas vacías donde se podrían ubicar varios miles de ejemplares más, lo que en conjunto permitía abordar el incremento sin problemas acuciantes de espacio.

La segunda premisa también se cumplía, ya que por entonces había una conservadora de minerales con dedicación parcial a la colección, Ruth González Laguna, que se vería aumentada con la incorporación de un segundo conservador, lo que parecía suficiente para abordar la actualización. En 2017 se jubiló Ángel Paradas Herrero, responsable de la colección de Sistemática y Ruth González ocupó su puesto, simultaneando sus funciones con el apoyo en la colección de minerales españoles, aunque con menor dedicación a la misma. Como esto ponía en serio riesgo la actualización, en 2019 se consiguió un contrato de tres años para María Pilar Hernández Pinilla, conservadora con dedicación principal a la colección. Además, el museo disponía de una persona que se encargaba del diseño y montaje de material gráfico y publicaciones, María José Torres Matilla, por lo que hasta 2022 la dotación de personal fue de dos conservadores con dedicación total, una tercera conservadora de apoyo y una persona también de apoyo, encargada de todo lo relacionado con las publicaciones y puesta en valor de la colección.

La tercera premisa también se satisfacía, ya que el proyecto piloto, diseñado para actualizar las colecciones de Castilla-La Mancha y Comunidad de Madrid, tenía su propia financiación y, además, el museo disponía de fondos propios para financiar la infraestructura básica necesaria. No obstante, este proyecto arrancó con una duración prevista de dos años y el escenario de crisis económica por el que atravesó el país a partir de 2008, ocasionó el recorte de su financiación, por lo que hubo que ampliarlo un año más para poder cumplir los objetivos previstos.

Los resultados, referidos al incremento de la colección, son los siguientes: durante los 13 años que se ha trabajado en la actualización se han inventariado 10.133 ejemplares de prácticamente la mitad de las Comunidades Autónomas (CCAA), lo que supone una media de 779 ejemplares al año. La colección ha pasado de tener 3641 a 13.774 ejemplares. Además, se han conseguido varios miles de ejemplares de las CCAA que aún no han sido actualizadas y que se encuentran almacenados en la tercera planta del museo pendientes de estudio e inventario. Esto implica que entre 2009 y finales de 2021 se ha multiplicado por 3,8 el número de ejemplares que se habían reunido durante los 159 años anteriores, resolviéndose la mayoría de las carencias observadas al inicio de la actualización en las Comunidades y Ciudades Autónomas objeto de revisión (Aragón, Canarias, Castilla-La Mancha, Ceuta, Comunidad de Madrid, Comunidad Valenciana, Extremadura, Islas Baleares, La Rioja, Melilla y Principado de Asturias).

En la Fig. 1 se aprecia el número de ejemplares inventariados desde 1991, primer año desde el que se tiene registro completo informático de dicho dato.

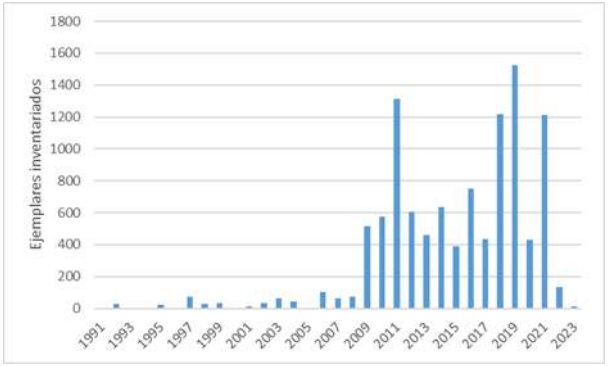


FIGURA 1. *Minerales españoles inventariados entre 1991 y 2023.*

Se observa el aumento producido entre 2009 y 2021, años completos durante los cuales se llevó a cabo la actualización.

En cuanto a la fuente de ingreso de los ejemplares (Fig. 2), el plan de incremento se ha basado en los siguientes pilares:

1. Donaciones: se han recibido un total de 8038 ejemplares donados, lo que supone el 79 % de los nuevos ingresos. Hay que señalar que 2/3 de estos ejemplares han sido aportados por los propios responsables de la colección.
2. Recolección en campo: se han recolectado 1322 ejemplares, es decir, el 13 % de los nuevos ingresos. La mayoría de los ejemplares se han recolectado para resolver las carencias observadas en la colección.
3. Intercambios: se han conseguido 361 minerales, cerca del 3,6 % del total. Para ello, los conservadores del museo han participado en algunos eventos de aficionados al coleccionismo de minerales, donde se han conseguido ejemplares de interés.

4. Adquisición: se han comprado 143 ejemplares, poco más del 1,4 %. Esta opción se ha utilizado en los casos en que la donación y la recolección no había resuelto alguna carencia significativa.
5. Otros: hay un total de 269 ejemplares cuyo ingreso en la colección procede de fuentes internas del museo, bien por desdoblamiento de ejemplares con numeración repetida, bien por su inclusión en la colección al estar almacenados en los fondos no expuestos de otras colecciones y presentar algún interés especial.

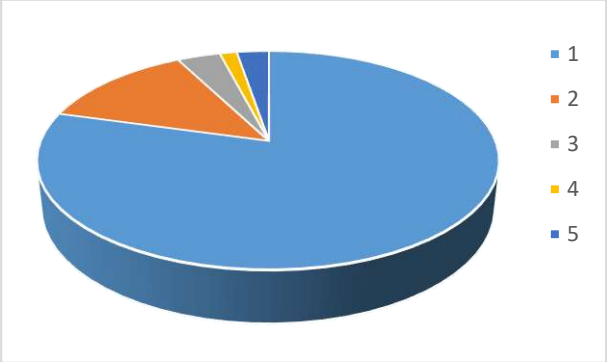


FIGURA 2. *Ejemplares incorporados durante la actualización según la fuente de ingreso. 1. Donaciones. 2. Recolección. 3. Intercambios. 4. Adquisición. 5. Otros.*

ÉPOCA ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

En el año 2021 el IGME pasó a integrarse en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), bajo la denominación de Centro Nacional IGME-CSIC. Se crearon dos grandes departamentos, el Técnico y el Científico, quedando encuadrado el museo en el primero.

Todo el personal de las escalas de investigación pasó a estar destinado en el Departamento Científico, por lo que la colección de minerales españoles perdió al que había sido su responsable desde 2008. Como la otra conservadora destinada en la colección finalizaba su contrato en abril de 2022, aunque ya se había iniciado la actualización de la colección de Castilla y León, se decidió revisar las vitrinas de las CCAA que todavía no habían sido actualizadas, antes de que no quedara personal destinado en esa colección. Esta revisión sólo implicaba homogeneizar la exposición en vitrina con las CCAA que habían sido actualizadas, pero sin resolver las carencias observadas, sin realizar las campañas de campo para la recolecta de ejemplares, ni la asistencia a eventos mineralógicos para conseguirlos y sin llevar a cabo los análisis pertinentes para la correcta caracterización de los minerales problema. Las tareas realizadas fueron:
- Revisión de todos los ejemplares de las vitrinas de las CCAA pendientes de actualizar, para escoger los que iban a estar expuestos y los que permanecerían custodiados en los cajones inferiores de las vitrinas.
- Ordenación de los ejemplares por provincias y, dentro de cada una, por paragénesis o asociaciones genéticas.

Una vez finalizadas estas tareas, la colección de minerales españoles ha quedado revisada, homogeneizándose en todas las CCAA los criterios expositivos.

Actualmente se está a la espera de que en un futuro próximo se puedan retomar los trabajos de actualización, con la correspondiente resolución de las carencias e inventario de ejemplares, recuperándose la tendencia observada entre 2009 y 2021, primer y último años completos dentro de esta actualización.

AGRADECIMIENTOS

A Ángel Paradas Herrero, conservador de minerales del museo entre 1984 y 2017, por su inestimable ayuda en compartir información de este periodo.

La actualización de la colección de minerales españoles fue parcialmente financiada por el proyecto interno del IGME “Actualización y puesta en valor de la colección de minerales de las Comunidades Autónomas del Museo Geominero: Madrid y Castilla-La Mancha”, desarrollado entre 2008 y 2011.

REFERENCIAS

IGME (1944): *Memoria General 1943*. Instituto Geológico y Minero de España, 26-29.
IGME (1946): *Memoria General 1945*. Instituto Geológico y Minero de España, 49-52.
IGME (1955): *Memoria General 1954*. Instituto Geológico y Minero de España, 59-61.
IGME (1958): *Memoria General 1957*. Instituto Geológico y Minero de España, 129-131.
IGME (1959): *Memoria General 1958*. Instituto Geológico y Minero de España, 129-131.
Jiménez Martínez, R., González Laguna, R., Torres Matilla, M.J. y Hernández Pinilla, M.P. (2023): Avatares de la colección de minerales del Museo del IGME (Museo Geominero): parte 1 (desde 1849 hasta 1988). *Paragénesis*, 4(2): 77-96.
Luján, F. de (1852): *Memoria que comprende el resumen de los trabajos verificados en el año 1851 por las diferentes secciones de la comisión encargada de formar el Mapa Geológico de la provincia de Madrid y el general del Reino*. Imprenta Eusebio Aguado, Madrid, 128 p.
Luján, F. de (1853): *Memoria que comprende el resumen de los trabajos verificados en el año 1852 por las diferentes secciones de la comisión encargada de formar el Mapa Geológico de la provincia de Madrid y el general del Reino*. Imprenta Eusebio Aguado, Madrid, 88 p.
Moya, M. (1943): Instituto Geológico y Minero de España. *Boletín Oficial de Minas, Metalurgia y Combustibles*, 24, 67-83.
Schulz, G. (1856): *Memoria que comprende el resumen de los trabajos verificados en el año 1854 por las diferentes secciones de la comisión encargada de formar el Mapa Geológico de la provincia de Madrid y el general del Reino*. Imprenta Eusebio Aguado, Madrid, 39 p.

El IGME y su contribución a la exploración de hidrocarburos en España.

The IGME and its contribution to the hydrocarbon exploration in Spain.

J. Navarro Comet[1]

1 Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo (AGGEP) jorge.ncomet@gmail.com

Resumen: A principios del siglo XX, la Comisión del Mapa Geológico de España, precursora del actual Instituto Geológico y Minero de España (IGME), comenzó a participar en la exploración de hidrocarburos. Inicialmente, la Comisión asesoró a pequeñas empresas privadas de investigación petrolera. Tras su cambio de nombre a Instituto Geológico de España (IGE) en 1910, la organización reclutó a tres jóvenes ingenieros de minas para formarse y especializarse en geología del petróleo. Desde 1913 hasta 1928, el Instituto adoptó un enfoque directo en la exploración de petróleo, perforando pozos con su propio equipo o subcontratándolos, aunque sin lograr un éxito comercial. En 1928, bajo la supervisión del recién renombrado IGME, se realizaron en España los primeros estudios de gravimetría y sísmica con objetivos petroleros. A partir de 1929, el IGME continuó asesorando al Estado y a empresas petroleras en España, pero se abstuvo de participar directamente en las operaciones de perforación. No obstante, el Instituto actuó como contratista en campañas geofísicas hasta la década de 1960. Una de las contribuciones más destacadas del IGME a la literatura de la geología del subsuelo ha sido la compilación y publicación de fichas resumen de todos los pozos de hidrocarburos perforados en España desde 1941 hasta 1986, una valiosa fuente de datos que debería completarse y actualizarse.

Palabras clave: IGME, exploración, historia, hidrocarburos, subsuelo

Abstract: *In the early 20th century, Spain's Geological Map Commission, the precursor of the today's Geological and Mining Institute of Spain (IGME), embarked on hydrocarbon exploration. Initially, the Commission provided guidance to small private oil exploration companies. Upon its rebranding as the Geological Institute of Spain (IGE) in 1910, the organization enlisted three young mining engineers to train and specialize in petroleum geology. From 1913 to 1928, the Institute took a direct approach to oil exploration, drilling wells using its own equipment or subcontracting rigs, albeit without achieving commercial success. In 1928, under the renamed IGME's oversight, Spain acquired the first gravity and seismic surveys targeting oil objectives. From 1929 onward, the IGME continued advising the State and oil companies in Spain but refraining from direct involvement in drilling operations. Nonetheless, the Institute acted as contractor in geophysical surveys until the 1960s. One of the IGME's most notable contributions to subsurface geology literature has been the compilation and publication of summary sheets for all hydrocarbon wells drilled in Spain from 1941 to 1986, a valuable data source that would require further completion and updating.*

Key words: *IGME, exploration, history, hydrocarbons, subsurface*

INICIOS DE LA INVESTIGACIÓN PETROLERA

A principios del siglo XX, la Comisión del Mapa Geológico de España, precursora del actual Instituto Geológico y Minero de España (IGME), comenzó a participar en la exploración de hidrocarburos, proporcionando su asesoramiento a pequeñas empresas privadas que llevaban a cabo perforaciones de pozos de investigación de petróleo en España. Unas empresas que a menudo contaban con unos recursos técnicos y económicos muy limitados, siendo los escasos pozos perforados poco profundos y en su mayoría localizados con escasa o nula base geológica.

Uno de los primeros miembros de la Comisión del Mapa Geológico involucrados en la exploración petrolera fue el ingeniero de minas Lucas Mallada Pueyo, quien fue requerido en 1909 para asesorar a dos de las compañías que en ese momento estaban perforando pozos de investigación de gas natural en Lebrija (Sevilla) y de petróleo en Villamartín (Cádiz), donde en 1906 se habían encontrado unas impregnaciones de petróleo en unas calizas triásicas al ensanchar un canal de un molino harinero (Puche y Navarro, 2019). En 1910, Mallada recomendó a estas compañías un estudio geológico de la región y la perforación de más pozos para determinar la extensión de las posibles acumulaciones de hidrocarburos. Desafortunadamente, y a pesar de realizarse algunas perforaciones adicionales en las que se obtuvieron pequeñas producciones de petróleo y gas, no se alcanzó el éxito comercial deseado.

La creciente actividad de investigación por parte de compañías privadas y el posible potencial petrolífero del subsuelo español hizo que, en 1910, bajo el nuevo de nombre de Instituto Geológico de España (IGE) e impulsado por su director Luis de Adaro y Magro, este organismo empezara a involucrarse directamente en la investigación petrolífera. Para ello, tres jóvenes ingenieros de minas, Pedro de Novo Fernández-Chicarro, Enrique Dupuy de Lôme Vidiella y Juan Gavala Laborde, recién incorporados al IGE, fueron seleccionados para especializarse en geología del petróleo.

Juan Gavala fue el primer comisionado del IGE en visitar los campos de petróleo de Rumania en 1911. Años después, en 1921, Pedro de Novo y Enrique Dupuy viajarían a Estados Unidos y Méjico con el objetivo de visitar y estudiar campos de petróleo en funcionamiento. En 1928, el ingeniero de minas del IGE Primitivo Hernández-Sampelayo, quien, aun no siendo su especialidad también se involucró en el estudio del potencial petrolero del subsuelo español, viajó a Rumania para estudiar su producción de petróleo y en 1931 visitó los más importantes yacimientos de petróleo de Italia. Todos estos viajes tenían como objetivo adquirir conocimientos sobre la geología del petróleo, así como las técnicas utilizadas en la exploración y producción de recursos petrolíferos en otros países para luego desarrollar una labor más efectiva en España.

El creciente interés del IGE por el estudio de los recursos petrolíferos se vio reflejado por los trabajos de Juan Gavala, uno de los pioneros de la geología petrolera en España, quien publicó un extenso monográfico sobre el potencial petrolífero de Andalucía (Gavala, 1916). En este trabajo, tras un exhaustivo repaso a la geología, las manifestaciones de hidrocarburos y los trabajos realizados hasta la fecha, Gavala expresó su pesimismo sobre el posible descubrimiento de yacimientos de importancia industrial en el subsuelo andaluz

El IGE también llevó a cabo estudios sobre otras regiones con potencial petrolífero, como las arenas asfálticas de Fuentetoba (Soria), explotadas mediante pozos y galerías desde mediados del siglo XIX (O`Shea, 1918). También estudió las pizarras bituminosas de Rubielos de Mora (Teruel), Ribesalbes (Castellón) y Puertollano (Ciudad Real), unos yacimientos que habían sido explotados a principios del siglo XX para la destilación y producción de petróleo, aunque con escaso éxito comercial (Puche y Navarro, 2019).

PRIMEROS POZOS DE INVESTIGACIÓN

En 1913, el Ministerio de Fomento decidió llevar a cabo trabajos de perforación de investigación geológica, petrolera e hidrogeológica por cuenta del Estado a través del IGE, para lo cual se adquirieron dos trenes de sondeo a la empresa francesa ‘Hulster Fréres’.

En 1914, bajo la supervisión de su director Luis de Adaro, el IGE perforó su primer pozo de investigación geológica en Caldones (Asturias). El objetivo era reconocer la prolongación de los materiales del Carbonífero por debajo de la cobertera Triásica (Ruiz, 1916). Durante la perforación se produjo una fuerte erupción de gas natural al atravesar unas pizarras y calizas carboníferas a los 563 metros, lo que provocó una gran explosión que destruyó e incendió la maquinaria de perforación (Fig. 1). El caudal inicial del pozo se estimó en unos 20.000 metros cúbicos de gas al día. Curiosamente, aunque el objetivo del primer pozo de investigación geológica perforado por el IGE no era propiamente la investigación de hidrocarburos, resultó en un descubrimiento inesperado de gas natural, que pasó a ser conocido popularmente en la zona como el «*Mecheru de Caldones*».



FIGURA 1. *Caldones, primer pozo de investigación geológica perforado por el IGE. Foto de Ignacio Patac tomada en enero de 1915 durante la visita al sondeo - aún en llamas - del entonces director del Instituto, Luis de Adaro, que aparece de espaldas y con sombrero. (Fuente: Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo).*

En 1914, siguiendo la recomendación de Lucas Mallada y Juan Gavala, el IGE trasladó uno de sus trenes de sondeo para perforar un pozo de investigación petrolera a Villamartín (Cádiz). Los problemas en el suministro de material a raíz del estallido de la Primera Guerra Mundial complicaron enormemente su perforación, que finalizó en 1915 a los 376 metros de profundidad (Fig. 2). En 1923, el IGE perforó un segundo pozo de investigación petrolera en Bornos (Cádiz), que también resultó negativo y tuvo que ser abandonado a los 352 metros por problemas mecánicos.

Ante los escasos resultados obtenidos por el IGE en sus perforaciones petrolíferas, en 1924 se aprobó la transferencia de la ejecución de los trabajos de perforación petrolera por cuenta del Estado al Ministerio de Fomento, en colaboración con la Jefatura de Minas del distrito correspondiente. No obstante, el IGE continuaría encargándose del estudio y la propuesta de las áreas a investigar por parte del Estado, así como la elaboración de los planes de trabajo y presupuestos. A su vez, se estableció que cualquier nuevo trabajo de perforación realizado por cuenta del Estado se ejecutaría mediante el sistema de contrata.

Bajo este nuevo sistema contractual, el IGE supervisó la perforación de varios sondeos, cuya realización fue adjudicada en 1924 a la ‘Sociedad Petrolera Ibero-

Americana', que disponía de un equipo de perforación capaz de superar los 1.000 metros de profundidad. El primer sondeo fue perforado en Robredo-Ahedo (Burgos) que alcanzó 1.061 metros de profundidad y en el que se obtuvieron unos 70 litros de petróleo, insuficientes para justificar una producción comercial. Un segundo pozo fue perforado en Ajo (Cantabria) en 1926, que alcanzó con éxito la profundidad final proyectada de 1.200 metros, pero con resultado negativo. En Fuentetoba (Soria), el IGE perforó un pozo en 1928 para investigar el potencial petrolífero de unas arenas asfálticas, atravesando múltiples niveles ricos en bitumen hasta su profundidad final de 398 metros. Ese mismo año, el IGE inició la perforación en Liendo (Cantabria). Sin embargo, apenas perforados 120 metros, se detuvo su ejecución debido a la decisión del Gobierno de interrumpir las investigaciones petrolíferas a cargo del Estado. La implantación del monopolio estatal de petróleos en 1927 y el otorgamiento de su gestión en 1928 a la 'Compañía Arrendataria del Monopolio del Petróleo, S.A.' (CAMPSA), supuso un cambio en la política con relación a la prospección de recursos petrolíferos, e hizo que en 1929 el IGME dejara de involucrarse directamente en la perforación con objetivos petroleros.

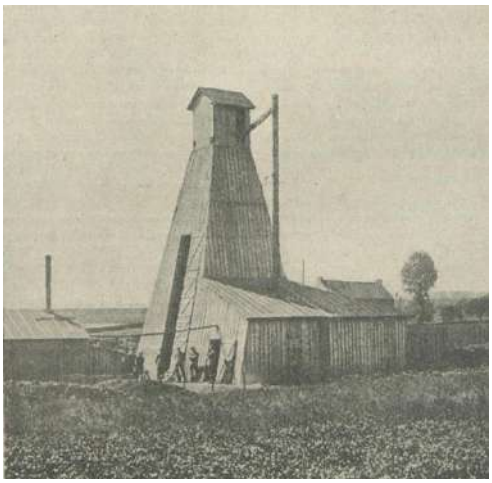


FIGURA 2. *Villamartín, primer sondeo de investigación petrolera perforado por el IGE (Huerta, 1918).*

APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS

Al clausurarse el XIV Congreso Geológico Internacional, celebrado en Madrid en mayo de 1926, se decidió reorganizar el Instituto, que pasó en 1927 a ser denominado Instituto Geológico y Minero de España (IGME), orientándolo hacia una "misión técnico-industrial geológica y minera". Una de las conclusiones del Congreso Geológico fue la constitución del «Comité Nacional de Sondeos» con la participación del IGME, que inició una recopilación de la información de los sondeos más importantes perforados en España para investigar aguas, obras hidráulicas, potasas y petróleo.

Otra de las conclusiones derivadas del Congreso fue la creación de una «Sección de Geofísica» dentro del IGME, un acontecimiento decisivo en la Geofísica española. La «Sección de Geofísica» tenía como objetivo llevar a cabo estudios geofísicos para investigar cuatro productos fundamentales en la industrialización del país: carbón, hierro, aguas subterráneas y petróleo. Al frente de esta Sección se nombró al ingeniero de minas José García-Siñeriz, quien destacó internacionalmente por su intensa labor profesional en geofísica, tanto en la investigación básica como en la aplicada, especialmente en métodos sísmicos y gravimétricos. Fue autor del primer libro en español sobre geofísica aplicada con el título "Los métodos geofísicos de prospección y sus aplicaciones a la resolución de varios problemas geológico-tectónicos" (García-Siñeriz, 1928), un trabajo que contribuyó al avance de la geofísica como herramienta de prospección.

En 1927, el IGME adjudicó mediante concurso público los primeros trabajos de gravimetría y sísmica para investigación petrolera en España a dos empresas privadas: 'Geos, S.A.' fundada en 1926 y 'La Geofísica S.A.'. Estos trabajos geofísicos se llevaron a cabo en el anticlinal de El Burgo de Osma y en Berlanga del Duero, ambos en la provincia de Soria, así como en Basconcillos del Tozo y en el anticlinal de Leva, los dos en la provincia de Burgos.

Tras haber concluido los anteriores trabajos, el IGME dotó a su «Sección de Geofísica» con aparatos de última generación, como una balanza de torsión, varias balanzas magnéticas y un conjunto de sismógrafos y registradores para prospecciones sísmicas de refracción (Anduaga, 2009). Gracias a este apoyo, García-Siñeriz y sus colaboradores adquirieron el conocimiento y experiencia suficientes para aplicar los métodos geofísicos en la investigación y exploración del subsuelo, que resultó fundamental en el avance de la Geofísica en España.

ASESORAMIENTO EN EXPLORACIÓN

A partir de 1929, el IGME continúo asesorando al Estado en todo lo concerniente a actividades y trabajos de exploración de hidrocarburos, pero sin participar directamente en su ejecución. Como parte de esta labor de asesoramiento se designó a Enrique Dupuy como representante técnico del Estado en la comisión de CAMPSA que viajó en junio de 1929 a Estados Unidos, Venezuela y México (Navarro, 2022). El objetivo de este viaje era adquirir concesiones de exploración y producción de petróleo para CAMPSA, que resultó pocos meses después en la creación de la 'Compañía Española de Petróleos, S.A.' (CEPSA).

Desde su creación en 1928, CAMPSA no se había involucrado en actividades de exploración petrolera hasta que, en diciembre de 1932, el Consejo de Ministros de la República aprobó la creación de un «Comité de Investigaciones Petrolíferas», que contó con la participación de CAMPSA y la colaboración del IGME. Dupuy, que había adquirido un gran conocimiento de la geología del petróleo en sus múltiples viajes a países productores, fue nombrado representante del IGME en este Comité, cuya labor quedaría interrumpida por el estallido de la Guerra Civil.

En 1937, Dupuy, siendo director del IGME, publicó el primer catálogo de indicios de hidrocarburos de la Península Ibérica y la costa atlántica del entonces Protectorado Español en Marruecos (Dupuy, 1937). Esta recopilación fue de gran importancia para la posterior exploración de recursos petrolíferos, convirtiendo a Dupuy, junto a sus conocimientos en geología del petróleo, en un pionero de la exploración en España (Navarro, 2022).

Tras la Guerra Civil, el IGME continuó proporcionando servicios y asesoramiento técnico en exploración petrolera, principalmente a compañías estatales, como CAMPSA o la 'Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A.' creada en 1942 por el Instituto Nacional de Industria (INI), pero también a la privada CEPSA. El IGME participó como contratista para compañías petroleras en campañas geofísicas, tanto de gravimetría como de sísmica de reflexión en colaboración con la compañía británica 'Seismograph Service Ltd.' y la francesa CGG. También realizó evaluaciones e informes sobre el potencial exploratorio de la Península Ibérica, el Protectorado de Marruecos y el Sahara Español. Su actividad como contratista para empresas privadas concluyó en la década de 1960. Sin embargo, continuó asesorando al Estado y sus empresas en asuntos relacionados con la exploración petrolera. Un ejemplo es el estudio de investigación y evaluación de los recursos de pizarras bituminosas en España que el IGME llevó a cabo dentro del Plan Energético Nacional, cuando tras la crisis energética mundial de los años 1970 estas pizarras fueron consideradas como una posible fuente alternativa para la obtención de hidrocarburos.

Desde entonces, el IGME ha venido prestando asesoramiento a las Administraciones Públicas en la gestión de los recursos energéticos y almacenamientos geológicos, y a su vez colaborando con la industria mediante la firma de acuerdos y convenios para el estudio e investigación del subsuelo.

BASE DE DATOS DEL SUBSUELO

El IGME dispone actualmente de un extenso archivo documental y una amplia base de datos - en formato físico y digital - de sondeos y líneas sísmicas adquiridas por las compañías petroleras. Todo ello fácilmente accesible y abierto al público en su portal web. Además, cuenta con una litoteca que alberga una gran cantidad de muestras de rocas (testigos y ripios) obtenidas durante la perforación de pozos de investigación petrolera.

Entre las publicaciones del IGME sobre hidrocarburos cabe destacar "Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España" (IGME, 1987), una de las obras habitualmente citadas en la literatura geológica sobre nuestro subsuelo (Fig. 3). En este trabajo se recopilan las fichas resumen de los más de 630 pozos de hidrocarburos perforados en España entre 1941 y 1986. Una obra que ha sido de gran utilidad para el avance del conocimiento científico del subsuelo español, aunque la información que ofrece es muy básica y a veces incompleta. Por ello, esta publicación debería completarse y actualizarse con la información de todos los pozos de investigación petrolera, junto a otros pozos profundos perforados en España desde principios del siglo XX hasta la actualidad.

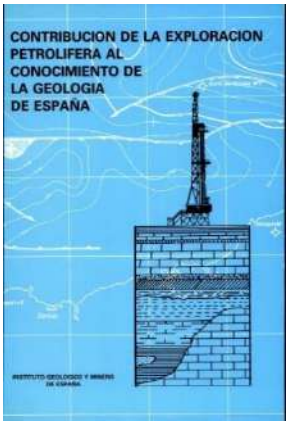


FIGURA 3. *Portada del libro "Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España" (IGME, 1987),*

AGRADECIMIENTOS

A Isabel Rábano por la revisión del texto y su empuje para presentar este artículo con motivo del 175º aniversario de la creación del IGME.

REFERENCIAS

Anduaga Egaña, A. (2009): *Geofísica, economía y sociedad en la España contemporánea*. Estudios sobre la Ciencia, 56. CSIC. Madrid, 384 p.

Dupuy de Lôme Vidiella, E. (1937): Las investigaciones de petróleo en España. *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España*, 54: 333-386.

García Siñeriz, J. (1928): *Los métodos geofísicos de prospección y sus aplicaciones a la resolución de varios problemas geológico-tectónicos*. Tip. y Lit. Coullaut, Madrid, 507 p.

Gavala Laborde, J. (1916): Regiones petrolíferas de Andalucía. *Boletín del Instituto Geológico de España*, 37: 27-182.

Huerta Topete, J. (1918): Estudio sobre el petróleo en España. *España Automóvil y Aeronáutica. Revista Quincenal Ilustrada de Locomoción*, 3: 24-28.

IGME (1987): *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España*. IGME, Madrid, 465 p.

Navarro Comet, J. (2022): Enrique Dupuy de Lôme Vidiella (1885-1965), un pionero de la exploración de petróleo en España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 35(2): 73-91

Puche Riart, O. y Navarro Comet, J. (2019): Una historia de la exploración y producción de hidrocarburos en España. *De Re Metallica*, 33: 3-32.

O'Shea, G. (1918): Informe del Instituto Geológico sobre las pizarras bituminosas de la provincia de Soria. *Boletín Oficial de Minas y Metalurgia*, 2: 29-40.

Ruiz Falcó, M. (1916): El sondeo de Caldones en Asturias. *Boletín del Instituto Geológico de España*, 37: 3-26.

La identificación de la espinela y la ciencia árabe medieval.

The identification of spinel and the medieval arabic science.

M.C. Osácar Soriano[1] y M.A. Pellicer García[2]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Grupo Geotransfer – IUCA, C/ Pedro Cerbuna 12, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain, cinta@unizar.es
2 AGEDA (Asociación Gemológica de Aragón), Avda. Valencia, 51, 50005 Zaragoza, Spain mipelgar@gmail.com

Resumen: La identificación de la espinela como mineral se suele fechar a finales del s. XVIII y se supone que antes se confundía con el rubí, al cual se parece cuando presenta color rojo. Sin embargo, existen tratados de gemas escritos en árabe que evidencian una identificación de la espinela, con el término baljás, basada en propiedades físicas, al menos desde el s. XI. Esta diferencia aparece también fuera del contexto académico, en relatos de viajes y en un inventario de joyas. Este conocimiento pasó a los lapidarios europeos medievales, al menos parcialmente, y se usaba también el término árabe baljás o derivados de él. Además, la palabra espinela ya aparece en el s. XVI en Europa con su significado actual. Sin embargo, en el s. XVIII desaparece en Europa la identificación de la espinela, por causas desconocidas, y se engloban en el concepto de rubí diversos términos históricamente relacionados cn él.

Palabras clave: espinela, rubí, lapidarios, Al Biruni, Al Tifaschí.

Abstract: *The identification of spinel as a mineral is commonly attributed to the late 18th century, and it is believed that prior to this period, it was often confused with ruby, due to their similarities when spinel displays a red color. However, Arabic gem treatises, dating back to at least the 11th century, provide evidence of spinel identification, named as baljas", on the basis of physical properties. This distinction occurs not only in academic contexts but also in some travel accounts and in a jewelry inventory. This knowledge was partially transmitted to medieval European lapidaries, where the Arabic term baljas or its derivatives were employed. Furthermore, the term "spinel" itself appears in Europe in the 16th-century with its current meaning. Nevertheless, in the 18th century, the identification of spinel disappeared in Europe for unknown reasons, and diverse terms historically associated with ruby were encompassed under the concept of ruby.*

Key words: *spinel, ruby, lapidaries, Al Biruni, Al Tifaschí.*

EL PROBLEMA DE LA IDENTIFICACIÓN DE LA ESPINELA

La espinela ($MgAl_2O_4$,) es un mineral con dureza (7½ - 8) y brillo elevados (n=1,719), que, además, puede presentar colores atractivos, especialmente rojo, por la presencia de impurezas de Cr^{3+}. Todas estas son buenas cualidades gemológicas, sin embargo, la espinela no figura entre las gemas más conocidas, probablemente debido a su confusión con el rubí (Al_2O_3,), también rojo por impurezas de Cr^{3+} y con propiedades similares (dureza= 9; n= 1,762 - 1,770). Es conocido el caso del denominado "rubí Príncipe Negro" de la corona imperial británica, que en realidad es una espinela roja de 170 quilates (Fig. 1). El nombre espinela se considera reciente y es generalmente atribuido a John Demeste en 1779, tal como refleja la base de datos Mindat, que también alude la confusión de la espinela con el rubí (Mindat). En ocasiones la espinela se ha denominado "rubí balas", estableciendo así alguna diferencia entre ambas gemas, sin llegar a considerarlas especies distintas. Este uso ha llegado prácticamente hasta la actualidad y la base de datos Mindat también recoge el término rubí balas, como una variedad de espinela.



FIGURA 1. *Corona imperial británica con el denominado "Ruby Príncipe Negro" delante. Foto: Cyril James Humphries Davenport, Public domain, via Wikimedia Commons.*

LA ESPINELA EN LA CIENCIA ÁRABE MEDIEVAL

A diferencia de Europa, en época medieval la espinela aparece como gema diferente del rubí en algunos textos de autores de lengua árabe, identificada por sus

propiedades físicas. Ya en el s. XI Al Biruni la reconoce por su peso específico (Said, 1989); en el s. XIII Al Tifaschí le atribuye una dureza menor que la del rubi y, además, menciona que puede tener color amarillo o verde, no sólo rojo (Abul Huda, 1998). El término utilizado en árabe era "baljás", derivado de la región de Badajsán o Balajsán, una región productora de espinelas, en la actual frontera entre Afganistán y Tayiquistán, y del cual procede el término "balas" usado en Europa como calificativo del rubí.

Es decir, en el entorno cultural de lengua árabe al menos desde el siglo XI se identificaba la espinela como diferente del rubí (Pardieu y Farkhodova, 2019).

La identificación de la espinela no se produce sólo en el entorno académico. Puede encontrarse en un inventario de joyas del siglo XI-XII (Chaves Hernández, 2006) y también en relatos de viajeros que visitaban las regiones de donde se extraía la espinela, por ejemplo, en el relato de Marco Polo (s. XIII), que las denomina "balax" (Polo, 1999) o Ibn Batuta (s. XIV), que las denomina "al-balajs" (Espinar Moreno, 2019).

LA ESPINELA EN EUROPA

En Europa el término balas aparece en algunos lapidarios, medievales y posteriores, probablemente procedente de fuentes árabes. Por ejemplo, el *Liber de lapidibus* de Marbodeo, obispo de Rennes (1040-1123) (Pardieu y Farkhodova, 2019). En *De Mineralibus*, de Alberto Magno (1193-1280), con influencia de Avicena, aparece el "balagius" o "palatius" separado del rubí o carbunclo (Wyckoff, 1967). También el libro dedicado a las gemas dentro de la obra *De proprietatibus rerum* de Bartholomaeus Anglicus (1240), ampliamente traducido y difundido en Europa durante varios siglos, menciona el "balagio" o "belagio" como una especie de carbunclo (Anglicus, 2000).

En cuanto al término espinela, aparece ya en el Quilatador de la Plata, Oro, y Piedras de Juan de Arfe (1572) como un epígrafe propio: "*La Espinela es una especie de rubí de buen color encendido… y es más blanda que el rubí…*" (Arfe, 1976). Es decir, aparece la palabra espinela con una descripción similar a la del balas, incluyendo la diferencia de dureza que citaban autores árabes, por tanto, designa ya la espinela en sentido moderno.

Sin embargo, en el s. XVIII este conocimiento parece difuminarse. En la Enciclopedia *Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (1751-1772) de Diderot y d'Alembert, en la entrada correspondiente al rubí, se distinguen varios tipos: rubí verdadero, albandino o almandino, también llamado carbunclo, rubí balas, rubí espinela y rubicela o rubacela. Es decir, engloba diversos términos históricamente relacionados con el rubí, pero sin diferenciarlos. Y, aunque hay una entrada diferente para la espinela, la explica como una diferencia de color, e incluso menciona que tiene la misma dureza que el rubí (ENCCRE). La causa de esta pérdida de información está aún por dilucidar, pero es posible encontrar alusiones a que esta diferencia no hubiera existido hasta el s. XVIII, como la citada de la base de datos Mindat.

CONCLUSIONES

La espinela se distinguió del rubí en el contexto cultural de lengua árabe al menos desde el s. XI, a partir de las espinelas procedentes de Tayiquistán. Esta distinción aparece también en entornos no académicos.

Este conocimiento pasó a Europa ya en época medieval, aunque de forma menos precisa, como lo recogen diversos lapidarios.

En el s. XVIII esta diferenciación no se refleja en obras como la Enciclopedia de Diderot y d'Alambert, y aún hoy se considera que la distinción entre rubí y espinela surge a finales del s. XVIII.

REFERENCIAS

Abul Huda, S.N. (1998): *Arab roots of Gemology.* The Scarecrow Press Inc. Lanham, Md, & London, 271 pp.

Anglicus, B. (2000): *Tratado de los metales y piedras preciosas y de sus virtudes*. Edición. facsímil. Asociación mineralógica aragonesa, Museo de Ciencias Naturales de Álava, Asociación de museos, grupos y colecciones de Mineralogía y Paleontología, Zaragoza.

Arfe, J. (1976): *Quilatador de la plata, oro y piedras. Libro tercero.* Edición facsímil. Servicio de Publicaciones, Ministerio de Educación y Ciencia.

Chaves Hernández, E. (2006): *Una relación de joyas reales de Yemen: El testamento de la Reina Libre sulayhí al-Sayyida Arwà bint Ahmad (440-532/1048-9-1138).* MEAH, Sección Árabe-Islam, 55, 49-70. Disponible en: https://digibug.ugr.es/handle/10481/2554

(ENCCRE) *Édition Numérique Collaborative et CRitique de l'Encyclopédie.* Disponible en: http://enccre.academie-sciences.fr/encyclopedie/

Espinar Moreno, M. (2019): *Las joyas en el Islam. Reflexiones sobre Arqueología y artes menores*. Libros EPCCM, Granada. Disponible en: https://digibug.ugr.es/handle/10481/55444

Mindat: *Spinel*. [Consulta 30/01/2024]. https://www.mindat.org/min-3729.html

Pardieu, V. y Farkhodova, T. (2019): Spinel from Tajikistan: The gem that made famous the word "ruby". *InColor*, 43, 30-33.

Polo, M. (1999): *Viajes*. Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. Disponible en: https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmcjw896

Said, H.M. (1989): *The Book Most Comprehensive in Knowledge on Precious Stones.* Pakistan Hijra Council, 355 p.

Wyckoff, D. (1967): *Albertus Magnus Book of Minerals.* (Traducción). Clarendon Press, Oxford, 309 p.

"Yeso Estrella Negra de Villarroya" en las colecciones del Museo Geominero (IGME, CSIC): una posible historia de su hallazgo.

"Black Star Gypsum from Villarroya" in the Museo Geominero (IGME-CSIC): a possible history of its discovery.

L. Otaño[1], C. Laplana[2], M.A. Galindo-Pellicena[3], R. Celorrio[1], N. Garrido[1], J. Toivonen[1] y E.L. Pueyo[4]

1 Asociación de Amigos de Villarroya, c/ Capellanía 19, 26587 Villarroya, La Rioja. luis.otano@unirioja.es
2 Museo Arqueológico y Paleontológico de la Comunidad de Madrid. Pza. Bernardas s/n, 28801 Alcalá de Henares, Madrid.
3 Centro Mixto UCM-ISCIII de Evolución y Comportamiento Humanos, c/ Monforte de Lemos 5, 28029 Madrid.
4 IGME (CSIC), Unidad de Zaragoza. Campus Aula Dei, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. unaim@igme.es

Resumen: Villarroya es una localidad bien representada en el Museo Geominero del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Además de la profusa presencia de huesos de mamíferos procedentes del yacimiento clásico del Cuaternario de esta localidad, en dicho museo también se encuentra el mineral que en este trabajo denominamos "Yeso Estrella Negra de Villarroya". En este trabajo se plantea una hipótesis de la llegada de dos ejemplares de este mineral al Museo del IGME a principios del s. XX. En este trabajo también proporcionamos el lugar y origen del hallazgo de nuevos ejemplares del mineral encontrados recientemente. La zona corresponde a las facies Escucha presentes en el Cabalgamiento de Cameros (LIG IB004) del Sistema Ibérico en la zona riojana. Debido a la inaccesibilidad actual del lugar en el que se han realizado los nuevos hallazgos, si no se localizan nuevas zonas accesibles con presencia de "Yesos Estrella Negra de Villarroya", esta variedad específica de yeso debe ser considerada poco frecuente.

Palabras clave: Yeso, Villarroya, Museo Geominero, patrimonio geológico mueble, minas de carbón.

Abstract: *Villarroya is a locality well represented in the Geominero Museum of the Instituto Geológico y Minero de España (IGME). In addition to the profuse presence of mammal bones from the classic Quaternary site of this town, the museum contains the mineral that in this work we call "Black Star Gypsum of Villarroya". In this work a historical hypothesis is proposed of the arrival of two specimens of this mineral to the Museum of the IGME at the beginning of the 20th century. In this work we also provide the place and origin of the discovery of new specimens of the mineral recently found. The area corresponds to the Escucha facies of the Cameros Thrust (LIG IB004) of the Iberian System in the Rioja area. Due to the current inaccessibility of the locality in which the new finds have been made, if new accessible areas with the presence of "Villarroya Black Star Gypsum" are not located, this specific variety of gypsum must be considered very rare.*

Key words: *Gypsum, Villarroya, Museo Geominero, movable geological heritage, coal mines.*

INTRODUCCIÓN

El mineral que en este trabajo denominamos "Yeso Estrella Negra de Villarroya" está representado en las colecciones del Museo Geominero del IGME.

En dicho museo existen dos ejemplares, y uno de ellos se encuentra expuesto y etiquetado como "Yeso $CaSO_4 2H_2O$ "Minas de Villarroya" Villarroya (La Rioja)" (Fig. 1). Se conservan en la Colección de Minerales de las Comunidades y Ciudades Autónomas.

En 2013 se constituye el LIG IB004 con denominación: Cabalgamiento Cenozoico de Cameros en el cual se recogen como aspectos de interés los yesos negros de Villarroya: "Desde el punto de vista mineralógico, las minas de lignito de la zona de Villarroya presentan unos curiosos yesos bien cristalizados con inclusiones carbonosas, llegando los ejemplares a ser totalmente negros. Estos yesos constituyen una curiosidad mineralógica, siendo el mejor ejemplo en La Rioja, estando a la altura de los encontrados en Teruel (Ariño, Utrillas, Montalbán). Se presentan a menudo en agregados estrellados, por lo que localmente son conocidos como "Yeso estrella de Villarroya".

La actualización de las colecciones de minerales del Museo Geominero del IGME incluye la publicación del folleto dedicado a La Rioja en el que se incluye una figura de uno de los ejemplares del "Yeso Estrella Negra de Villarroya" (Jiménez et al., 2020).

El marco geológico en el que aparece el mineral son las facies Escucha. Para la zona de Villarroya, estas facies se sitúan en el Cabalgamiento de Cameros. Por encima son cabalgadas por calizas de facies de Cortes de Tajuña más antiguas. Las facies Escucha a su vez cabalgan sobre conglomerados del Eoceno de Turruncún. Las facies Escucha de Villarroya presentan estratos con conglomerados, arenas caoliníferas y con cuarzo, lutitas y capas de carbón (Durantez et al., 1982). En las facies

Escucha y Utrillas de otros lugares de la Península Ibérica se cita la presencia de minerales: yeso, goethita, hematites, calcita, caolinita y cuarzo (Mata-Perello et al., 2015). Sin ser considerados minerales estrictamente hablando, también en las facies Escucha aparecen carbón lignito, ámbar (Delclos et al., 2007) y azabache (Ona,1998).



FIGURA 1. *"Yeso Estrella Negra de Villarroya", ejemplar expuesto en el Museo Geominero del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).*

Los "Yesos Estrella Negra de Villarroya" son minerales que cristalizan dando lugar a maclas en forma de estrella con varias puntas, en algunos casos dispuestas en un plano y en otros casos las puntas se presentan en tres dimensiones (Figs. 2 y 3).



FIGURA 2. *"Yeso Estrella Negra de Villarroya". Villarroya, La Rioja (España).*



FIGURA 3. "*Yeso Estrella Negra de Villarroya". Villarroya, La Rioja (España).*

También pueden aparecer ejemplares que presentan crecimiento paralelo de cristales (Fig. 5).



FIGURA 4. *Muestra de "Yeso negro de Villarroya" con crecimiento de cristales de forma paralela. Villarroya, La Rioja (España).*



FIGURA 5. *Muestra de "Yeso Estrella Negra de Villarroya" que se asemeja a una estrella fugaz. Villarroya, La Rioja (España).*

Excepcionalmente aparecen combinaciones de cristales en forma de estrella con cristales que presentan crecimiento paralelo, lo que recuerda una estrella fugaz (Fig. 5).

El color de los yesos es negro intenso por la presencia de partículas de color negro incluidas en el interior de los cristales.

El yeso es un mineral común y maclas en forma de estrellas son frecuentes en yacimientos de Alemania, Argelia, Bélgica, Italia, EEUU, Francia y Méjico entre otros. En España aparecen en Teruel (Ariño y en otras zonas de facies Escucha).

Por otro lado, yesos negros con colores originados por la inclusión de partículas carbonosas ya no son tan frecuentes, aunque aparecen, por ejemplo, en La Rioja (Cornago) y con ligera opacidad en Teruel y en Francia (Isère, Sinard), pero no presentan forma de estrella.

En este trabajo planteamos una hipótesis histórica sobre la presencia de las dos muestras de "Yeso Estrella Negra de Villarroya" en las colecciones del IGME y precisamos la procedencia geográfica del mineral en la actualidad.

DATOS Y RESULTADOS

El "Yeso Estrella Negra de Villarroya" es un mineral asociado a la explotación de las minas de carbón de Villarroya. Esta explotación comienza en 1857 y finaliza en 1968.



FIGURA 6. *Eduardo Carvajal y Acuña conduciendo y Francisco Cervantes Jimeno, a su lado, ingenieros de las minas de Villarroya, Turruncún y Préjano. Años 20 del s. XX, en la zona de Villarroya*.

Un momento de fuerte avance del conocimiento científico sobre la geología de los terrenos en los que se encuentran las minas de carbón de Villarroya, se produce gracias al trabajo del ingeniero de minas don Eduardo Carvajal y Acuña. Carvajal siempre estuvo en contacto con el IGME y mantuvo una actividad muy proclive hacia la investigación y generación de conocimiento. Como hipótesis histórica planteamos que fue Carvajal el descubridor de los yesos "Estrella Negra de Villarroya" durante su actividad en las minas de Préjano, Turruncún y Villarroya durante los años 20 del s. XX (Fig. 6). Sin embargo, hasta el momento no podemos asegurar documentalmente esta hipótesis.

Durante la realización de obras en el año 1998 en el cruce de las carreteras LR123, LR487 y LR488, en la zona de entrada al pueblo de Villarroya (Fig. 7), Rafael Celorrio Alfaro observó la presencia de yesos negros en forma de estrella en uno de los estratos de lutitas negras correspondiente a la mina de carbón Nuestra Señora del Pilar (s. XIX y principios del XX) y posteriormente "La Luisita" (años 40 y 50 del s. XX).

El hallazgo se produce en la tercera capa de lutita negra carbonosa, que contiene lentejones de carbón y que es la capa que aparece más baja en esa zona. En la actualidad, la zona del hallazgo se encuentra parcialmente cubierta y corresponde a la cuneta de la carretera LR123.



FIGURA 7. *Zona del hallazgo de Rafael Celorrio para los yesos "Estrella Negra de Villarroya".*

Es posible localizar algunos ejemplares atacados por la intemperie en otras zonas cercanas a la anteriormente descrita, en las que hay afloramientos de lutitas negras con lentejones de carbón, también pertenecientes a la concesión "Luisita" y anteriormente concesión "Nuestra Señora del Pilar" al pie de la carretera LR123.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El "Yeso Estrella Negra de Villarroya" es difícil de situar temporalmente desde el punto de vista de su descubrimiento histórico.

El hecho de que Carvajal depositase en el museo del IGME los restos de mamíferos fósiles recogidos en el yacimiento de Villarroya, junto con datos geológicos de la zona (Carvajal, 1926), apoya la hipótesis planteada sobre la procedencia de este mineral, aunque no permite asegurarla.

En su caso, más modernamente, es el trabajo de exploración mineralógica de Rafael Celorrio Alfaro el que recientemente proporciona ejemplares del mineral "Yeso Estrella Negra de Villarroya".

El afloramiento de los hallazgos recientes del mineral en el cruce de las carreteras LR123, LR487 y LR488 no se encuentra accesible, pues se encuentra cubierto por la propia carretera. Hasta el momento, y en tanto no se produzcan nuevos hallazgos, los ejemplares existentes de este mineral son sumamente escasos, pudiéndose estimar en menos de un centenar. A pesar de que el yeso se encuentra frecuentemente cristalizado en maclas que adquieren forma de estrella y que puede presentar color negro por la presencia de partículas carbonosas, las muestras de "Yeso Estrella Negra de Villarroya" son excepcionales en cuanto a la unión de estas dos características presentando una total opacidad para el color negro.



FIGURA 8. *Muestras de "Yeso Estrella Negra de Villarroya" en la exposición "Minas de carbón de Villarroya, combustibles fósiles y Cambio Climático" en enero de 2024 en la Casa de las Ciencias de Logroño.*

Debido a la actividad de divulgación científica que realiza la Asociación de Amigos de Villarroya y el Ayuntamiento de Villarroya, se han donado ejemplares de esta variedad mineral a distintos museos: Museo de Ciencias Naturales de Álava, Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de Zaragoza y Museo de Ciencias Naturales de Arnedo. El mineral ha sido expuesto al público en la Casa de las Ciencias de Logroño en el marco de la exposición "Minas de carbón de Villarroya, combustibles fósiles y Cambio Climático" (Fig. 8).

REFERENCIAS

Delclòs, X., Arillo, A., Peñalver, E., Barrón, E., Soriano, C., López del Valle, R., Bernárdez, E., Corral, C. y Ortuño, V.M. (2007): Fossiliferous amber deposits from the Cretaceous (Albian) of Spain. *Comptes Rendus Palevol*, 6: 135-149.

Durántez, O., Sole J., Castiella, J. y Villalobos, L. (1982): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 281 (Cervera del Río Alhama).* IGME, Madrid.

Jiménez Martínez, R., Hernández Pinilla, M.P., González Laguna, R., Torres Matilla, M.J. y Mayans López, C. (2020): *Colección de minerales de las Comunidades y Ciudades Autónomas 8. La Rioja*. Museo Geominero, Instituto Geológico y Minero de España.

Mata Perelló, J.M., Pocoví, A., Sanz, J. y Vilaltella, J. (2015): Recorrido por el patrimonio geológico y minero del Bajo Aragón, desde Seno a Aguaviva, Mas de las Matas, Foz-Calanda y Alcorisa. *Rodeno, revista de geología aragonesa*, 2: 1-16

Ona, J.L. (1998): Noticia de la extracción y elaboración del azabache en la villa y tierra de Montalbán. *Antigrama*, 13: 427-435.

La participación histórica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en las excavaciones del yacimiento clásico de Villarroya.

The historic participation of the Instituto Geológico y Minero de España (IGME) in the excavations in the classic Villarroya site.

E.L. Pueyo[1], C. Laplana[2], M.A. Galindo-Pellicena[3], Á. Salazar[4], J.C. Jiménez[5] y L. Otaño[5]

1 IGME (CSIC), Unidad de Zaragoza. Campus Aula Dei, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. unaim@igme.es
2 Museo Arqueológico y Paleontológico de la Comunidad de Madrid. Pza. Bernardas s/n, 28801 Alcalá de Henares, Madrid.
3 Centro Mixto UCM-ISCIII de Evolución y Comportamiento Humanos, C/Monforte de Lemos 5, Madrid.
4 IGME (CSIC), c/ La Calera, 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. a.salazar@igme.es
5 Asociación de Amigos de Villarroya, c/ Capellanía CP26587 Villarroya La Rioja. luis.otano@unirioja.es

Resumen: El Instituto Geológico de España (IGE), anterior denominación del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) hasta 1927, durante los años 20 del siglo pasado participa en el descubrimiento del yacimiento clásico de mamíferos fósiles de Villarroya a través del ingeniero de minas don Eduardo Carvajal y Acuña. Este presenta el descubrimiento durante la celebración del XIV Congreso Geológico Internacional en 1926 en el edificio que luego será Museo Geominero del IGME. Posteriormente, en los años 40 el IGME financia tres nuevas excavaciones en este yacimiento, llevadas a cabo por Josep Fernández de Villalta y Miquel Crusafont Pairó. La existencia de fuentes documentales escritas en el Arxiu Crusafont del Institut Catalá de Paleontología Miquel Crusafont, y la existencia de fuentes orales entre los habitantes de Villarroya, así como fotografías, permite reconstruir y conocer las actividades realizadas en estas campañas de forma pormenorizada. Esto facilita conocer de forma precisa el origen de los conjuntos de materiales excavados. Las dos capas excavadas en el yacimiento se encuentran accesibles actualmente, lo que permite que el yacimiento pueda volverse a estudiar.

Palabras clave: Villarroya, Pliocuaternario, IGME, historia, microvertebrados.

Abstract: *In the 1920s, the Instituto Geológico de España (IGE), name that in 1927 became Instituto Geológico y Minero de España (IGME), participated in the discovery of the classic fossil mammal site of Villarroya through the mining engineer Eduardo Carvajal y Acuña. This presents the discovery during the celebration of the XIV International Geological Congress in 1926 in the building that would later become the IGME Geominero Museum. Later, in the 1940s, the IGME financed three new excavations at this site, carried out by Josep Fernández de Villalta and Miquel Crusafont Pairó. The existence of written documentary sources in the Arxiu Crusafont del Institut Catalá de Paleontología Miquel Crusafont, and the existence of oral sources among the inhabitants of Villarroya, as well as photographs, allows us to reconstruct and know the activities carried out in these campaigns in detail. This makes it easier to know precisely the origin of the groups of excavated materials. The two layers excavated in the site are currently accessible, which means that the site can be studied again today.*

Key words: *Villarroya, Pliocuaternary, IGME, history, microvertebrates.*

INTRODUCCIÓN

Villarroya posiblemente es la localidad más representada en el Museo Geominero del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), al menos en cuanto a presencia de materiales en vitrinas. Sin considerar materiales mineralógicos y atendiendo solo a los aspectos paleontológicos, la presencia de restos de mamíferos fósiles es muy abundante, debido al descubrimiento y a la participación del IGME en varias excavaciones en el yacimiento clásico de Villarroya.

El yacimiento clásico de grandes mamíferos de Villarroya se encuentra en la cuenca Pliocuaternaria de Villarroya, en La Rioja (España). La cuenca presenta un lago de origen tectónico que comienza a formarse en el Plioceno y posteriormente acaba colmatándose. El yacimiento clásico de grandes mamíferos de Villarroya corresponde a una fase aluvial posterior. El yacimiento fue descubierto por el IGME y excavado en otras tres ocasiones más por esta institución.

Para numerosos yacimientos excavados durante el s. XIX y hasta la primera mitad del s. XX se ha perdido el conocimiento preciso sobre cuál es la capa o capas en las que se encontraron los restos fósiles. En el caso del yacimiento de Villarroya esto no es así, puesto que se dispone de descripciones de las capas del yacimiento en la tesis de Josep Fernández de Villalta (Villalta, 1952). Además, de forma novedosa, en este trabajo se añade la descripción realizada por Miquel Crusafont Pairó en su diario, fechado en 1946 (Crusafont, 1946a), durante una

de las excavaciones financiadas por el IGME. Incluso se dispone de fotografías. Todas las capas descritas existen en la actualidad, con lo que el yacimiento nuevamente puede proporcionar información precisa y complementaria a la obtenida en anteriores excavaciones.

DATOS HISTÓRICOS Y RESULTADOS

El yacimiento clásico de grandes mamíferos de Villarroya es descubierto hacia 1920 por el peón caminero de Villarroya, Deogracias Jiménez Abad. En Villarroya se explotan minas de carbón y en las minas trabaja como ingeniero Eduardo Carvajal y Acuña (Fig. 1), el cual recibe la noticia de los hallazgos de Deogracias Jiménez Abad. Cuando Carvajal recibe la noticia de los hallazgos, rápidamente entiende la importancia de los mismos y entre 1920 y 1926 Carvajal realiza excavaciones en lo que será el yacimiento clásico de Villarroya. Entre esas fechas, los materiales que obtiene los lleva a Lyon y los estudia en colaboración con Charles Deperet (Carvajal, 1926).



FIGURA 1. *Eduardo Carvajal y Acuña en 1929.*

En 1926 el todavía denominado IGE inaugura un edificio para albergar la celebración del XIV Congreso Geológico Internacional y es en este edificio dónde Carvajal presenta los hallazgos de Villarroya. Posteriormente el edificio es reconvertido en el Museo Geominero del IGME y en el mismo se exponen los materiales estudiados por Carvajal.

Años después del descubrimiento del yacimiento, Josep Fernández de Villalta y Miquel Crusafont Pairó vuelven a Villarroya. Así, en abril de 1944 visitan durante solamente dos días el yacimiento con una ayuda del CSIC y con posible financiación del IGME. Son acompañados por Eugenio Pérez Jiménez, de Villarroya. Comunican a Agustín Marín y Bertrán de Lis los hallazgos realizados (Crusafont, 1944b). En junio envían al IGME restos fósiles de la campaña (Crusafont, 1944c).

En septiembre de 1944 nuevamente Villalta y Crusafont vuelven a trabajar en Villarroya. Primitivo Hernández-Sampelayo intercede ante el director del IGME, Agustín Marín y Bertrán de Lis, para conseguir la financiación del IGME (Villalta, 1952). Para esta campaña, de 10 días de duración, el IGME envía como delegados a Gregorio Ramírez y a José Ramón Bataller (Villalta, 1952). La excavación se realiza con ayuda de barrenos de dinamita que proporciona la mina La Milagrosa, y para su manejo cuentan con la ayuda de Benito Altimiras (Crusafont, 1944a). Los dos trabajadores de Villarroya con los que también cuentan son Eugenio Pérez Jiménez y Ángel Pérez Martínez.

En junio de 1946 Villalta y Crusafont vuelven a realizar trabajos en Villarroya (Fig. 2). Ya en mayo de 1946 envían a Primitivo Hernández-Sampelayo el plan de la campaña que quieren realizar (Crusafont, 1946b). Al igual que en la anterior ocasión, son acompañados por parte del IGME por Ramírez y Bataller. Altimiras se encarga de los explosivos y Eugenio Pérez Jiménez y Ángel Pérez Martínez son nuevamente los trabajadores de Villarroya con los que cuentan.

Durante todas las excavaciones Crusafont vive en casa de Eugenio Pérez Jiménez y Julia Calvo Sánchez. Villalta, Ramírez y Altimiras se alojan en casa de Ángel Pérez Martínez y Elena Ezquerro Tomás. Por último, Bataller se aloja en casa de don Damaso Bozal, párroco de la localidad.



FIGURA 2. *Miquel Crusafont Pairó y Eugenio Pérez Jiménez mostrando la capa fosilífera del barranco de Vallejo de la Horna de Villarroya durante la excavación del IGME de junio de 1946. Arxiu Miquel Crusafont, ICP Miquel Crusafont..*

Durante la excavación de 1946 Crusafont realiza una descripción muy sintética de las capas del yacimiento en su diario (Crusafont, 1946a):

"Un tall detallat del jaciment de mamífers mostra sota el quaternari minço petites vetes de sorres alternant amb capes micritíques i carbonoses. Inmediatament abas de les argiles dels mamífers hi ha una capa margosa d'uns

30 cm. Amb HELIX LIMNAEA i algunes restes vegetals entre els quals es reconeixen Equisetinnes".

Villalta también describe las capas fosilíferas excavadas en Villarroya (Villalta, 1952):

"Un corte en detalle del yacimiento, muestra, debajo de la tierra vegetal, alternancia de finas capas de arenas y arcillas junto con unos débiles depósitos humíferos y carbonosos. Inmediatamente por debajo existe una capa, de unos 30 cm de margas y arenas amarillentas con restos abundantes de gasterópodos, *Hélix, Lymnaea*, etc., en muy mal estado de conservación y rastros indeterminables de Equisetíneas. Por debajo, y hasta el fondo del barranco, aparecen unos dos metros de arcillas, que descansan sobre un pequeño banco de conglomerados de cantos, relativamente pequeños, de calizas dominantes; en estas últimas arcillas bastante arenosas y principalmente en su parte inferior aparecen las brechas osíferas que constituyen el yacimiento de mamíferos fósiles. El depósito está constituido realmente por dos capas de distinta naturaleza litológica, de las cuales la inferior es mucho más rica en restos fósiles. La capa alta está constituida por arcilla compacta, muy arenosa, y de un color marrón, en dónde los restos se presentan rodeados de manchas azuladas, debidas a intercambios químicos durante el proceso de fosilización, y los mismos restos aparecen de color oscuro. La capa inferior está constituida por una arcilla de tono rojo claro, también arenosa y bastante más dura que la capa superior; en algunas zonas se presenta silicificada, lo que dificulta la extracción de los materiales fósiles. En esta segunda capa, los restos se presentan con un color mucho más claro y mucho mejor fosilizados que en la primera…".

Los materiales procedentes de las excavaciones del IGME se encuentran actualmente en el Museo Geominero y otros lugares (Tabla I).

Fechas	Autores	Localización actual de materiales
1920-1926	Carvajal	Museo Geominero del IGME / Universidad de Lyon
Abril de 1944	Villalta y Crusafont	Museo Geominero del IGME / Museo de Sabadell / Colección Villalta
Septiembre de 1944	Villalta y Crusafont	Museo Geominero del IGME / Museo de Sabadell / Colección Villalta / Museo Geológico del Seminario de Barcelona / Museo Historia Natural Basilea / Museo Historia Natural Florencia
Junio de 1946	Villalta y Crusafont	Museo Geominero del IGME / Museo de Sabadell / Colección Villalta / Museo Geológico del Seminario de Barcelona / Museo Historia Natural Basilea / Museo Historia Natural Florencia

TABLA I. *Resumen de excavaciones en el yacimiento clásico de Villarroya en las que interviene el IGME.*

Si consideramos las excavaciones de 1920 a 1926 los materiales actualmente se encuentran localizables en el Museo Geominero del IGME. También los materiales considerados como conjunto procedente de las excavaciones de 1944 y 1946 y presentes en el Museo Geominero del IGME se encuentran localizables (Rábano et al., 2016). Así mismo, el grupo excavado en 1944 y 1946, que Bataller lleva al Museo Geológico del Seminario de Barcelona (MGSB), también se encuentra localizable. La colección Villalta pasa a formar parte del Museo de Sabadell y del MGSB, a excepción de una pieza que se encuentra en el Museo de Ciencias Naturales de Barcelona. Para los materiales que se encuentran en Sabadell puede existir la posibilidad de distinguirlos de otros materiales procedentes de la misma capa fosilífera de Villarroya, pero excavados en otras campañas durante los años 50 y 60. Actualmente el Museo de Sabadell es el Institut Català de Paleontología (ICP) Miquel Crusafont.

Los fósiles de Villarroya, procedentes de estas campañas del IGME y sobre todo procedentes de campañas posteriores, se encuentran por tanto repartidos entre España, Francia, Italia, Holanda, Suiza e Inglaterra.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El estudio histórico de las excavaciones realizadas en el yacimiento clásico de grandes mamíferos de Villarroya ha llevado a la localización de gran cantidad de información, presente principalmente en el Arxiu Miquel Crusafont del ICP Miquel Crusafont, en el Museo Nacional de Ciencias Naturales y en el archivo de Fernando Fernández de Bobadilla, que junto con las fuentes orales de Villarroya: Francisco Pérez Calvo, Encarnación Martínez Pérez, Dolores Martínez Pérez, Amparo Martínez Pérez, Julia Martínez Pérez, José F. Martínez Pérez, Miguel Ángel Garrido Pérez, María Cruz Garrido Pérez, León Pérez Arnedo, Francisco Pérez Palacios, Salvador Pérez Abad, Clara Pérez Abad, José María Jiménez Palacios, Carmen Jiménez Palacios, Tomás Ezquerro Jiménez, Amado Ezquerro Jiménez, Ángel Abad Monge y Félix Jiménez Jiménez, entre otros, han permitido una reconstrucción histórica de las actividades científicas que se han llevado a cabo en Villarroya durante los últimos 100 años.

Este tipo de trabajos tiene influencia científica en cuanto a que: permite asegurar el origen o agrupación del conjunto de restos disponible procedente del yacimiento y permite incluso asignar los restos fósiles a capas concretas que en el caso de Villarroya todavía existen actualmente.

Respecto de la descripción de las capas fosilíferas, tanto Villalta como Crusafont las denominan arcillas, aunque un análisis granulométrico actual de las mismas da como resultado que son arenas limosas (Tabla II):

Posición de la capa	Descripción color	% arcillas	% limos	% arenas
Superior, sobre capa fosilífera inferior	Marrón	5,73	32,29	61,97
Inferior, sobre conglomerado	Rojo claro	4,88	38,58	56,46

TABLA II. *Características de las capas fosilíferas descritas en los trabajos de Villalta y Crusafont para el yacimiento clásico de grandes mamíferos de Villarroya del barranco de Vallejo de la Horna.*

En 1989 se realizan excavaciones en el yacimiento clásico de Villarroya y los autores (Jiménez et al., 1999) indican que la capa excavada por ellos se encuentra por debajo de los anteriores trabajos de Villalta y Crusafont. Esto es erróneo ya que la capa excavada en 1989 cumple con las descripciones de las excavaciones promovidas por el IGME en los años 40 en la capa fosilífera que hemos denominado inferior, en este trabajo. Los materiales procedentes de esta excavación y presentes en el Museo de Ciencias Naturales de Arnedo deben ser considerados y estudiados de forma agrupada con el total del conjunto de restos de grandes mamíferos de Villarroya.

CONCLUSIONES

Las cartas y los diarios de Crusafont presentes en el Arxiu Crusafont del ICP Miquel Crusafont en Sabadell, junto a las fuentes orales de Villarroya, permiten reconstruir de forma minuciosa las actividades llevadas a cabo por el IGME en el yacimiento clásico de grandes mamíferos.

La descripción de los estratos del yacimiento por parte de Villalta en su tesis doctoral y la corroboración de esta descripción por parte de Crusafont durante las excavaciones del IGME de 1946, hace que la localización de los estratos con materiales fósiles sea inequívoca. Las capas fosilíferas que excavan Villalta y Crusafont en 1944 (dos veces) y en 1946 son dos (Tabla III):

Posición de la capa	Descripción	Materiales
Inferior, sobre conglomerado	Arenas limosas rojas con cantos	La mayor parte de los fósiles del yacimiento clásico de Villarroya. Huesos de color claro
Sobre la capa fosilífera anterior	Arenas limosas marrones	Muy pocos. Fragmentados. Huesos de color oscuro

TABLA III. *Descripción de las capas fosilíferas descritas en los trabajos de Villalta y Crusafont para el yacimiento clásico de grandes mamíferos de Villarroya del barranco de Vallejo de la Horna.*

Las excavaciones posteriores se realizan también sobre estas dos capas lo que en resumen significa que todos los materiales de Villarroya disponibles hasta el momento, proceden de las dos capas señaladas en este trabajo.

Por encima de estas dos capas con contenido de huesos de grandes mamíferos, se sitúa una capa de margas que contiene gasterópodos y restos vegetales. Esta capa nunca fue excavada para la obtención de huesos de grandes mamíferos por Villalta y Crusafont, pero en el año 2000 proporciona el yacimiento de microvertebrados denominado Vi-2 (Laplana et al., 2016).

REFERENCIAS

Carvajal, E. (1926): Nota sobre un yacimiento de fósiles vertebrados en el Plioceno de la provincia de Logroño. *Boletín del Instituto Geológico de España*, 47: 319-335

Crusafont, M. (1944a): Diario 02/04/43 a 02/10/44. Arxiu Miquel Crusafont de l'Institut Català de Paleontologia.

Crusafont, M. (1944b): Copia de carta de (J. F. De Villalta i M. Crusafont) a Agustín Marín (Instituto Geológico y Minero de España, Madrid) amb comentaris sobre les exploracions paleontològiques a les províncies de Logronyo i Saragossa. Catálogo de Crusafont Pairó, Miquel, Institut Català de Paleontologia, 11/04/1944, AMC 045a/CProf/4395.

Crusafont, M. (1944c) Carta del Dr. Agustín Marín (Director del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid) a (M. Crusafont?) (Sabadell) comentaris sobre excursions al Aragó i Logronyo, i publicació de treball sobre el Vindoboniense del Vallés-Panedés. Catálogo de Crusafont Pairó, Miquel, Institut Català de Paleontologia, 17/04/1944, AMC 045a/CProf/4396.

Crusafont M. (1946a): Diario 27/11/1945 a 31/12/1946. Arxiu Miquel Crusafont de l'Institut Català de Paleontologia.

Crusafont M. (1946b) Carta de (M. Crusafont, J.F.de Villalta?) (Sabadell) del Dr. Primitivo Hernández Sampelayo (IGyM de España, Madrid) amb comentaris sobre material del jaciment de Villaroya (Logronyo) i pla de excavacions pel estiu en aquest o un altre jaciment. Catálogo de Crusafont Pairó, Miquel, Institut Català de Paleontologia, 27/05/1946, AMC 045b/CProf/4530

Jiménez, S., Martín de Jesús, S. y Jiménez, E. (1999): Primeros resultados de la excavación "Villarroya 88-89" (La Rioja, España). *Stvdia Geologica Salmanticensia*, 35: 41-56.

Laplana, C., Muñoz, A., Pueyo, E., Sevilla, P., Blain, H.A. y Parés, J.M. (2016): Los microvertebrados de la cuenca de Villarroya. En *Villarroya, yacimiento clave de la paleontología riojana* (Alberdi, M.T., Azanza, B. y Cervantes, E., coord.). Instituto de Estudios Riojanos, 177-181.

Rábano, I., Menéndez, S. y Bravo, A.M. (2016): Colecciones de vertebrados fósiles del yacimiento villafranquiense de Villarroya (La Rioja) en el Museo Geominero (Instituto Geológico y Minero de España, Madrid). En *Villarroya, yacimiento clave de la paleontología riojana* (Alberdi, M.T., Azanza, B. y Cervantes, E., coord.). Instituto de Estudios Riojanos, 217-228.

Villalta, J.F. (1952): Contribución al conocimiento de la fauna de mamíferos fósiles del Plioceno de Villarroya (Logroño). *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España*, 64: 1-203.

Dos acontecimientos relevantes en la historia del Museo Geominero (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC).

Two relevant events in the history of the Geominero Museum (Instituto Geológico y Minero de España, CSIC).

I. Rábano[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. i.rabano@igme.es

Palabras clave: historia, siglo XX, museo, Instituto Geológico y Minero de España.

Resumen

El museo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) se institucionalizó tras el XIV Congreso Geológico Internacional, organizado por el IGME en Madrid en 1926. El edificio del IGME de la calle Ríos Rosas se inauguró con motivo de este evento, si bien no se finalizó hasta unos pocos años después. El arquitecto autor del proyecto del nuevo edificio, Francisco Javier de Luque, diseñó una gran sala para la celebración del congreso, en la que se instalaron posteriormente las colecciones de minerales, fósiles y rocas que la institución había ido reuniendo desde su creación en 1849. El proyecto museográfico se debió al ingeniero de minas Primitivo Hernández-Sampelayo, primer director del museo (Rábano y Gutiérrez-Marco, 2022). El nuevo espacio se configuró en un principio como un lugar de depósito y exhibición interna para los propios ingenieros, aunque pronto se abrió a las visitas de especialistas externos y de escolares con sus profesores. Tras la jubilación de Hernández-Sampelayo en 1950, los trabajos con las colecciones y con su exhibición transcurrieron con más o menos altibajos, pero nunca se interrumpieron, si bien el museo fue perdiendo la importancia que había tenido desde la época fundacional. En 1988 el IGME volvió a apostar por su museo como centro de difusión de las Ciencias de la Tierra abordando unas importantes obras de rehabilitación. La sala se inauguró el 2 de marzo de 1989, tomando este espacio desde entonces el nombre de Museo Geominero.

Abstract

The museum of the Geological and Mining Institute of Spain (IGME, CSIC) was institutionalized after the XIV International Geological Congress, organized in Madrid in 1926. The IGME building was inaugurated on the occasion of this event. The architect, Francisco Javier de Luque, designed a large room for the celebration of the congress in which the collections that the institution had been gathering since its creation in 1849 were later installed. The museographic project was due to the mining engineer Primitivo Hernández-Sampelayo, the first director of the museum (Rábano and Gutiérrez-Marco, 2022). The new space was initially configured as a storage and internal exhibition place for the engineers themselves, although it was soon opened to visits by external specialists and schoolchildren with their teachers. After the retirement of Hernández-Sampelayo in 1950, the work on the collections and their exhibition occurred with more or less ups and downs, but they were never interrupted, although this space was losing the importance it had had during the founding period. Between 1988 and 1989, the institution once again opted for its museum as a center for the dissemination of Earth Sciences, undertaking important works on the room, which was inaugurated on March 2, 1989. This date marked the second milestone in the history of the museum, known since then as the Geominero Museum.

Referencias

Rábano, I. y Gutiérrez-Marco, J.C. (2022). *Boletín Geológico y Minero* 133 (2), 7-43. http://dx.doi.org/10.21701/bolgeomin/133.2/001

Financiación: Proyecto PID2021-123323NB-I00 / AEI/10.13039/501100011033/ FEDER, UE del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y los inicios de la cartografía geológica de escala media (1:50.000).

The Geological and Mining Institute of Spain (IGME) and the beginnings of medium-scale geological maps (1:50,000).

Á. Salazar[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), C/ La Calera, 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. a.salazar@igme.es

Resumen: Los primeros trabajos cartográficos realizados por la Comisión del Mapa Geológico fueron mapas provinciales y de escala pequeña (1:400.000). La reorganización del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en 1927 incluyo entre las tareas a realizar la de emprender la publicación del mapa geológico a escala de 1:50.000. Para dar inicio a dichos trabajos, el IGME realizó un proyecto piloto que estableció el modelo de la hoja y la memoria a realizar. El proyecto piloto se ejecutó en Cantillana (Sevilla), una zona del borde meridional del Macizo Ibérico de geología muy variada, y en su elaboración participaron catorce ingenieros de minas del IGME. La cartografía realizada también incluyó información del subsuelo (isobatas del Pérmico y de las capas inferiores del Carbonífero). Un año más tarde se publicaron los primeros mapas y memorias de lo que posteriormente se ha denominado Primera Serie del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, un proyecto colaborativo en el que, además del personal del IGME, participó personal ajeno a la institución, siendo uno de los escasos proyectos científicos previos a la Guerra Civil que continuó durante la dictadura.

Palabras clave: cartografía geológica, escala media, Macizo Ibérico.

Abstract: *The first cartographic works carried out by the Comisión del Mapa Geológico were small scale maps (1:400,000) by provinces. The reorganization of the Instituto Geológico y Minero de España (IGME) in 1927 included among the tasks to be carried out the publication of the geological map of Spain at 1:50,000. To begin this work, the IGME carried out a pilot project to establish the models of the sheet and report for the new maps. The pilot project was carried out in Cantillana (Seville), an area on the southern edge of the Iberian Massif with very varied geology, and fourteen IGME mining engineers participated in its development. The cartography carried out also included information from the subsoil (isobats from the Permian and the lower layers of the Carboniferous). A year later, the first maps and reports of what has subsequently been called the First Series of the Geological Map of Spain at a scale of 1:50,000 were published. It was a collaborative project in which, in addition to IGME staff, personnel from outside the institution participated, and being one of the few scientific projects prior to the Civil War that continued during the dictatorship.*

Key words: *geological cartography, medium scale maps, Iberian Massif.*

INTRODUCCIÓN

La realización de cartografía geológica fue la misión inicial y el objetivo principal de los primeros institutos geológicos europeos. La escala a la que se realizaron los mapas geológicos iniciales no fue homogénea. Mientras que el *Ordnance Geological Survey* del Reino Unido escogió una escala de trabajo media 1:63.360, es decir, una pulgada una milla, en España se optó por realizar mapas provinciales y de escala pequeña (generalmente 1:400.000). La elección de dicha escala no fue arbitraria, en España no existían aún mapas topográficos de media escala sobre los que plasmar la información geológica, e incluso algunas de las bases 1:400.000 utilizadas en los primeros mapas geológicos tuvieron que ser realizadas exprofeso por los ingenieros adscritos a la Comisión del Mapa Geológico (Rábano, 2015). No fue hasta la creación en 1870 del Instituto Geográfico (actual Instituto Geográfico Nacional, IGN) y bajo la dirección del ingeniero militar Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero cuando se inician los trabajos conducentes a la realización sistemática de mapas de media escala en España, siendo la publicación en 1874 del mapa topográfico nacional (MTN50) de la hoja de Madrid escala 1:50.000 el punto de inicio. Sin embrago, el avance de los trabajos cartográficos sufrió diversos avatares, por lo que no fue hasta 1968 cuando se culminó el MTN50 de todo el país.

También en fecha temprana se plantea en España la necesidad de realizar cartografías geológicas de escala media, siendo la escala elegida la misma que la del MTN50. En concreto, el artículo 12.10 de la "Instrucción para llevar a cabo el estudio y trazado del Mapa geológico de España" de 1873 ya señala que la Comisión del Mapa geológico realizará a dicha escala los mapas geológico-industriales de cada provincia (*Gaceta de Madrid,* nº 88, de 29.03.1873). La institución heredera de

la Comisión, el Instituto Geológico de España, mantuvo ese objetivo entre las tareas a realizar, pero no fue hasta 1927 cuando se emprendieron los primeros trabajos encaminados al diseño y la realización de un Mapa Geológico de España a escala 1:50.000.

Se ha afirmado algunas veces que el primer mapa geológico 1:50.000 que se realizó en España fue el correspondiente a la hoja número 560 de Alcalá de Henares, e incluso que dicha hoja sirvió de modelo a las posteriores. Sin quitar mérito a los autores de dicha hoja (Royo Gómez y Hernández Puget, 1928), la realidad fue otra, pues la hoja de Alcalá de Henares se realizó simultáneamente a otras hojas del mapa geológico y con posterioridad a un ensayo piloto realizado por los ingenieros de minas del Instituto Geológico y Minero de España (Gavala, 1927).

LA HOJA DE CANTILLANA

La organización del XIV Congreso Geológico Internacional en 1926 supuso para el Instituto Geológico de España un hito importante en cuanto a su proyección internacional y reconocimiento institucional. Al año siguiente, bajo la dirección de Luis de la Peña y Braña, se cambió el nombre por el actual, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se reorganizó la estructura de la institución, y se aprobó un nuevo reglamento, lo que supondrá un cambio de rumbo importante (*Gaceta de Madrid*, nº 8, de 08.01.1927 y nº 95, de 05.04.1927). Dicho reglamento de 1927 señala entre las funciones del IGME la de publicar el mapa geológico de España, rectificando debidamente las ediciones ya existentes, y adicionalmente la de emprender la publicación del mismo a escala de 1:50.000, una tarea que será en adelante el proyecto científico más importante emprendido por la institución.

Aunque los ingenieros de minas del IGE o del IGME ya habían abordado algunas cartografías geológicas de escala media, los trabajos nunca habían sido realizados de manera sistemática, por lo que no existía un modelo o ejemplo de hoja a seguir. Además, el cambio de escala 1:400.000 a 1:50.000 suponía un reto importante, cuyas dificultades eran entonces desconocidas para los miembros de la institución. Para tratar de dar respuesta a las numerosas incógnitas que suponía la iniciación del proyecto, ese mismo año de 1927 se realizó un proyecto piloto bajo la dirección del ingeniero de minas Juan Gavala, mediante el cual se estableció el modelo de la hoja y la memoria a realizar. Un modelo de hoja que, con diversas modificaciones, perduró hasta 1972.

Dado que el objetivo era evaluar las dificultades que podrían surgir durante el desarrollo del programa cartográfico, en lugar de seleccionar una hoja topográfica 1:50.000 concreta, se seleccionó la zona de unión de cuatro hojas distintas, y en la que hubiese una geología variada y compleja (hojas 940, 941, 962 y 963). El proyecto piloto y modelo de cartografía geológica a realizar se ejecutó en Cantillana (Sevilla), una zona del borde meridional del Macizo Ibérico en donde se unen la Zona Centroibérica y la de Ossa-Morena, y que también contiene la Cuenca Pérmica de Viar y los materiales carboníferos de las minas de la Reunión (Villanueva del Río y Minas), así como los sedimentos marinos del Mioceno de la Cuenca del Guadalquivir y formaciones continentales del Cuaternario asociadas a dicho río. El territorio del "Modelo de hoja de Cantillana" se dividió en varias cuadrículas, que se distribuyeron para realizar los trabajos de campo entre las siete secciones geográficas en las que entonces se organizaba el personal del IGME. Participaron en el proyecto un total de catorce ingenieros de minas, dos por cada sección geográfica (Marín, Larragán, Ruiz Falcó, Hernández-Sampelayo, Dupuy de Lôme, Novo, Fernández, Alvarado, Kindelán, Fernández Iruegas, Del Valle, Cincúnegui, Gavala y Rubio). Los trabajos de campo duraron veinte días, el estudio de láminas delgadas de rocas fue realizado por Agustín Marín y Enrique Rubio, y la clasificación de los restos fósiles la realizaron Primitivo Hernández-Sampelayo, Manuel Ruiz Falcó y Juan Gavala (Gavala, 1927).

Una de las peculiaridades de la cartografía realizada es que incluyó información del subsuelo mediante el trazado de curvas de nivel o isobatas de la base del Pérmico en la Cuenca de Viar, así como de las capas inferiores del Carbonífero en la zona minera de Villanueva. Una información obtenida a partir de datos de las galerías mineras y de la información de diversos sondeos mecánicos.

Como la denominada "hoja de Cantillana" (Fig. 1) no se corresponde en realidad con ninguna hoja concreta del MTN50, nunca formó parte del nuevo mapa geológico 1:50.000. Dicho mapa y su memoria explicativa fueron publicados en el *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España* para que sirviesen de modelo para los trabajos que se debían realizar y, en cierto sentido, como propaganda institucional de la "abrumadora y penosa tarea" a la que se daba inicio (Gavala, 1927).

PRIMERAS HOJAS DEL MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA 1:50.000

Un año más tarde se publicaron los primeros mapas de lo que posteriormente se ha denominado Primera Serie del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Se estimó un plazo de realización poco realista, que no excedería de diez o doce años (*Gaceta de Madrid*, nº 8, de 08.01.1927). Para que esos plazos fueran viables, se consideró que, además del personal del IGME y de los ingenieros del Cuerpo de Minas adscritos a los distritos mineros, pudiese colaborar personal ajeno a la institución o que no fueran ingenieros de minas.

Hasta el inicio de la Guerra Civil se publicaron la cartografía correspondiente a 69 hojas del Mapa Geológico 1:50.000 de España, siendo las cinco primeras en terminarse con fecha 1928 las hojas número 194-Santa María del Páramo, 421-Barcelona (publicada en colaboración con la Diputación Provincial de Barcelona), 460-Hiendelancina, 560-Alcalá de Henares y 810-Almodóvar del Campo. Además de los ingenieros de minas del IGME, participaron en la elaboración de los

primeros mapas los ingenieros Joaquín Menéndez Ormaza y Juan Bautista Targhetta de las minas de Hiendelaencina, Francisco Hernández Pacheco, José Royo y Gómez del Museo Nacional de Ciencias Naturales, y el catedrático de la Universidad de Barcelona Máximo San Miguel de la Cámara, entre otros.

Entre las primeras hojas publicadas se ha destacado frecuentemente la de Alcalá de Henares (Royo Gómez y Hernández Puget, 1928), puesto que supuso un cambio importante en la interpretación de las unidades detríticas del Mioceno del centro peninsular, que hasta fecha reciente habían sido consideradas como terreno Diluvial (Pleistoceno), y como tales aparecían en los mapas geológicos previos, y también por incluir datos de un sondeo de investigación hidrogeológica de más de 1000 m de profundidad que había realizado el IGME (Fig, 2). Pero también es igualmente encomiable el trabajo realizado por los demás autores, como por ejemplo en la hoja 421-Barcelona (San Miguel de la Cámara *et al.*, 1928), realizada en colaboración con la Diputación Provincial de Barcelona, y donde Jaume Almera ya había realizado una cartografía geológica de escala media (1:40.000), anticipándose más de un cuarto de siglo a los trabajos emprendidos por el de IGME y siendo uno de los escasos antecedentes españoles de cartografía geológica en ese orden de escala (Almera, 1900; Aragonés, 2007).

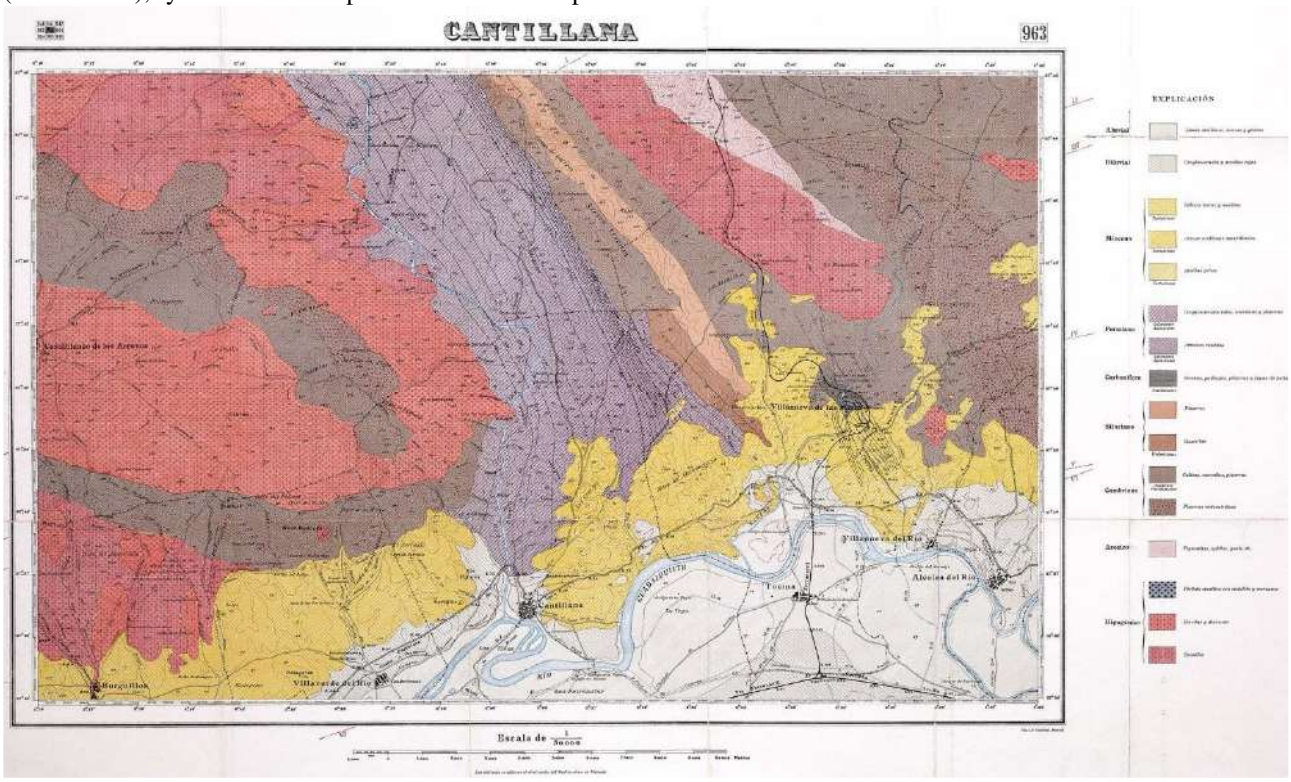


FIGURA 1. *Modelo de Hoja que el Instituto Geológico y Minero propone para el nuevo Mapa Geológico y Minero de España (Gavala, 1927).*

La financiación de los trabajos cartográficos y la publicación de las hojas del Mapa Geológico sufrió diversos altibajos debidos a las crisis económicas y políticas de 1929-1931, y una interrupción completa durante la guerra civil española. El IGME continuó con esta tarea a partir de 1941, siendo uno de los escasos proyectos científicos previos a la contienda que perduró durante la dictadura. Entre 1946 y 1955, bajo la dirección de José García Siñeriz y de Juan Gavala, la cartografía geológica tuvo un nuevo impulso y se alcanzaron ritmos de producción cartográfica anual equivalentes a los iniciales, unas diez hojas al año, he incluso se llegó a duplicar ese ritmo entre los años 1950 y 1954.

Las primeras hojas del mapa geológico 1:50.000 de las islas Canarias se publicaron en 1967, en colaboración con el Instituto Lucas Mallada de Investigaciones Geológicas del CSIC y con la participación de licenciados en Ciencias Geológicas de las primeras promociones. Las últimas hojas de la Primera Serie se publicaron en el año 1972, de manera simultánea a la publicación de las primeras hojas de la Segunda Serie del Mapa Geológico 1:50.000, más conocido por sus siglas MAGNA.

CONCLUSIONES

Aunque existían algunos antecedentes previos, la cartografía geológica a escala media (1:50.000) en España se inició mediante la realización de un trabajo piloto. El trabajo estaba encaminado a determinar las dificultades que podrían surgir en la puesta en marcha de un proyecto sistemático de cartografía geológica sobre la base del mapa topográfico nacional a la misma escala. Por esa razón no se escogió una sola hoja 1:50.000, sino un área situada en el cruce de cuatro hojas y situado en una zona de geología especialmente compleja y diversa (Cantillana, Sevilla). Adicionalmente, la memoria publicada sirvió de ejemplo y modelo de los trabajos que se deberían realizar en el futuro.

A diferencia de otros proyectos científicos de la época, la cartografía geológica a escala 1:50.000 tuvo continuidad durante la dictadura, siendo sustituido en

1972 por un nuevo modelo de mapa, pero a la misma escala (MAGNA).



FIGURA 2. *Vidriera representando la columna estratigráfica del sondeo hidrogeológico de Alcalá de Henares (archivo IGME).*

REFERENCIAS

Almera, J. (1900): *Mapa Geológico y Topográfico de la Provincia de Barcelona: Región Primera o de Contornos de la Capital (escala 1;40.000)*. Diputación Provincial de Barcelona.

Aragonés, E. (2007): El Mapa Geològic de Catalunya entre el XIV Congrés Internacional i la guerra civil (1926-1936). *Treballs del Museu de Geologia de Barcelona*, 15: 81-227.

Gavala, J. (1927): Mapa geológico de España. Memoria correspondiente a la Hoja de Cantillana. *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España*, 49: 1-80.

Rábano, I. (2015): L*os Cimientos de la Geología. La Comisión del Mapa Geológico de España (1849-1910)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 329 p.

Royo Gómez, J. y Hernández Puget, L. (1928): *Mapa geológico de España escala 1:50 000. Memoria Explicativa de la hoja Nº 560 Alcalá de Henares*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 56 p.

San Miguel de la Cámara, M., Sierra, A., Marcet, J. y Cerero, R. (1928): *Mapa geológico de España escala 1:50 000. Memoria Explicativa de la hoja Nº 421 Barcelona*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 84 p.

Seis pioneros de la Geología en la Universidad Central.

Six pioneers in Geology from the Central University.

B. Soutullo[1,2] y M.B. Muñoz-García[1,3]

1 Museo de la Geología, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid. bsoutull@ucm.es; mbmunoz@ucm.es
2 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid.
3 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid.

Resumen: La Universidad Central, precursora de la actual Universidad Complutense de Madrid, funcionó en el periodo comprendido entre 1850 y 1970 y fue el escenario donde convergieron seis grandes científicos y reputados maestros de la geología universitaria española: Juan Vilanova y Piera, José Macpherson, Salvador Calderón, Francisco Quiroga, Lucas Fernández Navarro y Eduardo Hernández-Pacheco. Durante la llamada Edad de Plata de la cultura española, hasta 1936, sentaron las bases de la investigación científica española en muchas disciplinas geológicas y fueron, además, intelectuales muy comprometidos con la sociedad, a cuya regeneración pretendieron contribuir a través de la ciencia, la educación y el contacto con la naturaleza. En este trabajo se sintetizan algunos de sus hitos profesionales, sus principales aportaciones a la sociedad y algunos datos curiosos.

Palabras clave: historia de la ciencia, Edad de Plata, maestros, Ciencias Naturales, Madrid, siglos XIX-XX.

Abstract: *The Central University, precursor of the Complutense University of Madrid, existed between 1850 and 1970 and hosted the research of six great scientists and reputed masters in the universitary Geology from Spain: Juan Vilanova y Piera, José Macpherson, Salvador Calderón, Francisco Quiroga, Lucas Fernández Navarro y Eduardo Hernández-Pacheco. During the Silver Age of the Spanish Culture, until 1936, these geologists laid the foundations of the scientific research in many geological disciplines. These intellectuals were also very committed to society, whose regeneration they actively sought through science, education and contact with nature. In this work, a brief biographical outline is provided for each of them, together with their main contributions to society and some curious facts.*

Key words: *History of science, Silver Age, masters, Natural Science, Madrid, 1800's-1900's.*

INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta parte de los contenidos de una exposición diseñada por el Museo de la Geología de la UCM con motivo de la Semana de la Ciencia 2023. Uno de los objetivos de esta edición fue resaltar el legado de científicos de la historia de España y acercar su figura a la sociedad.

Siguiendo la estela del Año Cajal, celebrado en 2022, decidimos destacar el protagonismo de científicos contemporáneos que, desde las Ciencias Geológicas de la universidad madrileña, contribuyeron a alumbrar el periodo conocido como la Edad de Plata de la cultura española: Juan Vilanova, José Macpherson, Salvador Calderón, Francisco Quiroga, Lucas Fernández y Eduardo Hernández-Pacheco.

Todos ellos mantuvieron una estrecha relación con la Universidad Central. Cinco fueron catedráticos en ella, incluso acumulando simultáneamente más de una cátedra. El sexto, José Macpherson, nunca tuvo una vinculación oficial, pero dirigió numerosas tesis y actuó como vocal competente en tribunales de cátedra.

CONTEXTO HISTÓRICO Y CIENTÍFICO

Nuestros seis protagonistas nacieron en el seno de familias ilustradas a lo largo del siglo XIX. La clase culta española de finales de siglo era poco numerosa y se concentraba en las principales ciudades donde, además, proliferaban distintas academias y sociedades que vertebraban la pequeña pero activa comunidad científica. Todos ellos mantuvieron relación con estas instituciones, bien como socios fundadores o como autores de muchas de las publicaciones periódicas de las más importantes, como la Sociedad Española de Historia Natural (actual RSEHN), la Sociedad Geográfica de Madrid (actual RSG) y la Institución Libre de Enseñanza. En ellas mantuvieron múltiples relaciones institucionales y personales entre sí, y con otros investigadores, académicos y políticos (Arroyo Ilera y Martín Lou, 2019). El objetivo principal que perseguían era el de modernizar la educación y la investigación en España, seriamente estancadas durante los reinados de Fernando VII e Isabel II. El objetivo se alcanzó en enero de 1907 con la creación de la Junta para Ampliación de Estudios (JAE), primer organismo público dedicado al fomento de la ciencia y la investigación. Varios de nuestros pioneros

estuvieron en el germen de esta institución (Otero Carvajal y López Sánchez, 2012).

Los seis se dedicaron a todas las áreas de la Geología y la Paleontología de entonces, que enseñaron, divulgaron y engrandecieron. Con sus exhaustivos trabajos de campo iniciaron en España disciplinas también novedosas en el panorama europeo, como la Antropología o la Prehistoria. Ninguna de ellas, ni siquiera la Geología, tenía aún un marco teórico sólido. En la España isabelina existía, además, una carencia absoluta de obras actualizadas que divulgaran los avances logrados en Europa desde finales del siglo XVIII. Pero el régimen de libertades que trajo La Gloriosa favoreció el cambio que afectó directamente al aprendizaje de las ciencias naturales en la Universidad Central, la única con capacidad para impartir estudios de doctorado. Se permitió la difusión del evolucionismo y del ideario krausista, basado en los principios de tolerancia, alejamiento de las contiendas políticas y libertad de pensamiento.

LOS SEIS PIONEROS

Juan Vilanova y Piera (Valencia, 1821-Madrid, 1893)

Licenciado en Medicina (1845) y Ciencias Naturales (1846) en la Universidad de Valencia. Es el primer geólogo procedente de las Ciencias Naturales con gran proyección internacional. Fue comisionado por el gobierno para completar estudios en París y Friburgo, relacionándose allí con ilustres científicos como Gay-Lussac, Verneuil, Élie de Beaumont, o algunos discípulos de Cuvier. Vocal de la Comisión de la Carta Geológica (1849-1858), estudió el levante peninsular y se le atribuye la primera descripción del hallazgo de un dinosaurio en España. Catedrático de Geología y Paleontología de la Universidad Central durante muchos años, fue uno de los catorce miembros fundadores de la Sociedad Española de Historia Natural. Fue profesor de Geología de la Escuela de Institutrices, la primera institución moderna dedicada exclusivamente a la educación de las mujeres. Por sus trabajos sobre el tema (Fig. 1) y su decidida defensa de la autenticidad de las pinturas rupestres de la cueva de Altamira -que mantuvo hasta su muerte- es conocido como el padre de la prehistoria española.

Dato curioso: En 1849, a la vuelta de sus estudios en el extranjero, Juan Vilanova remitió un informe del viaje junto con una copia de todos sus apuntes y cuadernos de campo al Ministerio que le había enviado a "hacer los estudios de la Geología". Escribe: "Honrado por el Gobierno de S.M. con el arduo encargo de hacer los estudios de la Geología en París y Alemania, (…) mi primer cuidado fue (…) asistir con puntualidad a sus instructivas lecciones procurando tomar notas lo más exactas posibles (…). No contento con todo esto procuré tomar un Profesor particular con el objeto de estudiar las rocas de un modo práctico (…). Este estudio es de la mayor utilidad y su complemento debe hacerse en las montañas" (Pelayo López y Gozalo Gutiérrez, 2012).

José Macpherson y Hevás (Cádiz, 1839-San Ildefonso, Segovia, 1902)

Le inició como naturalista su hermano Guillermo, cónsul inglés, que le presentó a Domingo Orueta, Antonio Machado -el abuelo de los poetas- y a Vilanova, quien más tarde le introduciría en el círculo madrileño de geólogos. Con Machado aprendió Mineralogía y con Orueta el uso del microscopio petrográfico. Esta técnica, completamente novedosa, supuso toda una renovación en la investigación de las rocas (Fig. 2). Sus trabajos y los de Quiroga, su principal discípulo, son la base de la investigación petrológica española moderna. Considerado maestro de maestros pese a no tener ninguna titulación oficial, su situación económica le permitió estudiar por toda Europa con los mejores especialistas (incluidos geólogos de la talla de William Smith o Eduard Suess) y disponer de los instrumentos científicos más novedosos. En su casa-laboratorio de Madrid se formaron geólogos como Hernández-Pacheco, Quiroga o Calderón. Como ellos, participó activamente en las tres instituciones más importantes de finales del siglo XIX: la Real Sociedad Española de Historia Natural, la Sociedad Geográfica de España y la Institución Libre de Enseñanza, que pretendían reformar la sociedad española a través de la educación y la ciencia.

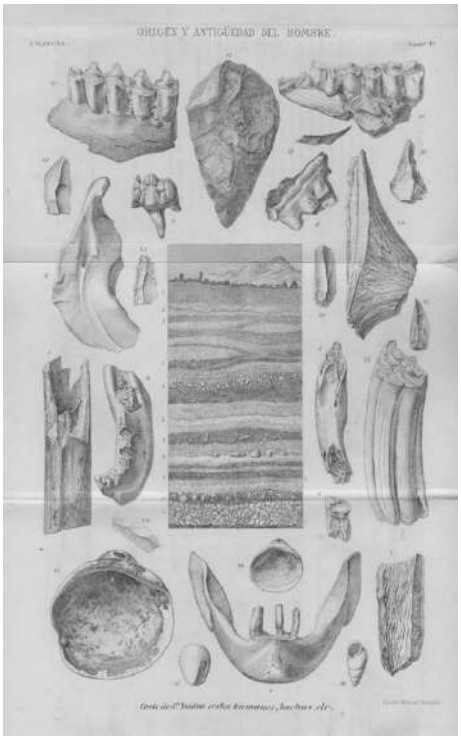


FIGURA 1. *Lámina VIII del tratado* Origen, Naturaleza y Antigüedad del Hombre *de Vilanova y Piera (1872).*

Dato curioso: No se conservan muchas fotografías de José Macpherson pero su amiga Emilia Pardo Bazán le retrató con bastante detalle en su relato *Una pasión* bajo el nombre de Federico Bruck (Durán López, 2022). "De origen anglosajón, según revela el apellido, soltero, independiente y no pesándoles los años (…), Bruck no era un sabio de gabinete, ni se conformaba con ver los fragmentos y láminas de roca en las ajenas colecciones o en los museos, con su etiqueta pegada. Por valles,

montañas y cerros, allí donde trazaban un camino, perforaban un túnel o excavaban una mina, andaba Bruck con su caja de instrumentos, inclinándose ávidamente. (…) He dicho que Bruck no pecaba de locuaz; pero, fiel a su oriundez anglosajona, era tenacísimo. Jamás se cansaba, ni se desalentaba, ni variaba de rumbo. (…) Su amor por las rocas era, como ellas, firme, perenne, invariable. (…) Una tarde se me presentó de la manera más impensada, enfundado en su traje habitual de 'hacer geología'. El paño de su *chaquet* caía flojo y desmañado sobre su vasto cuerpo; una camiseta de color le ahorraba la molestia de ocupar el baúl con camisas planchadas; su sombrero, abollado, lucía una capa de polvo a medio estratificar; y como le vi que traía calzados los guantes, comprendí al punto que estaba de excursión, pues Bruck no usa guantes sino para el monte, dado que en la ciudad no hay peligro de estropearse las manos".



FIGURA 2. *Lámina de mica firmada por José Macpherson y conservada en el Museo de la Geología - UCM.*

Salvador Calderón y Arana (Madrid, 1851-Madrid, 1911)

Cambió los estudios de Medicina por los de Ciencias Naturales, que cursó en la Universidad Central (1866-1871). Allí conoció a Francisco Quiroga e Ignacio Bolívar, con quienes mantuvo una amistad y una relación profesional que durarían toda la vida. Su obra conjunta, *Elementos de Historia Natural*, marca un período de renovación en las ciencias naturales españolas y fue texto protagonista de la enseñanza en institutos y universidades durante décadas (Casado de Otaola, 2001). Obtuvo el grado de doctor en 1872 con la primera tesis en España que defendió el origen evolutivo del hombre (Soutullo y López-Acevedo, 2015). Los miembros del tribunal, Vilanova entre ellos, eran reconocidos por su defensa de las posturas contrarias. Años después, leyó un comunicado en la Real Sociedad Española de Historia Natural titulado "Las antiguas pinturas rojas de España", en el que se oponía a la antigüedad del arte rupestre de Altamira defendida por Vilanova. Sus investigaciones se extendieron prácticamente a todos los campos de la geología. Fue Catedrático de Mineralogía y Botánica y también de Mineralogía Descriptiva en la Universidad Central. Es reconocido como un gran investigador, maestro y divulgador y tiene el honor de haber sido el autor del primer libro publicado por la JAE: *Los minerales de España* (1910).

Dato curioso: En su *Guía del geólogo y mineralogista expedicionario en España* (1875) describe el material necesario para la expedición y el procedimiento de recolección, con especial énfasis en el examen en globo del país: "EXPEDICIÓN. Tratando de ocuparnos de los relativo á las expediciones, tócanos fijar sobre todo nuestra atención en lo que respecta á instrumentos del viaje científico á que nos referimos, los cuales deben no ser muy numerosos, tanto por evitar la curiosidad de los campesinos, como por librarnos de objetos que dificulten la marcha." Enumera y describe los siguientes objetos: sextante, cinta de medir, brújula, clinómetro, barómetro, objetos para el transporte (mochila, bolsa o alforjas), lente y anteojo, martillo, escoplo o navaja, azada, soplete y reactivos y barra imantada. "RECOLECCION. Examen en globo del país. - El explorador debe poner especial cuidado en examinar el aspecto y orografía del país en que se halla; observar si existen superficies denudadas en las cuales no será difícil encuentre fósiles; notar si hay de manifiesto quebradas que, á más de ofrecer estos restos, puedan dar luz sobre la naturaleza del terreno; visitar las minas, pozos, canteras y desprendimientos de rocas naturales ó artificiales, los mejores sitios para su investigación y recolección."

Francisco Quiroga y Rodríguez (Aranjuez, 1853-Madrid, 1894)

Casiano de Prado, amigo de su padre, despertó su vocación por la geología durante excursiones por el Guadarrama. Estudió Farmacia y Ciencias Naturales en la Universidad Central, doctorándose en ambas. Fue miembro muy activo de la Sociedad Española de Historia Natural y uno de los fundadores de la Institución Libre de Enseñanza, donde comenzó su carrera docente. Adquirió protagonismo con la expedición científica y política al Sahara Occidental de 1866. En esta aventura le acompañaron el comandante Julio Cervera, el inventor de la radio, (sí, sí, has leído bien: el inventor de la radio), Felipe Rizzo, arabista y diplomático, y dos rifeños de la Compañía de Tiradores. Tenían un doble encargo: el estudio científico de la región y el establecimiento de un protectorado español en la zona. Todo se consiguió y fueron recibidos en Madrid entre el clamor popular. En septiembre de 1888 ocupó la primera cátedra europea de Cristalografía, creada en la Universidad Central. Con la ayuda de Macpherson fundó un laboratorio de investigación petrológica y mineralógica donde se formaron importantes geólogos, como Hernández-Pacheco y Fernández Navarro, su principal discípulo.

Dato curioso: La Fuente de los Geólogos se encuentra cerca de Cercedilla, en la carretera que va al Puerto de Navacerrada, y está dedicada a los ilustres geólogos pioneros en los estudios de la Sierra de Guadarrama. "A la grata memoria de: Casiano del Prado (1797-1886) José Macpherson (1839-1902) Salvador Calderón (1851-1911) Francisco Quiroga (1853-1894). Primeros geólogos que estudiaron el Guadarrama y fueron sembradores de cultura y amor a la naturaleza".

Lucas Fernández Navarro (Guadalajara, 1869-Madrid, 1930).

Licenciado y doctor en Ciencias Naturales por la Universidad Central. Como sus mentores -Calderón y fundamentalmente Quiroga-, investigó sobre temas muy variados, desde la posible existencia de la Atlántida hasta

los meteoritos, campo en el que alcanzó el grado de especialista. En 1902 obtuvo la cátedra de Cristalografía -libre tras la muerte de Quiroga- y publicó su primer libro, *Cristalografía*. En noviembre de 1909 describió la erupción del volcán Chinyero, en Tenerife. La repercusión de este acontecimiento y la calidad de sus trabajos le colocaron en el panorama de la vulcanología mundial. En 1911 obtuvo también la Cátedra de Mineralogía Descriptiva de la Universidad Central. Siguiendo la estela de sus maestros, continuó con las expediciones al norte de África y las islas Canarias. En 1913, él y Eduardo Hernández-Pacheco son expedicionarios en la famosa campaña de paz y progreso a la comarca del Yebala y la cuenca baja del Lucus (Hernández-Pacheco et al., 1914). Fue uno de los organizadores del famoso XIV Congreso Internacional de Geología, celebrado en Madrid en 1926.

Dato curioso: Cuando pudo llegar a Tenerife la erupción del Chinyero había terminado hacía algunos días, pero reunió mucha información, incluyendo mapas, fotografías y testimonios que publicó en los Anales de la JAE. Trajo a Madrid 378 kg de muestras de roca.

Eduardo Hernández-Pacheco y Estevan (Madrid, 1872-Alcuéscar, Cáceres, 1965)

Se licenció en Ciencias Naturales en la Universidad Central. Obtuvo el doctorado dirigido por José Macpherson (1896) y la Cátedra de Geología en la misma universidad (1910). Fue el principal discípulo de Salvador Calderón. Participó muy activamente en la Institución Libre de Enseñanza. Disfrutó de un amplio reconocimiento como investigador, maestro y sintetizador. Tras volver de un viaje por Europa pensionado por la JAE, se creó una nueva Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas, de la que fue nombrado jefe en 1912. Influido por Humboldt y el krausismo, hizo del paisaje uno de sus principales objetos de investigación y llegó a elaborar una teoría integradora sobre él. Su interés por la naturaleza incluyó trabajos de protección. Con su asistencia como Delegado de Sitios y Monumentos Naturales, España fue uno de los primeros países de Europa en impulsar la conservación de espacios naturales con la Ley de Parques Nacionales de 1916. Acabada la guerra, reanudó la exploración científica del Sahara Occidental junto con Alía Medina y Vidal Fox, entre otros.

Dato curioso: Viajó mucho investigando la geología y el paisaje. Sus fotografías son auténticas obras de arte (Sánchez Vigil et al., 2017).

A MODO DE CONCLUSIÓN

En el escenario de la Universidad Central de finales del siglo XIX coincidieron Salvador Calderón y Francisco Quiroga como estudiantes y Juan Vilanova como catedrático de Geología y Paleontología. A pesar de sus múltiples diferencias, tuvieron muchos empeños comunes. El más importante, el de la renovación social a través de la educación. Coincidieron también en la herramienta para lograrlo: la generación de un nuevo profesorado formado en el extranjero y al día de los avances científicos. Este empeño se institucionalizó por primera vez con la creación de la JAE. La necesidad de extender la educación más allá de las aulas fue otra de sus prioridades comunes. Junto a Macpherson, iniciaron el camino de la geología académica moderna en nuestro país. Hernández-Pacheco y Fernández Navarro continuaron su labor y, así mismo, fueron maestros de los maestros de los estudiantes actuales. El Museo de la Geología de la UCM conserva huellas de sus pasos por la Universidad Central, un valioso patrimonio cultural que ofrecer a la sociedad.

REFERENCIAS

Arroyo Ilera, F. y Martín Lou, M.A. (2019): Juan Vilanova y Piera: un geólogo en la Sociedad Geográfica de Madrid. *Boletín de la R.S.G*., CLIV: 183-252.

Casado de Otaola, S. (2001): *La ciencia en el campo. Naturaleza y Regeneracionismo*. Colección Novatores, 4. Nívola libros y ediciones, 124 p.

Durán López, A. (2022): *Historia de la Geología en España.* Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas. Univ. Complutense de Madrid, 266 p.

Hernández-Pacheco, E., Bernaldo de Quirós, C., Fernández Navarro, L., Dantín Cereceda, J. y Cabrera Latorre, A. (1914): *Yebala y el bajo Lucus*. Real Sociedad Española de Historia Natural, 320 p.

Otero Carvajal, L.E. y López Sánchez, J.M. (2012): *La lucha por la modernidad. Las Ciencias Naturales y la Junta para Ampliación de Estudios.* CSIC. Publicación de la Residencia de Estudiantes, 1310 p.

Pardo Bazán, E. (1885): *Una pasión*. https://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/una-pasion--0/html/ffb68cac-82b1-11df-acc7-002185ce6064_2.html

Pelayo López, F. y Gozalo Gutiérrez, R. (2012): *Juan Vilanova y Piera (1821-1893), la obra de un naturalista y prehistoriador valenciano.* Diputación Provincial de Valencia, Museo de Prehistoria de Valencia, 323 p.

Sánchez Vigil, J.M., Salvador Benítez, A. y Olivera Zaldua, M. (2017): *Portugal Inédito. Fotografías de Hernández-Pacheco.* UCM, 102 p.

Soutullo, B. y López-Acevedo, V. (2015): *Estudio introductorio a "¿Es o no el hombre animal?", tesis doctoral de Salvador Calderón y Arana.* Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Segunda época, 13: 9-37.

Vilanova y Piera, J. (1872): *Origen, naturaleza y antigüedad del hombre*. Imprenta de la Compañía de Impresores y Libreros del Reino, Madrid, 446 p.

El papel de la carga sedimentaria durante avenidas fluviales en los trabajos históricos de la Comisión del Mapa Geológico de España.

The role of sediment load during river floods in the early research of the old Commission for the Geological Map of Spain.

D. Vázquez-Tarrío[1], K.P. Sandoval-Rincón[1, 2] y A. Díez-Herrero[1]

1 Departamento de Riesgos Geológicos y Cambio Climático, IGME, CSIC, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.
d.vazqueztarrio@igme.es; kp.sandoval@igme.es; andres.diez@igme.es
2 Universidad Complutense de Madrid (UCM), Facultad de Ciencias Geológicas, Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología.

Palabras clave: Comisión del Mapa Geológico de España, Instituto Geológico y Minero de España, avenidas fluviales, carga sedimentaria, ríos.

Resumen

Los procesos de transporte de sedimento desempeñan un papel capital en la respuesta morfológica de los cauces fluviales durante avenidas y crecidas, al controlar los patrones de erosión/agradación, los umbrales de zapado e inestabilidad de las riberas y la migración de las formas del lecho. A pesar de ello, los estudios de peligrosidad por inundación fluvial han omitido habitualmente la consideración de estos procesos, lo cual se debe, en gran parte, a la escasez de datos disponibles. Esto resulta más llamativo, si cabe, al comprobar que algunos de los trabajos pioneros de la Comisión del Mapa Geológico de España (predecesora del actual IGME), de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, ya incorporaban descripciones detalladas y cuantificación de estos procesos. Así, algunos trabajos de la segunda mitad del siglo XIX, de autores como Casiano de Prado o Daniel de Cortázar, incluían análisis profundos de los efectos de crecidas, así como estimaciones de la carga sedimentaria. En esta contribución, hemos recopilado la información de esos trabajos pioneros sobre carga sólida transportada, comparando los datos recopilados con las estimaciones extraídas de trabajos más recientes, para intentar un primer análisis del cambio experimentado en las condiciones hidro-sedimentarias de los cauces españoles durante el último siglo y medio.

Abstract

Sediment transport plays an important role in the morphological response of river channels during floods. It defines patterns of erosion/aggregation, sets thresholds for bank erosion and instability, and drives bedform migration. Despite this, river flood hazard studies have typically failed to consider these processes, largely due to the paucity of available data. This is even more striking when one realises that some of the pioneering work of the Commission for the Geological Map of Spain (predecessor of IGME), from the late 19th and early 20th century, already included detailed descriptions of these processes. For example, some works from the last quarter of the 19th century, by authors such as Casiano de Prado or Daniel de Cortázar, included detailed analyses of the effects of floods as well as estimates of the sediment load carried by the floods. In this paper we have compiled the information on this that we found in some of these historical works. We have also compared the data collected with estimates from more recent works, to attempt a first analysis of changes in the hydro-sedimentary conditions of Spanish rivers over the last century and a half.

Aprendizaje automático para la modelización de propiedades físicas y litofacies en la Mina de Riotinto, España.

Machine Learning for Subsurface Physical Properties and Lithofacies Modelling in the Riotinto Mine, Spain.

A. Balaguera[1], M. Torne[1], R. Carbonell[1], P. Sánchez[1], Sen Du[2], M. Schimmel[1], J. Díaz[1], J. Vergés[1], J. Fernández[2], S. Rodríguez[3], D Davoise[3]

1 Geosciences Barcelona, Geo3BCN-CSIC, 08028, Barcelona, España. abalaguera@geo3bcn.csic.es, mtorne@geo3bcn.csic.es, ramon.carbonell@csic.es, psanchez@geo3bcn.csic.es, mschimmel@geo3bcn.csic.es, jdiaz@geo3bcn.csic.es y jvergesmasip@gmail.com.
2 Institute of Geosciences Madrid, IGEO-CSIC, 28040 Madrid, España. jft@mat.ucm.es y sen.du@upc.edu
3 Atalaya Mining, Minas de Riotinto, 21660, Huelva, España. susana.rodriguez@atalayamining.com y diego.davoise@atalayamining.com

Palabras claves: Machine Learning, Propiedades física de rocas, minería, Faja Pirítica Ibérica.

Resumen.

Este estudio se enfoca en probar y validar distintos modelos de aprendizaje automático (ML, en inglés) diseñados para predecir propiedades físicas de rocas (PFR) y clasificar las litología predominantes en la mina de Riotinto (RT), ubicada en la Faja Pirítica Ibérica (FPI). La investigación se basa en el análisis de datos de más de mil muestras de rocas superficiales con información sobre PFR, así como de seis pozos de exploración en la mina RT (registros de densidad y descripciones litológicas). Para desarrollar estos modelos de ML fue necesario: a) identificar y ajustar valores atípicos, b) optimizar los parámetros de diversos algoritmos de ML, c) evaluar y comparar la capacidad de predicción de los modelos de ML en relación con métodos matemáticos convencionales, d) implementar modelos de ML supervisados y no supervisados para la clasificación de litologías a partir de las PFR examinadas, y e) estimar la porosidad total, la velocidad de las ondas P y las litofacies utilizando la densidad obtenida de los sondeos. Estos resultados indican que las predicciones de PFR mediante ML minimizan la incertidumbre y proporcionan información adicional sobre las características de la anisotropía de algunas rocas. Utilizando la densidad aparente, la porosidad total y la velocidad de las ondas P, es posible determinar las litologías con una precisión cercana al 80%. Estos resultados demuestran una manera eficiente de combinar datos de perforación, con medidas de muestras de superficie, resaltando la efectividad de las técnicas de ML en la exploración mineral. Este trabajo forma parte del proyecto STONE (CPP2021-009072) entre Atalaya Riotinto Minera S-L. y los institutos Geo3BCN e IGEO del CSIC. (MCIN/AEI/10.13039/501100011033 Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades/Agencia Española de Investigación y Unión Europea Next Generation/PRTR (Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia).

Abstract.

This study focuses on testing and validating various machine learning (ML) models designed to predict the physical properties of rocks (PPR) and classify the main lithologies in the Riotinto mine (RT), located in the Iberian Pyrite Belt (IPB). The research is based on data analysis from over a thousand surface rock samples and from six exploration boreholes (density records and lithology descriptions). Development of ML models implied: a) identify and adjust outliers, b) fine-tune parameters of ML algorithms, c) evaluate and compare the prediction capability of ML models relative to conventional mathematical methods, d) implement supervised and unsupervised ML models for lithology classification based on the analyzed PPR, and e) estimate total porosity, P-wave velocity, and lithology using the density obtained from borehole data. Our findings suggest that PPR predictions through ML minimize uncertainty and offer further insights into the characteristics of anisotropy in some rock types. Using apparent density, total porosity, and P-wave velocity, lithologies can be determined with approximately 80% accuracy. These results demonstrate an efficient way to combine drilling data with surface sample measurements, highlighting the effectiveness of ML techniques in mineral exploration.

Thermodynamic and trace-element modelling of charnockitic-enderbitic magmas

Modelización termodinámica y de elementos traza de magmas charnockíticos-enderbíticos

A. Cambeses[1*], S. Chakraborty[2], S. Bashak[3], A. García-Casco[1,4].

1-Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. * aitorc@ugr.es; agcasco@ugr.es
2-Institut für Geologie, Mineralogie & Geophysik, Ruhr-Universität Bochum, Univertsitätsstrasse 150, Bochum, 44801, Germany. Sumit.Chakraborty@ruhr-uni-bochum.de
3-Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen, Øster Voldgade 10 1350 København K. sbasak@ign.ku.dk
4- Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), 18100 Armilla, Granada, Spain

Palabras clave: Opx-bearing granitoids, Archean, Phase equilibria, Continental crust.

Resumen

La creación de la corteza continental sigue siendo difícil de entender y es objeto de controversia. En este trabajo, exploramos la génesis de los granitoides con ortopiroxeno conocidos como charnockitas-charnoenderbitas-enderbitas. Las rocas charnockíticas comparten similitudes con los TTGs (tonalita-trondhjemita-granodiorita) en cuanto a su composición de elementos mayores, traza e isótopos, pero difieren significativamente en que su mineralogía incluye minerales hidratados, especialmente anfíbol y biotita. Ambos tipos de rocas son predominantemente de edad Arcaica-Proterozoica, por lo que comprender su origen es crucial para entender la evolución temprana de la Tierra, como se propone en los modelos termomecánicos de la geodinámica Arcaica. El desafío petrogenético clave es descifrar los mecanismos que conducen a la cristalización de fases anhidras, en lugar de fases hidratadas, en magmas parentales originados de la misma fuente y dentro del mismo contexto geodinámico. En este estudio, abordamos este problema utilizando cálculos termodinámicos de equilibrios de fases y modelización de elementos traza para su comparación con una extensa base de datos de TTGs y rocas charnockíticas de todo el mundo de edad Arcaico-Paleoproterozoico (3.8-1.6 Ga). Los mecanismos de producción de magma incluyen: 1) Fusión hidratada de rocas máficas dentro del campo de estabilidad de la granate y 2) fraccionamiento magmático para producir magmas con anfíbol (TTGs). Además, se necesita una disminución de la actividad del agua del fundido para producir magmas charnockíticos, quizás como resultado de la infiltración de CO_2, como en la transformación regional de estado sólido de gneises de anfíbol en gneises de ortopiroxeno durante el metamorfismo progresivo

Abstract

The formation of silicic continental crust remains elusive and controversial. Here, we explore the genesis of orthopyroxene-bearing granitoid rocks known as charnockites-charnoenderbites-enderbites. Charnockitic rocks share close similarities with TTGs (tonalite-trondhjemite-granodiorite) in terms of major and trace element and isotopic composition, but strongly differ in that their mineralogy includes hydrous minerals, notably amphibole and biotite). Both rock types are predominantly of Archean-Proterozoic age, so that understanding their origin is pivotal early Earth evolution, as proposed by thermomechanical models of Archean geodynamics. The key petrogenetic challenge is deciphering the mechanisms leading to the crystallisation of anhydrous, rather than hydrous, phases, in parental magmas originated from the same source and within the same geodynamic context. In this study, we address this problem using thermodynamics, trace element modelling and geochemical analysis of an extensive database of worldwide Archean-Paleoproterozoic (3.8-1.6 Ga) TTGs and charnockitic rocks. The mechanisms of magma production include: 1) Wet melting of mafic rocks within the garnet stability field and 2) magmatic fractionation to yield amphibole-bearing magmas (TTGs). In addition, a depression of the water activity of the melt by is needed to yield charnockitic magma, perhaps as a result of CO_2 infiltration as in the regional solid-state transformation of amphibole gneisses into orthopyroxene gneisses during prograde metamorphism.

Extensión y significado de las unidades geológicas más antiguas de la isla de Fuerteventura (Islas Canarias).

Extend and significance of the oldest geological units of the island of Fuerteventura (Canary Islands).

R. Casillas[1], A. Ahijado[1], C. Fernández[2], M. Gutiérrez[3], J.R. Colmenero [4], A. Hernández-Pacheco[5], L.P. Fernández[6], A. Demény[7], G. Nagy[7], E. García-Navarro[8], M. Camacho[8], F. Jourdan[9], U. Glasmacher[10], C. Castillo[1], S. Harangi[11,12], R. Lukacs[12,13], A. Belousov[14], M. Belousova[14], K. Balogh[15†], D. Gimeno[16], J. Alonso-Henar[2], J. De la Nuez[1], M. Quesada[1], M.C. Martín-Luis[1], V. Perelló, G. Martín.

1. Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología, Facultad de Ciencias. C/Astrofísico Sánchez s/n. Universidad de La Laguna. 38206. La Laguna. Santa Cruz de Tenerife. rcasilla@ull.edu.es, aahijado@ull.edu.es, ccruiz@ull.edu.es, obelus@telefonica.net, mcmartin@ull.edu.es.
2. Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 28040. Madrid. jahenar@geo.ucm.es; cafern08@geo.ucm.es.
3. Departamento de Didácticas Específicas, Facultad de Educación. C/ Calle Pedro Zerolo, s/n. Edificio Central. Planta 2. Apartado 456. 38200. La Laguna. Santa Cruz de Tenerife. margutie@ull.edu.es.
4. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced s/n. 37008. Salamanca. colme@usal.es.
5. Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 28040. Madrid.
6. Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. C/ Arias de Velasco s/n. 33005. Oviedo. lpedro@uniovi.es.
7. Institute for Geological and Geochemical Research. Research Centre for Astronomy and Earth Sciences. HUN-REN. Budaorsi ut 45, H-1112. Budapest. Hungary. demeny.attila@csfk.mta.hu, nagygeza41@t-online.hu.
8. Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales. Campus El Carmen. Avda. de las Fuerzas Armadas, s/n. 21007. Huelva. navarro@uhu.es.
9. Western Australian Argon Isotope Facility. School of Earth and Planetary Sciences. John de Laeter Centre / Space Science and Technology Centre / TIGeR. Curtin University, GPO Box U1987. Perth WA6845. Australia. F.Jourdan@exchange.curtin.edu.au.
10. Institute of Earth Sciences. Heidelberg University. Im Neuenheimer Feld 234-236 69120. Heidelberg. Germany. ulrich.a.glasmacher@geow.uni-heidelberg.de.
11. Eötvös Loránd University, Institute of Geography and Earth Sciences, Department of Petrology and Geochemistry. Pázmány sétány 1/C. H-1117. Budapest. Hungary. harangi.szabolcs@ttk.elte.hu.
12. HUN-REN-ELTE Volcanology Research Group, Pázmány. P. sétány 1/C 1117. Budapest. Hungary.
13. Institute for Geological and Geochemical Research, HUN-REN Research Centre for Astronomy and Earth Sciences (MTA Centre of Excellence). Budaörsi út 45 H-1112. Budapest. Hungary. lukacs.reka@csfk.org.
14. Institute of Volcanlogy and Seismology . 9 Piip Boulevard. Petropavlovsk-Kamchatsky. 683006. Rusia. belousov@mail.ru.
15. Institute of Nuclear Research. Hungarian Academy of Sciences. Bem tér 18/C. H-4026. Debrecen. Hungary.
16. Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra. Martí i Franqués, 1. 08028. Barcelona. d.gimeno.torrente@gmail.com.

Resumen: En este trabajo se presenta un nuevo mapa geológico de la isla de Fuerteventura en el que se incluyen las unidades litológicas más importantes de la isla. También se realiza una descripción somera de las mismas y se determina su orden cronológico: a). La corteza oceánica mesozoica; b). El Complejo Plutónico Ultra-alcalino; c). La Dorsal Volcánica Inicial; d). Los grandes edificios en escudo miocenos; e). Los edificios volcánicos plio-cuaternarios; f). Los sedimentos plio-cuaternarios. Dentro de La Dorsal Volcánica Inicial y los grandes edificios en escudo miocenos se incluyen los complejos plutónicos e hipoabisales asociados a estas unidades. De esta manera se clarifica el significado de las distintas unidades incluidas anteriormente en el denominado "Complejo Basal" (la corteza oceánica mesozoica, el Complejo Plutónico Ultra-alcalino, parte de la Dorsal Inicial y los complejos plutónicos-filonianos asociados a los grandes edificios en escudo miocenos), pudiendo considerarse el abandono de dicho término a la hora de describir las formaciones rocosas incluidas hasta ahora en el mismo.

Palabras clave: Mapa geológico de Fuerteventura, principales unidades litológicas, Complejo Basal

Abstract: *In this work, a new geological map of the island of Fuerteventura is presented, which includes the most important lithological units of the island. A brief description of them is also made and their chronological order is determined: a). The Mesozoic oceanic crust; b). The Ultra-alkaline Plutonic Complex; c). The Initial Volcanic Ridge; d). The large Miocene shield volcanoes; e). The Plio-Quaternary volcanic edifice; and f). Plio-Quaternary sediments. The Initial Volcanic Ridge and the large Miocene shield volcanoes include the associated plutonic and hypoabyssal complexes. In this way, it is clarified the meaning of the different units previously included in the so-called "Basal Complex", i.e. the Mesozoic oceanic crust, the Ultra-alkaline Plutonic Complex, part of the Initial Volcanic Ridge and the plutonic-dyke complexes associated with the Initial Volcanic Ridge and with the large volcanoes in Miocene shield, a term that can be abandoned when describing those rock formations previously included in it.*

Key words: *Geological map of Fuerteventura, main lithological units, Basal Complex*

INTRODUCCIÓN

El nacimiento y emersión de Fuerteventura y su posterior evolución se ha llevado a cabo, de forma similar a como ocurre en las otras islas, según dos ciclos fundamentales (crecimiento submarino y subaéreo), que han dado lugar a la formación de diversas rocas representadas en la isla por seis grandes formaciones litológicas (Fig. 1 y Fig. 2):

1). La corteza oceánica mesozoica.
2). El Complejo Plutónico Ultra-alcalino.
3). La Dorsal Volcánica Inicial.
4). Los grandes edificios en escudo miocenos.
5). Los edificios volcánicos plio-cuaternarios.
6). Los sedimentos plio-cuaternarios.

La corteza oceánica mesozoica, el Complejo Plutónico Ultra-alcalino, parte de la Dorsal Inicial y los complejos plutónicos-filonianos asociados a los grandes edificios en escudo miocenos constituyen el Complejo Basal, de acuerdo con la terminología empleada por la escuela del Prof. Fúster Casas. Según esta misma terminología, parte de la Dorsal Volcánica Inicial y los grandes edificios en escudo miocenos constituyen la Serie I, mientras que los edificios volcánicos plio-cuaternarios forman las Series II, III y IV.

A continuación, se describen las unidades litológicas más tempranas de la isla: la corteza oceánica mesozoica; el Complejo Plutónico Ultra-alcalino, la Dorsal Volcánica Inicial, y los grandes edificios en escudo miocenos.

LA CORTEZA OCEÁNICA MESOZOICA.

La corteza oceánica mesozoica pre-volcánica aparece en dos sectores de la costa occidental de la isla (Fig. 1): entre la Piedra de La Playa y el Pardero en la costa norte (Fúster et al., 1968), donde se encuentra muy fracturada e hidrotermalizada, y entre la playa de Los Muertos y la caleta de la Peña Vieja en Ajuy (Fúster et al., 1968, Steiner et al., 1998). En este último sector, esta unidad presenta un espesor aproximado de 1600 m y se encuentra en posición invertida.

Consta de sedimentos siliciclásticos y carbonatados en cuya base aparecen basaltos toleíticos de tipo N-MORB y es de edad Jurásico inferior, representando los materiales más antiguos de la corteza oceánica en el Atlántico Central. La unidad termina en una serie de calizas pelágicas de edad Senoniense.

EL COMPLEJO PLUTÓNICO ULTRA-ALCALINO.

Sus afloramientos (Fig. 1) se extienden hasta la montaña de Los Frailes y la playa del Águila, cerca de El Cotillo, por el norte. Por el sur llegan, por la costa, hasta cerca de la desembocadura del barranco de Amanay (Le Bas et al., 1986). Por el suroeste hasta la montañita de Agando, junto al caserío de Violante. Por el este, hasta el Roque del Buey, al este de la montaña de Gairía. En la península de Jandía están ausentes.

Se trata fundamentalmente de piroxenitas, kaersutiitas, gabros anfibólicos, ijolitas-melteigitas-urtitas, malignitas, sienitas, sienitas nefelínicas, traquitas porfídicas y carbonatitas (Fúster et al., 1968, Le Bas et al., 1986). Estas últimas aparecen, principalmente, concentradas en tres macizos: Esquinzo, Ajuy-Solapa (Punta de la Nao-Caleta de la Cruz) y Punta del Peñón Blanco.

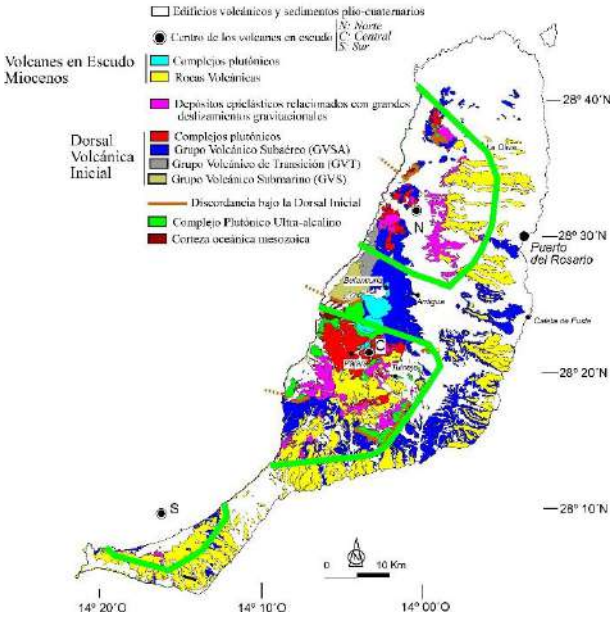


FIGURA 1.- *Mapa geológico de la isla de Fuerteventura (modificado de Balcells et al., 2006) mostrando las principales unidades y la localización de los centros de los edificios volcánicos miocenos (N: Norte, C: Central, S: Sur). En verde se muestran la posición de los anfiteatros de los megadeslizamientos.*

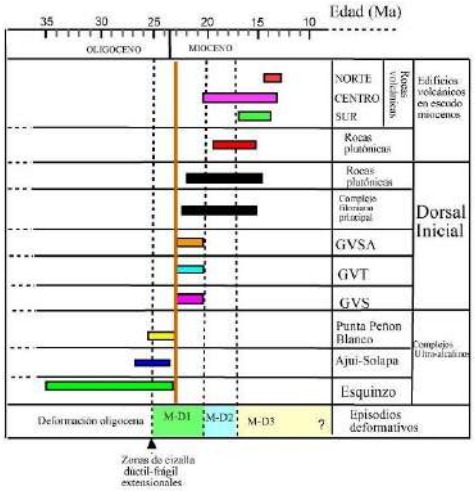


FIGURA 2.- *Esquema de evolución temporal de las diferentes unidades geológicas tempranas relacionadas con la formación de Fuerteventura y etapas de deformación. En color naranja se muestra la posición geocronológica de la discordancia existente bajo las rocas volcánicas de la Dorsal Inicial.*

Algunos afloramientos más dispersos de carbonatitas aparecen en la montaña de Los Frailes, al norte; en el

barranco del Cortijo (Violante) al sur y en el barranco de Los Arrabales (Tiscamanita), en el centro de la isla.

Las rocas de este complejo plutónico están afectadas por zonas de cizalla dúctil o dúctil-frágil de movimiento transcurrente y normal (Fernández et al., 2006), causadas, probablemente, por la existencia de un régimen extensional durante el tránsito Oligoceno-Mioceno y Mioceno, responsable, como veremos más adelante, de la formación de la Dorsal Inicial y de su complejo filoniano de dirección NNE-SSO que llega a representar un 50% de dilatación cortical (Fernández et al., 2006). En la costa norte, en La Piedra de la Playa, contactan con los sedimentos de la corteza oceánica a través de una zona de falla de dirección NE-SO. En el entorno de Ajuí, el contacto con los materiales de la secuencia invertida de la corteza oceánica es intrusivo, aunque se encuentra retocado por las zonas de cizalla dúctil o dúctil-frágil mencionadas anteriormente.

La edad de las rocas de este complejo se sitúa entre los 23 y los 35 Ma (Fig. 2, Sagan et al., 2020), siendo más antiguas en el norte que en el sur (Sagan et al., 2020).

LA DORSAL VOLCÁNICA INICIAL.

Sobre las rocas de la corteza oceánica y del Complejo Plutónico Ultra-alcalino, a través de una discordancia que recorre la isla de norte a sur (Fig. 1), aparecen las rocas volcánicas que constituyen la Dorsal Volcánica Inicial (23 Ma.-20,5 Ma) que se extendería desde la península de Jandía hasta el extremo norte de la isla, sin descartarse que pudiera tener continuidad más hacia el norte en Lanzarote, llegando hasta el Banco de Concepción (descrita ya por Fúster en 1975, como “dorsal canaria”). El término “dorsal volcánica” alude a edificios volcánicos alargados, en forma de “tejado a dos aguas”, generalmente asociados a erupciones fisurales.

Esta discordancia basal de la Dorsal Volcánica Inicial aparece representada, en la zona central y occidental de la isla, por brechas y conglomerados submarinos, mientras que en la parte septentrional, meridional y centro-oriental de la misma aparecen paleosuelos ferruginosos, conglomerados y arenas aluviales. En las brechas y conglomerados son muy frecuentes los fragmentos de sedimentos de la corteza oceánica, piroxenitas, ijolitas, sienitas y traquitas.

Sobre los depósitos detríticos anteriores aparecen los materiales volcánicos de la gran Dorsal Inicial de la Isla. Dicha dorsal está integrada por tres unidades litoestratigráficas transicionales y/o superpuestas (Gutiérrez et al., 2006): el Grupo Volcánico Submarino (GVS), constituido por rocas volcánicas submarinas dispuestas mediante la discordancia basal sobre el Complejo Ultra-alcalino o la corteza oceánica; el Grupo Volcánico de Transición (GVT), constituido por rocas formadas en ambientes de transición submarino-subaéreo, y, finalmente, el Grupo Volcánico Subaéreo (GVSA), integrado por rocas volcánicas subaéreas dispuestas sobre la discordancia, y que incluye los niveles más bajos de los Edificios Subaéreos Meridional, Central y/o Septentrional Inferiores, incluidos, previamente por Ancochea et al. (1996) en los grandes edificios en escudo miocenos.

Atravesando las rocas volcánicas de la Dorsal Inicial (Fig. 2) aparece un importante complejo filoniano, que representa la parte más profunda de esta gran Dorsal y está constituido por una densa red de diques, que en muchos casos constituyen del 95% al 99% del afloramiento rocoso (Fúster et al., 1968, Le Bas et al., 1986, Fernández et al., 2006). Suelen disponerse subverticalmente, aunque también aparecen rotados e inclinados hacia el este o el oeste. Presentan una traza NNE-SSO y de modo muy subordinado, NE-SO y NO-SE. Su composición es variable, predominando los tipos basálticos y traquibasálticos.

Por otro lado, asociados a esta Dorsal Inicial aparecen numerosos cuerpos plutónicos e hipoabisales que se interpretan como los restos de las cámaras magmáticas que alimentaron a este edificio volcánico (Ancochea et al., 1996; Tornare et al., 2016, Fig. 1 y Fig. 2). Las intrusiones plutónicas forman una serie de cuerpos independientes en la parte central y septentrional de la isla (serie gabroide-piroxenítica de Fúster et al., 1968, Stillman et al., 1975, Le Bas et al., 1986), de forma alargada según la dirección NNE-SSO y NO-SE, cuya intrusión (algunos de los plutones, el PX1, han sido datados en 22 Ma) produce intensos fenómenos de metamorfismo de contacto en las rocas encajantes (Stillman et al., 1975), llegándose a producir la anatexis de las rocas preexistentes y la formación esporádica de metacarbonatitas.

La Dorsal Inicial pudo alcanzar más de 3000 metros de altura, volviéndose un edificio volcánico muy inestable, de tal manera que sufrió varios grandes deslizamientos gravitacionales, todos orientados hacia el oeste o noroeste, entre los que podemos destacar los siguientes (Fig. 1):

-A). Al norte, el deslizamiento de Puerto del Rosario Norte que afectó a la parte de la Dorsal que hoy se corresponde con la parte norte de la isla de Fuerteventura, acaecido hace unos 14,5 Ma.

-B). En el centro, el deslizamiento de Puerto del Rosario Sur que afectó a la parte de la Dorsal que hoy se corresponde con la parte central de la isla de Fuerteventura, acaecido hace unos 20,5 Ma.

-C). En el sur, el deslizamiento de Jandía que afectó a la parte de la Dorsal que hoy se corresponde con la península de Jandía, acaecido entre hace 21,5 y 17 Ma.

Como consecuencia de estos megadeslizamientos gravitacionales se produjeron deslizamientos menores secundarios, así como, en el caso del deslizamiento de Puerto del Rosario Norte, un fenómeno de *blast*.

Como producto de todos estos deslizamientos se generaron depósitos de avalancha (*debris avalanches*) que pueden ser observados en tierra, aunque el mayor volumen de ellos se encuentra en el fondo del océano, extendiéndose a lo largo de varios kilómetros en el

margen submarino occidental de la isla (al deslizamiento de Puerto del Rosario Norte se vincula a un megabloque kilométrico situado a unos 50 kilómetros al noroeste de la isla, el segundo de mayor tamaño citado hasta la fecha en deslizamientos de flancos de islas volcánicas oceánicas).

Posteriormente, la erosión de las paredes de los anfiteatros generados dio lugar a depósitos de *debris flow* y de corrientes acuosas aluviales que fueron rellenando y colmatando los anfiteatros, a medida que se reanudaba la actividad volcánica que construyeron los tres grandes edificios volcánicos en escudo anidados.

LOS GRANDES EDIFICIOS EN ESCUDO MIOCENOS.

Tras el desarrollo de los grandes deslizamientos gravitacionales que afectaron a la Dorsal Inicial de la isla, la actividad volcánica se reanudó dando lugar a tres grandes edificios volcánicos en escudo (Fig. 2), anidados dentro de los anfiteatros resultantes de los deslizamientos. Este vulcanismo subaéreo, cuya edad estaría comprendida entre los 20,5 y 12,8 Ma. (Ancochea et al., 1996), dio lugar en la isla a la construcción de tres edificios volcánicos en escudo (parecidos a los que aparecen en Hawai), cuyos centros principales de emisión se situarían al oeste de la pared de Jandía, entre Pájara y Toto, y al este del Puertito de Los Molinos (Fig. 1y Fig. 2):

-Edificio Norte. Construido entre los 14,5 Ma y 12,8 Ma .

-Edificio Central. Construido entre los 20,5 Ma y 13,2 Ma.

-Edificio Sur. Construido entre los 17 Ma y 13,7 Ma.

Estos volcanes se formaron por acumulación de grandes volúmenes de coladas de lavas muy fluidas y de material piroclástico, en erupciones fisurales de altas tasas eruptivas (Ancochea et al., 1996). Los restos de estos edificios se pueden observar en las laderas de los "cuchillos" que limitan los grandes valles en "U" de la parte oriental de la isla.

Los materiales basálticos de estas formaciones están también profusamente atravesados por numerosos diques de diversa naturaleza y composición y por algunos pitones sálicos (p. ej., la Montaña de Tindaya).

Asociados al edificio volcánico en escudo central aparecen numerosos cuerpos plutónicos e hipoabisales, en forma de complejos circulares (Fig. 1), entre los que podemos destacar el de Vega de Río Palmas, con una serie de intrusiones anulares de gabros y sienitas (18.7-16,05 Ma), que dan lugar en el terreno a la aparición de crestas circulares como la que se encuentra en el embalse de Las Peñitas (Fúster et al., 1968). Otros cuerpos los constituyen las sienitas de Toto (19,5 Ma) y las sienitas de Betancuria (15,1 Ma).

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por los Proyectos CGL2009-07775/BTE del MICI; CGL2016-75062-P y PID2020-112920GB-I00 del MCI; PIL2190901 del GC, GRUPIN SV-PA-21-AYUD/2021/51293, y forma parte de las actividades del grupo de Investigación consolidado de la ULL “Geología y Vulcanología de Islas Oceánicas”.

REFERENCIAS

Ancochea, E., Brändle, J.L., Cubas, C.R., Hernán, F. y Huertas, M.J. (1996): Volcanic complexes in the eastern ridge of the Canary Islands: the Miocene activity of the island of Fuerteventura. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70: 183-204.

Balcells, R. J., Barrera, J. L. y Gómez Sainz de Aja, J. A. (2006): *Mapa Geológico de España 1: 100:000, hoja nº 90 (Fuerteventura).* IGME, Madrid.

Fernández, C., Casillas, R., García-Navarro, E., Gutiérrez, M., Camacho, M.A. y Ahijado, A. (2006): Miocene rifting of Fuerteventura (Canary Islands). *Tectonics*, 25. Doi:10.1029/2005TC001941.

Fúster, J.M., Cendrero, A., Gastesi, P., Ibarrola, E. y López Ruiz, J. (1968): *Geología y Volcanología de las Islas Canarias: Fuerteventura*. Instituto Lucas Mallada. C.S.I.C, 239 p.

Gutiérrez, M., Casillas, R., Fernández, C., Balogh, K., Ahijado, A., Castillo, C., Colmenero, J.R. y García Navarro, E. (2006): The submarine volcanic succession of the Basal Complex of Fuerteventura, Canary Islands: a model of submarine growth and emersion of some tectonic-volcanic Islands. *Geological Society American Bulletin*, 118: 785-804.

Le Bas, M.J., Rex, D.C. y Stillman, C.J. (1986). The early magmatic chronology of Fuerteventura. *Geol. Mag*., 123, 287-298.

Sagan, M., Heaman, L.M., Pearson, D.G., Luo, y Stern, R. A. (2020). Removal of continental lithosphere beneath the Canary archipelago revealed from a U-Pb Age and Hf/O isotope study of modern sand detrital zircons. *Lithos*, 362-363. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105448.

Steiner, C., Hobson, A., Favre, P., Stampfli, G.M. y Hernández, J. (1998). Early Jurassic sea-floor spreading in the central Atlantic, the Jurassic sequence of Fuerteventura (Canary Islands). *Geological Society American Bulletin*, 110: 1304-1317.

Stillman C.J., Fúster, J.M., Bennell-Baker, M.J., Muñoz, M., Smewing, J.D. y Sagredo, J. (1975). Basal Complex of Fuerteventura (Canary Islands) is an oceanic intrusive complex with rift-system affinities. *Nature*, 257: 469-471.

Tornare, E. Pilet, S. y Bussy, F. (2016). Magma Differentiation in Vertical conduits Revealed by the Complementary Study of Plutonic and Volcanic Rocks from Fuerteventura (Canary Islands). *Journal of Petrology* 57 (11-12): 2221–2250. DOI: 10.1093/petrology/egx004.

Dating polymetamorphic garnet by U-Pb LA-ICP-MS. A case study from the Western Sierras Pampeanas (Argentina)

Datación de granate polimetamórfico mediante U-Pb LA-ICP-MS. Un caso ejemplar procedente de las Sierras Pampeanas Occidentales (Argentina)

C. Casquet[1], S.O. Verdecchia[2], C.D. Ramacciotti[2], R. Albert[3], A.Gerdes[3], E.G. Baldo[2], R.J. Pankhurst[4]

1 Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain. casquet@ucm.es
2 Centro de investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA, CONICET–Universidad Nacional de Córdoba), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016CGA Córdoba, Argentina. sverdecchia@unc.edu.ar. carlos.ramacciotti@unc.edu.ar
3 Goethe Universität, Institut für Geowissenschaften, FIERCE, Frankfurt am Main, Germany. albertroper@em.uni-frankfurt.de
4 Visiting Research Associate, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, UK. rjpankhurst@gmail.com

Abstract: This contribution describes the second case to our knowledge of dating polymetamorphic garnet by a new U-Pb LA-ICP-MS technique applied to a garnet-staurolite schist. The results confirm the validity of the method to recognize otherwise hypothetical polymetamorphism and to improve petrochronological interpretations in complex basement areas.

Palabras clave: U-Pb LA-ICP-MS dating, garnet, polymetamorphism.

Resumen: *Esta contribución es el segundo caso, que sepamos, de datación de granate polimetamórfico mediante U-Pb LA-ICP-MS en un esquisto con estaurolita y granate. Los resultados confirman la validez del método para reconocer casos de polimetamorfismo otrora hipotéticos y mejorar las interpretaciones petrocronológicas en áreas de basamento complejas.*

Key words: *Datación U-Pb LA-ICP-MS, Granate, polimetamorfismo.*

INTRODUCTION

Garnet is a common mineral in some types of metamorphic rock. Its importance arises from the fact that it often preserves internal textural and chemical zonation that is evidence of the metamorphic history of the enclosing rock. Point dating of the often-complex interior of garnet grains is thus the best way to assign ages to reactions that involved garnet growth or resorption along the P-T path of the rock. This issue can be now accomplished by a new LA-ICP-MS U-Pb technique developed at the Frankfurt Isotope and Element Research Center (FIERCE). A challenge is posed in the case of polymetamorphism, i.e., where the rock underwent more than one discrete event of metamorphism, not tested so far. Resolving this problem is not easy by other geochronological methods because of resetting (sometimes partially) during the younger events. However, garnet can be ideal to this purpose if textural or chemical evidence suggest that it resulted from polymetamorphism. The case dealt here - only the second published example worldwide - shows that this new point-dating U-Pb technique works well, in agreement with a former test by Marschall et al. (2022) in another case of polymetamorphism.

GEOLOGICAL SETTING

In the Sierras Pampeanas the first clearly recognized orogeny is Grenvillian (1.0 and 1.35 Ga), probably the conjugate of the Grenvillian margin of Laurentia in the Rodinia supercontinent (Casquet et al., 2006). After break-up in the early Cambrian and the opening of the Iapetus Ocean, the new proto-Andean continental margin (SW Gondwana margin) was the site of the Famatinian orogeny between ca. 490 and 410 Ma that reworked the Precambrian basement. The Maz Series is a meta-sedimentary sequence of schists, metapsamites and marble that was originally deposited between 1.86 and 1.33-1.26 Ga on the margin of the Columbia supercontinent (Ramacciotti et al., 2022). The Maz Series is part of a thrust stack that resulted from shortening accompanied by inverted Barrovian-type regional metamorphism between 445 and 410 Ma (Verdecchia et al., 2022, 2023).

MAZ-11032 is a sample of staurolite-garnet schist from the Maz Series. Garnet porphyroblasts show a complex interior (Verdecchia et al., 2022). Three varieties of garnet were identified from mineral chemistry (major and trace elements) and compositional X-ray maps: Grt1, Grt2, and Grt3. Grt1 occurs as anhedral to subhedral cores and is distinguished because it shows microfractures that are mostly not visible under the microscope and in backscattered electron (BSE) images, but are clearly recognized in grossular-content (XGrs) X-ray maps. These microfractures are mostly perpendicular to the external foliation (S2) and are the locus of replacement by more calcic garnet (Grt2) that preserves the original shape of Grt1 crystals. The

boundary between Grt1 and Grt2 is often sharp. A mainly fluid-assisted ICDR process is invoked. Grt3 forms a scalloped overgrowth (rim) around Grt1 and Grt2, and is mostly free of inclusions. Grt1 was interpreted as relict from Grenvillian metamorphism, whereas Grt2 and Grt3 were interpreted as Famatinian. P-T conditions for Grt1 were estimated at 790ºC and ca. 5.1 kbar (granulite facies) and those for Grt2 at 585ºC and ca. 8.7 kbar (Figure 4 in Verdecchia et al., 2022).

U-Pb SHRIMP zircon dating of MAZ-11032 schist showed two populations, one detrital (cores) and one metamorphic (mantles). The three youngest cores yielded a weighted mean age of 1860 ± 10 Ma. Mantles with characteristic low Th/U < 0.04) yielded one prominent peak at 1037 ± 7 Ma and a minor one at 1159 ± 15 Ma. (Ramacciotti et al., 2022). Monazite CHIME-dating yielded a robust weighted mean age of 426 ± 15 Ma (Verdecchia et al., 2022).

From the evidence above, we tentatively correlated the Grenvillian ages of the zircon mantles with the first garnet (Grt1) (Verdecchia et al., 2022) and interpreted the rock and the Maz Series as polymetamorphic: i.e., resulting from the thorough overprint of a Grenvillian metamorphism (and deformation) (M1) by a Silurian one (M2). The latter was accompanied by a penetrative foliation. However, the doubt remained as to whether: 1) zircon grains truly underwent mantle formation "in situ", i.e., they could be detrital too; and 2) fractured garnet cores (Grt1) may not be correlated with the Grenvillian M1 metamorphism.

LA-ICP-MS U-Pb DATING OF GARNET

Garnet porphyroblast PB2 (Verdecchia et al., 2022; Fig. 6) was chosen for U-Pb dating. This consists of a relict core Grt1 a thin Grt2 mantle and a Grt3 overgrowth (rim) (Fig. 1). Analyses were performed in the core (n = 23) and in the outer zones (n = 20). T-W plots of selected data (21 and 13 spots respectively, discarding the most discordant data) were constructed. Cores yielded a lower intercept age of 1045.3 +27.6/-31.2 Ma. The Grt3 rim yielded an age of 475.5 + 16.7/-18.0 Ma. These values confirm that the rocks underwent polymetamorphism: M1 in the late Mesoproterozoic (Stenian) and M2 in the early Paleozoic. Moreover, the older age agrees with the U-Pb SHRIMP zircon age of metamorphic rims from the same schist (1037 ± 7 Ma; Ramacciotti et al., 2022). Therefore, the U-Pb system of the cores was not significantly perturbed by the second metamorphism probably because the temperature did not attain the threshold for Pb diffusion in garnet (> 900ºC; Marschall et al., 2022). As for the second age the interpretation is less straightforward. The M2 was dated by different methods and authors between 440 and 410 Ma (a review in Verdecchia et al., 2022) and attributed to the Silurian Rinconada phase of the Famatinian orogeny (Casquet et al., 2021). The age difference probably resulted from retention of some radiogenic Pb from M1 in small relict Grt1 domains within the Grt3 rim.

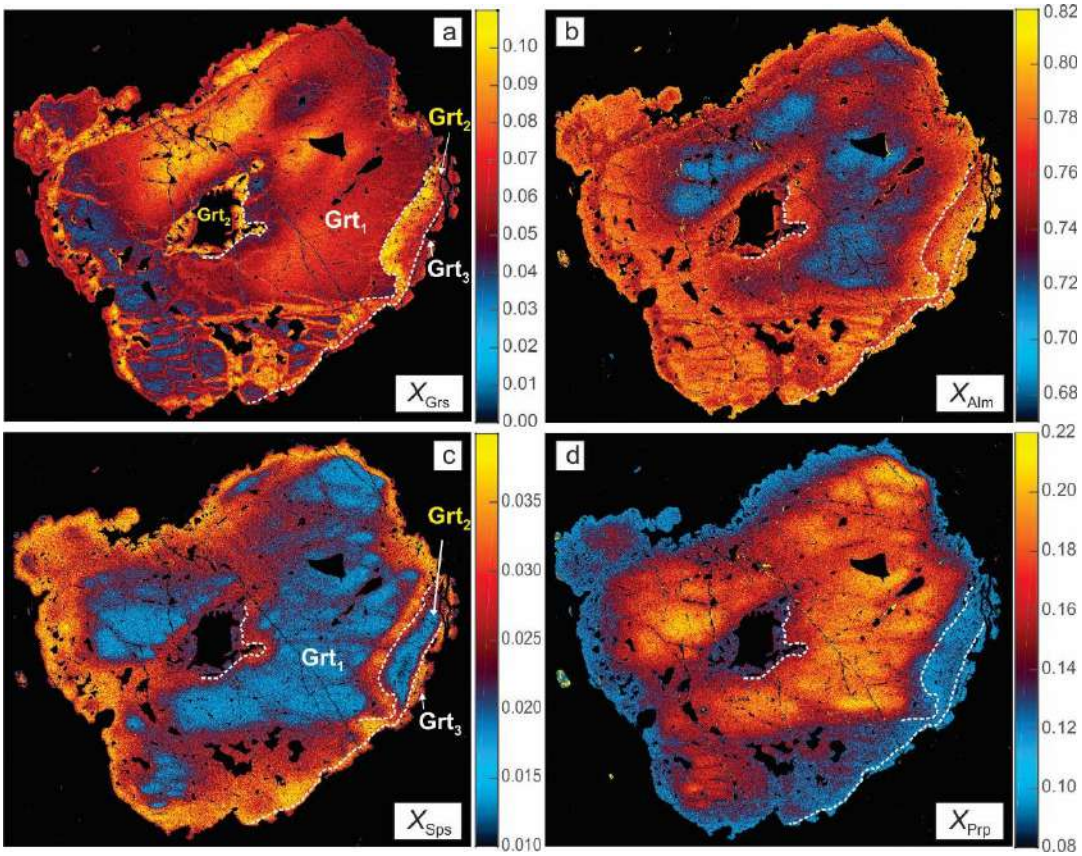


FIGURE 1. *Compositional X-Ray maps for XGrs, XAlm, XPrp and XSps of garnet from polymetamorphic schist showing the complex interior (see text for explanation). Modified from Figure 6 of Verdecchia et al. (2022).*

REFERENCES

Casquet C., Ramacciotti C., Larrovere M.A., Verdecchia S., Murra J., Baldo E.G., Pankhurst RJ and Rapela C.W. (2021): The Rinconada phase: a regional tectono-metamorphic event of Silurian age in the pre-Andean basement of Argentina. Journal of South American Earth Science 111: 103432. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103432

Marschall, H., von Mutius, R., Gerdes, A., Millonig, L., Albert, R., Beranoaguirre, A., and Hezel, D. (2022): The petrochronologic potential of LASS-ICPMS U–Pb dating of garnet and evidence for an ultra-high closure temperature, In: EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-12199. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12199

Ramacciotti C.D., Casquet C., Baldo E.G., Pankhurst R.J., Verdecchia S.O., Fanning C.M. and Murra, J.A. (2022): The Maz Metasedimentary Series (Western Sierras Pampeanas, Argentina): a relict basin of the Columbia supercontinent? Geological Magazine 159: 309–21. https://doi.org/10. 1017/S0016756821000935

Verdecchia SO, Ramacciotti CD, Casquet C, Baldo EG, Murra JA and Pankhurst RJ (2022): Late Famatinian (440-410 Ma) overprint of Grenvillian metamorphism in Grt-St schists from the Sierra de Maz (Argentina): phase equilibrium modelling, geochronology and tectonic significance. Journal of Metamorphic Geology 8: 1347–81. https://doi.org/10. 1111/jmg.12677

Verdecchia S.O., Casquet C., Baldo E.G., Larrovere M.A., Lembo Wuest C.I., Benítez M.E., Ramacciotti C.D., Murra J.A., and Pankhurst R.J. (2023): Silurian inverted Barrovian-type metamorphism in the Western Sierras Pampeanas (Argentina): a case of top to bottom heating? Geological Magazine https:// doi.org/10.1017/S0016756823000080

LA-ICP-MS como herramienta en el estudio de procesos geodinámicos: Análisis de Clinopiroxenos en Peridotitas.

LA-ICP-MS as a tool in the study of geodynamic processes: Analysis of Clinopyroxenes in Peridotites.

M. Castillo-Carrión[1], J. Escuder-Viruete[1], P. Valverde-Vaquero[1], F.J. Fernández[2], F. Pérez Valera[3], M.T. Andrés Álvez[1] y J. Escuder Magallón[1]

1 Instituto Geológico y Minero España, CSIC, C. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. España. m.castillo@igme.es; j.escuder@igme.es; p.valverde@igme.es; m.andres@igme.es; javier.escuder@estudiante.uam.es
2 Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo. C. Jesús Arias de Velasco, 33005 Oviedo. España. fjfernandez@uniovi.es
3 Dpto. de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante. 03080 Sant Vicent de Raspeig, Alicante. España. fperez@ua.es

Palabras clave: LA-ICP-MS, elementos traza, clinopiroxenos, Peridotita Loma Caribe

Resumen

La técnica LA-ICP-MS (Ablación por Láser y Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente) es una herramienta esencial en la investigación geológica, proporcionando una capacidad única para el análisis preciso y detallado de minerales en rocas ígneas y metamórficas. Este método permite la obtención de información "in situ" sobre la composición química de minerales específicos, contribuyendo significativamente al estudio de la génesis de estas rocas. (Sylvester y Jackson 2016)

La capacidad de realizar análisis multielementales "in situ" a una resolución espacial de varias micras, brinda una visión completa de la composición química espacial de elementos traza en los minerales, que es fundamentales para rastrear la evolución de magmas y procesos metamórficos. Este enfoque analítico permite la identificación de patrones geoquímicos específicos que arrojan luz sobre la historia térmica, la cristalización fraccionada y otros procesos relevantes. La mínima preparación de muestra necesaria para la LA-ICP-MS simplifica el proceso analítico, reduciendo la posibilidad de contaminación y permitiendo el análisis directo de minerales en su contexto original. Como ejemplo, en este trabajo se muestran los resultados del análisis de clinopiroxenos en una lámina delgada de una hazburgita con una vena pioxenítca de la Peridotita de Loma Caribe en la República Dominicana (Escuder-Viruete et al 2023).

Abstract

The LA-ICP-MS technique (Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) is an essential tool in geological research, providing a unique capability for precise and detailed analysis of minerals in igneous and metamorphic rocks. This method allows for "in situ" information on the chemical composition of specific minerals, significantly contributing to the study of the genesis of these rocks (Sylvester and Jackson, 2016).

The ability to perform "in situ" multielemental analysis at a spatial resolution of several microns provides a comprehensive view of the spatial chemical composition of trace elements in minerals, which is essential for tracking the evolution of magmas and metamorphic processes. This analytical approach enables the identification of specific geochemical patterns that shed light on thermal history, fractional crystallization, and other relevant processes. The minimal sample preparation required for LA-ICP-MS simplifies the analytical process, reducing the risk of contamination and allowing for direct analysis of minerals in their original context. As an example, this work presents the results of clinopyroxene analysis in a thin section of a harzburgite with a pyroxenitic vein from the Loma Caribe Peridotite in the Dominican Republic (Escuder-Viruete et al., 2023).

Referencias

Escuder-Viruete, J., Castillo-Carrión, M., Rubio Ordóñez, A., Fernández,F.J., Pérez Valera, F., Escuder-Magallón, J. y Valverde Vaquero, P. (2023). *Geogaceta* 74, 35-38.

Sylvester P.J. y Jackson S.E. (2016). *Elements* 12, 307-310.

Distorsión por difusión del sistema isotópico U-Th-Pb en circón como consecuencia de un choque térmico: un estudio en enclaves graníticos en lamproitas del SE de España.

Diffusion-induced disturbance of the U-Th-Pb isotope system in zircon as a consequence of thermal shock: A study in granitic enclaves hosted in lamproites (SE Spain)

R. Corpas[1*], A. Cambeses[1], J.F. Molina[1], P. Montero[1], F. Bea[1], I. Novo-Fernández[1], N. Pujol-Solá[1], M.M. Repczyńska[1], L. Barcos[1], A. Garcia-Casco[1,2].

1- Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. *rafacorol@correo.ugr.es, aitoc@ugr.es; jfmolina@ugr.es; pmontero@ugr.es; inovo@ugr.es; npujolsola@ugr.es; maria.repczynska@ugr.es; leticia_barcos@ugr.es; agcasco@ugr.es
2- Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), 18100 Armilla, Granada, Spain

Palabras clave: Zircon, Difussion, HT condition, Xenoliths, Lamproites.

Resumen

La alta solubilidad del circón en líquidos silicatados, particularmente en los máficos, hace que el blindaje dentro de otro grano mineral sea uno de los mecanismos más favorables para su preservación. Aun así, este blindaje no impediría el reajuste de los sistemas isotópicos por difusión. En este trabajo se estudian los procesos de distorsión del sistema U-Th-Pb en circón como consecuencia de un choque térmico en circones procedentes de enclaves graníticos incluidos en diques lamproíticos de la Provincia Volcánica Neógena del SE de España. La datación U-Th-Pb de estos granos proporcionó c. 60 % de edades Pérmico-Carbonífero (270-390 Ma) que muestran dos tendencias en cuento a la distribución de edades: i) una discordia inversa que alcanza c. 385 Ma, con la intercepción más joven en c. 315 Ma, y ii) una discordia que incluye las edades más jóvenes (desde c. 270 Ma hasta 310-320 Ma). Este amplio intervalo de edad es el resultado de la distorsión inducida por difusión del sistema isotópico U-Th-Pb del circón durante el choque térmico inducido por los magmas lamproíticos que englobaban a los enclaves, que alcanzó, al menos, c. 1300 ºC. En estas condiciones, la mayor capacidad de difusión de Pb^{2+}respecto al U^{4+} y el Th^{4+} favoreció la movilización del Pb desde los dominios de mayor a menor concentración. Según los cálculos numéricos, menos de un mes es suficiente para generar el patrón de difusión observado a 1300 ºC. Nuestros resultados ponen de relieve la importancia de los procesos de difusión en xenocristales de circón que puedan proporcionar edades espurias.

Abstract

The high solubility of zircon in silicate (especially mafic) liquids makes shielding within other mineral grain one of the most favourable mechanisms for zircon preservation. Still, shielding does not prevent resetting of the isotopic systems in zircon. In the present work we evaluate the consequences of thermal shock in zircon grains from granitic enclaves within lamproite dykes from the SE Spain Neogene Volcanic Province. U- Th-Pb dating of these grains yielded c. 60 % Permian-Carboniferous ages (270-390 Ma) that show two distinctive age trends showing: i) a reverse discordia that reaches c. 385 Ma, with the youngest interception at c. 315 Ma, and ii) a discordia that includes the younger ages (from c. 270 Ma to 310-320 Ma). This broad age interval results from diffusion-induced disturbance of the zircon U-Th-Pb isotopic system during the thermal-sock induced by the enclosing lamproite magmas reaching up to, at least, c. 1300 ºC. Under these conditions, the faster diffusion coefficient of Pb^{2+} relative to U^{4+} and Th^{4+} favours the mobilisation of Pb from higher to lower concentration domains. Following the numerical modelling, less than one month is enough to generate the observed diffusion pattern at 1300 ºC. Our results highlight the importance of diffusion processes in xenocrystic zircons that may result in spurious ages.

GeoTeRi: una nueva base de datos geoquímica de las erupciones post-caldera del complejo volcánico Teide-Pico Viejo y rifts adyacentes.

GeoTeRi: a new geochemical database of post-caldera eruptions of Teide-Pico Viejo complex and adjacent rifts.

O. Dorado[1,2], A. Geyer[3] y J. Martí[4]

1 Geociencias Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. odorado@geo3bcn.csic.es
2 Departament de Mineralogia, Petrología i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí Franquès s/n, 08028 Barcelona. odorado@geo3bcn.csic.es
3 Geociencias Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. ageyer@geo3bcn.csic.es
4 Department of Geosciences, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Jordi Girona 18-26, 08034, Barcelona. joan.marti@idaea.csic.es

Palabras clave: Tenerife, Geoquímica, Teide-Pico Viejo, Database, Islas Canarias.

Resumen

La isla de Tenerife (Islas Canarias), con una población cercana al millón de habitantes y atrayendo a más de 5 millones de turistas anualmente, alberga uno de los sistemas volcánicos potencialmente más peligrosos de Europa, actualmente ubicado en la región central (complejo volcánico Teide-Pico Viejo) y en los dos rifts adyacentes. La complejidad de este sistema exige una comprensión exhaustiva de su estratigrafía, petrología y geoquímica para la correcta evaluación de su peligrosidad volcánica. En este estudio, presentamos una revisión de la geoquímica de los productos eruptivos asociados a eventos ocurridos en el área durante los últimos 180.000 años (con énfasis en el Holoceno), tras la erupción de El Abrigo, la última que dio lugar a un evento de formación de caldera. La base de datos GeoTeRi incluye información de 49 referencias, abarcando análisis de elementos mayoritarios y traza en roca total, así como datos isotópicos. Además, se ha llevado a cabo una revisión cronoestratigráfica utilizando los mapas volcanoestratigráficos disponibles y datos radiométricos. GeoTeRi actualmente contiene datos de 669 muestras de rocas, más de 500 análisis de elementos mayoritarios y traza, y 175 análisis isotópicos. Esta base de datos pretende ser una herramienta para reconstruir la evolución geoquímica del sistema magmático activo de Tenerife y proporcionar un punto de partida para futuros estudios. Adicionalmente, hemos realizado un análisis estadístico para evaluar la robustez de la base de datos y su representatividad, así como para identificar posibles lagunas de conocimiento de este sistema activo.

Abstract

Tenerife island (Canary Islands), home to nearly a million inhabitants and attracting over 5 million tourists annually, houses one of Europe's potentially most hazardous volcanic systems, now primarily located in the central region (Teide-Pico Viejo volcanic complex) and two adjacent rifts. The complexity of his system demands a thorough understanding of stratigraphy, petrology, and geochemistry for effective hazard assessment. In this study, we present a comprehensive review of the geochemistry of eruptive products associated with events that occurred in in this area over the last 180,000 years (with emphasis on Holocene eruptions), following El Abrigo eruption, the island's latest caldera-forming event. The GeoTeRi database contains information from 49 references, including whole-rock major and trace elements analyses, and isotopic data. Additionally, we have conducted a chronostratigraphic review using volcanostratigraphic maps and radiometric data. GeoTeRi currently comprises data from 669 rock samples, including over 500 major and trace element analyses and 175 isotopic analyses. This database aims to serve as tool for reconstructing the geochemical evolution of Tenerife's active magmatic system and provide a starting point for future studies. Additionally, we have conducted a statistical analysis to assess the database's robustness, sample representativeness, and identify potential knowledge gaps in the understanding of this active system.

La Formación Ollo de Sapo y sus equivalentes mundiales: implicaciones tectónicas para Gondwana.

The Ollo de Sapo Formation and its worldwide equivalents: tectonic implications for Gondwana.

M. García-Arias[1], M. Morales Cámera[2], J.A. Dahlquist[2], P. Gao[3], S. Couzinié[4] y A. Díez-Montes[5]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca, España. mgarias@usal.es
2 Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Centro de investigaciones en Ciencias de la Tierra, (CICTERRA), Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina. matiasmmoralesc@unc.edu.ar, juan.andres.dahlquist@unc.edu.ar
3 School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China, y School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China. gaop8@mail.sysu.edu.cn
4 Université de Lorraine, CNRS, CRPG, F-54000 Nancy, France. simon.couzinie@univ-lorraine.fr
5 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Plaza de la Constitución 1, 37001, Salamanca, España. al.diez@igme.es

Resumen: La Formación Ollo de Sapo es uno de muchos ejemplos de un magmatismo peraluminoso (volcánico y plutónico) de edad Neoproterozoico superior-Paleozoico inferior que aflora en Sudáfrica, NW Argentina, América Central, los Macizos Variscos Europeos y el Tibet, entre otros lugares. Estas rocas se caracterizan petrográficamente por tener grandes fenocristales de feldespato potásico y por la ausencia de anfíbol. Geoquímicamente, el magmatismo es tipo S (ácidos, peraluminosos, signatura isotópica Sr-Nd fuertemente cortical), pero comparte rasgos de tipo I (signatura de elementos traza propia de magmatismo de arco continental) y tipo A (enriquecimiento en Ga). Suelen tener una relación Sr/Y muy baja (< 3), implicando fusión a baja presión. La peraluminosidad y la signatura de arco son heredadas de sus fuentes (rocas sedimentarias formadas por erosión del basamento y de orógenos pan-africanos y tipo andinos). Estas rocas forman una *suite* bimodal, aunque el magmatismo básico es reducido. El magmatismo se emplazó en el margen de Gondwana y se formó por tectónica extensional en un contexto de retro-arco, lo que implica que todo el margen Gondwánico sufrió una evolución tectónica común que en algunos sectores llevó a rifting y apertura de océanos durante el Cámbrico y Ordovícico. Dadas las similitudes petrográficas y geoquímicas, este magmatismo podría constituir varios LIPs silíceos.

Palabras clave: Peri-Gondwana, magmatismo, peraluminoso, Paleozoico Temprano, tectónica extensional.

Abstract: *The Ollo de Sapo Formation is one of many examples of a peraluminous magmatism (volcanic and plutonic) of Late Neoproterozoic and Early Paleozoic age cropping out in South Africa, NW Argentina, Central America, the European Variscan Massifs and the Tibet, among other places. These rocks are petrographically characterized by large K-feldspar phenocrysts and absence of amphibole. Geochemically, the magmatism is mainly S-type (silica-rich, peraluminous, and strongly crustal Sr-Nd isotopic signature), but share features of I-type (trace element signature typical of continental-arc magmatism) and A-type magmatism (enrichment in Ga). They usually have very low Sr/Y ratios (< 3), implying melting at low pressures. The peraluminosity and arc signature are inherited from their sources (sedimentary rocks derived from erosion of the basement and Pan-African and Andean-type orogenic belts). The magmatism forms a bimodal suite, although coeval basic rocks are minor. The magmatism is located in peri-Gondwana and has generally been ascribed to extensional tectonics in a back-arc setting, implying that the Gondwanan margin underwent a common evolution that led to rifting and opening of multiple oceans (Rheic, proto-Tethys) during the Cambrian and Ordovician in some sectors. Given the similarities in the petrography and geochemistry, they may form several silicic LIPs.*

Key words: *Peri-Gondwana, magmatism, peraluminous, Early Paleozoic, extensional tectonics.*

INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, numerosas publicaciones han descrito un magmatismo félsico, peraluminoso y porfídico de edad Neoproterozoico superior, pero principalmente Paleozoico inferior, presente en varios continentes (Sudáfrica, NE Patagonia, NW Argentina, Colombia, América Central, desde Maine hasta Terranova, Irlanda, Marruecos, Macizos Variscos Europeos, Turquía y desde Afganistán hasta N Birmania), el cual está representado en Iberia por la Formación Ollo de Sapo. Todos estos afloramientos comparten numerosas características petrográficas, geoquímicas y geocronológicas. En una reconstrucción paleogeográfica de Gondwana para el Ordovícico inferior, este magmatismo se localiza en los márgenes del

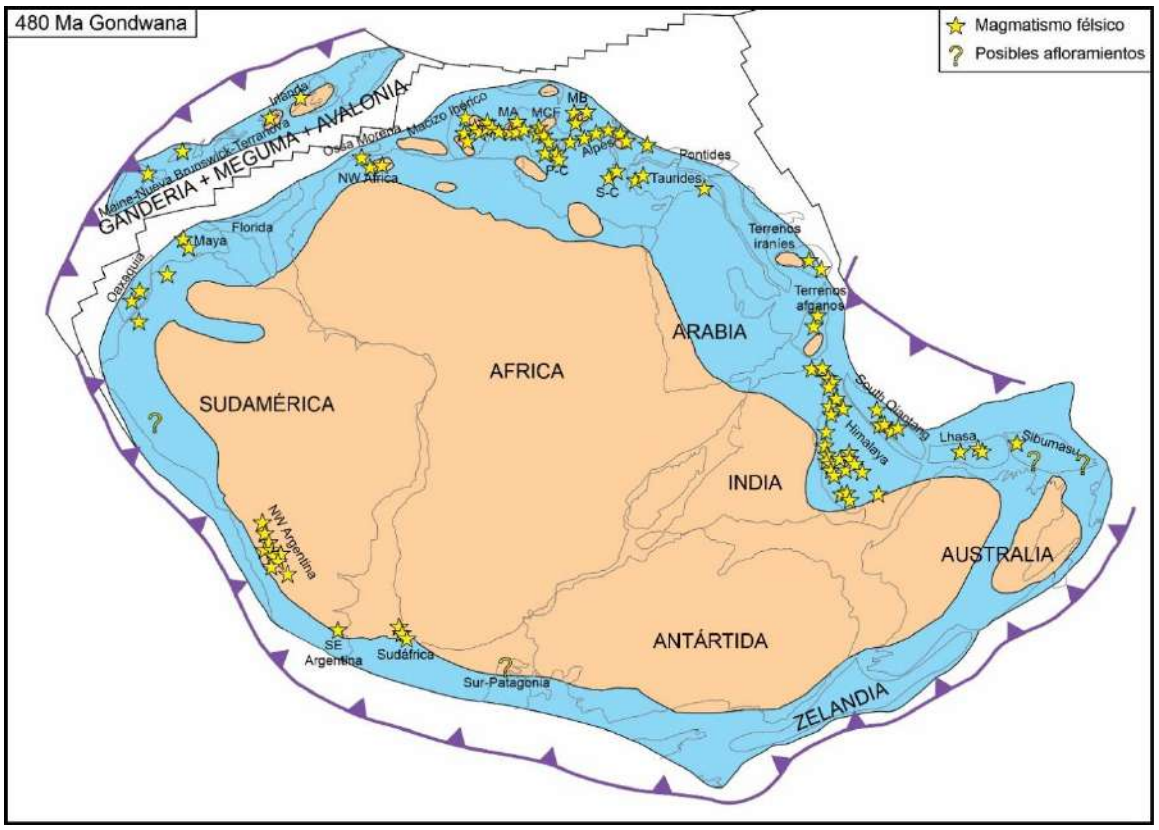


FIGURA 1. *Mapa de Gondwana de 480 Ma (modificado de Cocks y Torsvik, 2021) con la localización de los afloramientos del magmatismo félsico. MA: Macizo Armoricano; MB: Macizo de Bohemia; MCF: Macizo Central Francés; P-C: Pirineos y Cerdeña; S-C: Sicilia-Calabria.*

supercontinente (Fig. 1). Estas similitudes indican que los distintos afloramientos de este magmatismo no son independientes, sino que son el reflejo de un proceso tectónico común a todo el margen de Gondwana durante esa época. En este trabajo exponemos un resumen de nuestra revisión (García-Arias et al., en revisión) basada en toda la literatura por nosotros conocida acerca de este magmatismo, incluyendo los escenarios tectónicos propuestos y evaluando las implicaciones tectónicas que el magmatismo tiene para el margen de Gondwana.

PETROGRAFÍA

El magmatismo revisado aquí es de naturaleza plutónica, volcánica y subvolcánica. Petrográficamente, está caracterizado por una textura porfídica, con grandes fenocristales de feldespato potásico (hasta 15 cm) y fenocristales de plagioclasa y cuarzo de menor tamaño en una matriz vítrea o de grano fino en las rocas volcánicas y subvolcánicas, y de grano medio a grueso en las rocas plutónicas. Esta matriz, cuando no es vítrea, consiste en cuarzo, ambos feldespatos y biotita como minerales esenciales, a veces con moscovita y otros minerales aluminosos, careciendo de anfíbol. En ocasiones (NW Argentina, Macizos Variscos Europeos, algunas regiones del Himalaya), los fenocristales de feldespato potásico son redondeados con un borde de albita, similar a la textura rapakivi, y los fenocristales de cuarzo pueden ser azulados. Las rocas plutónicas son dominantes, pero en algunas regiones (Lhasa, Cerdeña y la Fm. Ollo de Sapo, entre otros) son las rocas volcánicas las que dominan. Debido a posteriores orogenias, en muchos casos estas rocas han sido transformadas a gneises glandulares y leucogneisses. Son comunes las rocas máficas coetáneas con el magmatismo félsico (y en NW Argentina los granitoides tipo I), aunque volumétricamente son reducidas.

GEOQUÍMICA

El magmatismo es generalmente silíceo (98% análisis > 63% SiO_2), félsico a moderadamente máfico (94% análisis > 0.5 y < 8 wt.% FeO_t + MgO), rico en álcalis (90% análisis > 6 wt.% Na_2O + K_2O), potásico (K_2O/Na_2O > 1 para 84% de los análisis), peraluminoso a fuertemente peraluminoso (ASI > 1.1 para 85% de los análisis) y mostrando una pendiente positiva en el diagrama de Debon y Le Fort (1983) modificado por Villaseca et al. (1998), apuntando a una roca fuente metasedimentaria (Fig. 2A). Las rocas se clasifican como dacitas (granodioritas) y riolitas (granitos) en el diagrama TAS y son subalcalinas, aunque cerca del límite con las rocas alcalinas.

Con respecto a la geoquímica de elementos traza, las rocas presentan altos contenidos de REE (56-244 ppm, entre los percentiles 10 y 90 de los análisis), con un fraccionamiento mayor en LREE (64% de los valores de $(La/Sm)_N$ > 3) que en HREE, que suelen mostrar un patrón plano (75% de los valores de $(Gd/Lu)_N$ entre 0.5 y 2), y tienen una fuerte anomalía negativa de europio (61% de los valores de $(Eu/Eu^*)_N$ < 0.5) (valores normalizados al condrito de Sun y McDonough, 1989). En el diagrama multielemental normalizado al basalto MORB de Pearce (1983), las rocas muestran el característico patrón de rocas de arco continental, con enriquecimiento en LILE (excepto Sr), empobrecimiento en HFSE y anomalías negativas en Nb y Ta (Fig. 2B).

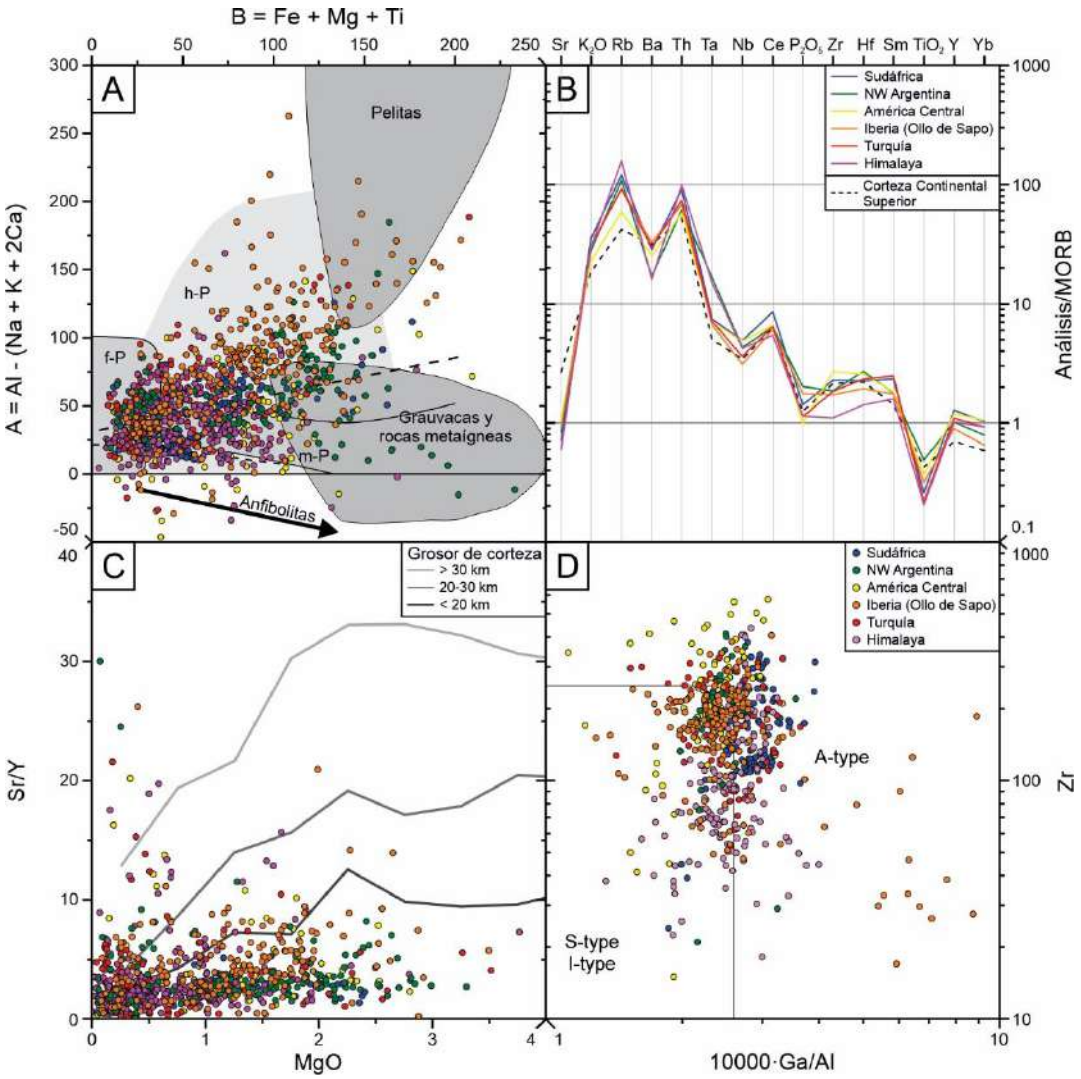


FIGURA 2. *Diagrama B-A (A), diagrama multielemental (B), diagrama Sr/Y – MgO (C) y diagrama Zr – Ga/Al (D). Análisis recopilados por García-Arias et al. (en revisión). Grosor de corteza continental en el panel C según Chiaradia (2015). Nótese que los análisis se proyectan en las mismas áreas a pesar de provenir de regiones muy lejanas.*

Respecto a la composición de la corteza continental superior reportada por Rudnick y Gao (2003), las rocas tienen contenidos similares de LREE, están enriquecidas en HREE, K, Rb, Ta e Y y empobrecidas en Sr y Ti (Fig. 2B). El empobrecimiento en Sr y enriquecimiento en Y causa que las rocas tengan una relación de Sr/Y muy baja (62% análisis por debajo de 3) (Fig. 2C). En el diagrama Zr-10000·Ga/Al de Whalen et al. (1987), las rocas se extienden desde el campo de los granitos tipo S/I a los granitos tipo A (Fig. 2D).

Con respecto al sistema isotópico Sr-Nd, las rocas muestran generalmente valores corticales (70% valores $^{87}Sr/^{86}Sr_i$ > 0.706; 70% valores de ε_{Ndi} < -4), pero en algunos casos se extienden hasta el reservorio *Bulk Silicate Earth*.

GEOCRONOLOGÍA

Según edades U/Pb en zircón, el magmatismo se desarrolló durante 140 Ma, desde los 580 Ma hasta los 440 Ma, pero está restringido principalmente a dos periodos: anterior a 520 Ma (Ediacárico superior – Cámbrico inicial) y 500-450 Ma (Cámbrico superior – Ordovícico medio). El pico del primer pulso sucedió entre 550-540 Ma en los Macizos Variscos Europeos, Marruecos y Turquía, 555-530 Ma en Sudáfrica y 535-515 Ma en NW de Argentina y NE de Patagonia. El pico del segundo y más importante pulso sucedió esencialmente entre 480-470 Ma, si bien la edad exacta varía según la región: 490-465 Ma en NW Argentina, 490-440 Ma para América Central, 490-470 y 450-440 en Colombia y Venezuela, 480-470 Ma en Maine-Terranova, 460-450 Ma en Irlanda, 495-470 Ma en el Macizo Ibérico, 475-450 Ma en los Pirineos, 490-480 Ma en el Macizo de Bohemia, hasta los 440 Ma en los Cárpatos, 490-465 Ma en el Himalaya occidental, 510-490 Ma en el Himalaya oriental y 520-490 Ma en el terreno de Lhasa (Fig. 3).

DISCUSIÓN

Las similitudes petrográficas, geoquímicas y geocronológicas de este magmatismo, que forma un cinturón de decenas de miles de kilómetros pero limitado al margen de Gondwana, implica que este margen desarrolló una evolución tectónica y magmática similar durante el Paleozoico inferior. De la similitud

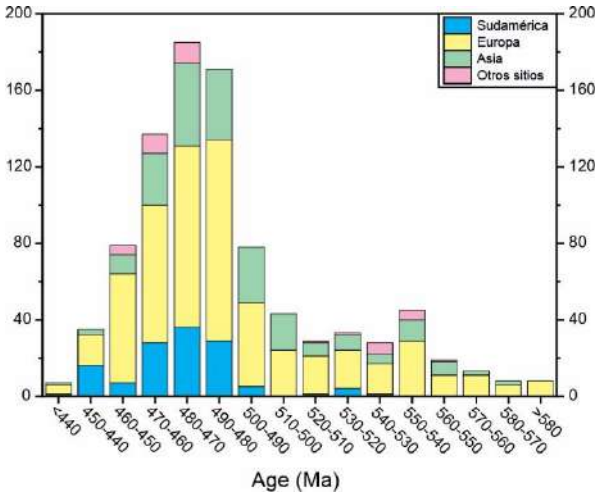


FIGURA 3. *Histograma de edades de las rocas revisadas en este estudio. Datos geocronológicos recopilados por García-Arias et al. (en revisión). Nótese los dos picos de edades, centrados hacia 550-540 Ma y 480-470 Ma.*

petrográfica y geoquímica se deduce que el magmatismo se originó a partir de rocas fuentes de mineralogía y composición química parecidas, las cuales se fundieron en similares condiciones P-T y que los magmas generados desarrollaron una evolución magmática similar. La composición silícea, peraluminosa y potásica, así como la signatura isotópica altamente radiogénica de Sr y poco radiogénica de Nd implican una fuente cortical (la tendencia de las rocas en el diagrama B-A apunta hacia pelitas y grauvacas, Fig. 2A). El origen de los sedimentos de esta fuente cortical podría ser una combinación del basamento y las rocas desarrolladas durante los orógenos pan-Africanos y tipo andino que rodeaban Gondwana durante el Ediacárico y el Paleozoico Temprano (ver referencias en García-Arias et al., en revisión). La similitud entre el patrón multielemental de las rocas estudiadas aquí con la composición de la corteza continental superior (Fig. 2B), combinado con la baja relación Sr/Y (Fig. 2C), indica que este patrón típico de arco continental es heredado: si fuera primigenio, la relación Sr/Y debería mostrar valores mucho más elevados. En particular, la baja relación Sr/Y así como el patrón plano de los HREE apuntan a condiciones de baja presión de fusión de la roca fuente, lo que combinado con la tendencia a composiciones de granitos tipo A según el diagrama de Whalen et al. (1987) (Fig. 2D), implica un contexto de extensión.

Por tanto, y teniendo en cuenta el margen tipo andino de Gondwana, se deduce que el borde de Gondwana sufrió extensión continental en la región de retroarco durante los picos de edades del magmatismo (Fig. 3), de acuerdo con las conclusiones de numerosos autores que estudiaron este magmatismo (referencias en García-Arias et al., en revisión). Esta extensión llevó a la apertura del Océano Reico en el sector América Central – NE Norteamérica – Europa – Turquía y el Océano Proto-Tethys en el sector tibetano. Al W del margen sudamericano se encontraba el Océano Iapetus, desarrollado durante 540-530 Ma (Casquet et al, 2012). El magmatismo félsico y peraluminoso revisado aquí sería una consecuencia de la fusión parcial de rocas corticales producida por el adelgazamiento de la región de retroarco en un escenario de subducción. La causa de este adelgazamiento puede ser variable, desde una transferencia de esfuerzos tectónicos del interior al margen de Gondwana tras el final de la acreción de varios continentes (final de las orogenias pan-Africanas y Cadómica) hasta la llegada de varias plumas mantélicas (García-Arias et al., en revisión).

Las similitudes y extensión del magmatismo revisado aquí implican fuertemente que los distintos sectores asociados a la apertura de varios océanos podrían formar varios LIPs silíceos, uno por cada región asociada a la apertura de un océano.

REFERENCIAS

Chiaradia, M. (2015): Crustal thickness control on Sr/Y signatures of recent arc magmas: an Earth scale perspective. *Scientific Reports*, 5: 8115.

Cocks, L.R. y Torsvik, T.H. (2021): Ordovician palaeogeography and climate change *Gondwana Research*, 100: 53–72.

Debon, F. y Le Fort, P. (1983): A chemical–mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 73: 135–149.

García-Arias, M., Morales Cámera, M., Dahlquist, J.A., Gao, P., Couzinié, S. y Díez-Montes, A. The tectonic significance of peri-Gondwanan Late Neoproterozoic-Early Paleozoic peraluminous magmatism. Earth-Science Reviews, en revisión.

Pearce, J.A. (1983): Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. En: *Continental basalts and mantle xenoliths* (C.J. Hawkesworth y M.J. Norry, eds.) Shiva, Nantwich. 230–249.

Rudnick, R.L. y Gao, S. (2003): Composition of the continental crust. En: *Treatise on Geochemistry* (A.M. Davies, H.D. Holland y K.K. Turekian, eds.). Elsevier, Pergamon, vol. 3, pp. 1–64.

Sun, S.S. y McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. En: *Magmatism in the Ocean Basins* (A.D. Saunders y M.J. Norry, eds.). Geological Society of London, London 42. pp. 313–345.

Villaseca, C., Barbero, L. y Herreros, V. (1998): A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 89: 113–119.

Whalen, J.B., Currie, K.L. y Chappell, B.W. (1987): A-type granites: geochemical characteristics and discrimination. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 420–436.

Metamorfismo de rocas máficas metasomáticas (granulitas de alta presión de Cabo Ortegal, NO Iberia).

Metamorphism of metasomatic mafic rocks (Cabo Ortegal high-pressure granulites, NW Iberia).

A. Garcia-Casco[1,2], I. Novo-Fernández[1], N. Pujol-Solá[1], J.A. Proenza[3], R. Arenas[4]

1- Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. agcasco@ugr.es, inovo@ugr.es, npujolsola@ugr.es
2- Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), 18100 Armilla, Granada, Spain
3- Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain, japroenza@ub.edu
4- Dpto. de Mineralogía y Petrología and Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. rarenas@ucm.es

Palabras clave: Metasomatism, metamorphism, Variscan subduction, granulite, Cabo Ortegal.

Resumen

En el Complejo de Cabo Ortegal, noroeste de Iberia, las granulitas de alta presión de la Formación Bacariza (protolitos máficos cámbricos, ca. 500 Ma), formadas durante la subducción Varisca (ca. 390 Ma), contienen comúnmente un bandeado litológico definido por variaciones en la abundancia de anfíbol y plagioclasa que reemplazan parcialmente a granate y clinopiroxeno de la asociación granulítica debido a la infiltración retrógrada heterogénea de fluidos acuosos. Bandas con abundancia contrastada en anfíbol y plagioclasa muestran, sin embargo, similar composición de roca total, lo que indica metasomatismo insignificante durante la infiltración del fluido acuoso. Por el contrario, algunas bandas ricas en Mg-calcita, feldespato-K, epidota, ±fengita y ±escapolita, con o sin plagioclasa y/o anfíbol, muestran cambios sustanciales en la composición de roca total, particularmente en términos de CaO y K_2O. Las relaciones de fases indican una evolución prograda y retrograda de protolitos ígneos básicos previamente metasomatizados. Por tanto, el metasomatismo localizado de la Formación Bacariza ocurrió con anterioridad al metamorfismo Varisco de alta presión y se debió a la infiltración de fluidos acuosos ricos en CO_2-Ca-K durante o con posterioridad al estadio de arco volcánico cámbrico.

Abstract

In the Cabo Ortegal Complex, NW Iberia, the subduction-related Variscan (ca. 390 Ma) high-pressure granulites of the Bacariza Formation (Cambrian protolith age, ca. 500 Ma) commonly show banding defined by varying mineral abundance of amphibole and plagioclase-quartz that overprint granulitic garnet and clinopyroxene, implying retrogression-related replacements triggered by the infiltration of H_2O-bearing fluids. Bands with contrasted amphibole-plagioclase abundance are similar in bulk-rock composition, however, denoting insignificant metasomatism during the post-peak infiltration of H_2O-fluid. On the contrary, some bands rich in carbonate (Mg-calcite), K-feldspar, epidote, ±phengite ±scapolite, ±plagioclase and ±amphibole denote substantial changes in bulk-rock composition, mostly in terms of CaO and K_2O. The phase relations indicate prograde and retrograde evolution of previously metasomatized basic igneous protoliths. Hence, the localized metasomatism of the Bacariza Formation occurred prior to Variscan high pressure metamorphism due to infiltration of aqueous CO_2-Ca-K rich fluids during or after the Cambrian volcanic-arc stage.

Geochemical comparison of circular plutonic complexes with extrusive rocks from Sal Island (Cape Verde).

Comparación geoquímica de los complejos plutónicos circulares con las rocas extrusivas de la isla de Sal (Cabo Verde).

M. García-Rodríguez[1], C. Villaseca [1], C. de Ignacio[1], D. Orejana[1], J. Mata[2] y R. Caldeira[3].

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C. José Antonio Novais, 12, 28040, Madrid, España. magarc40@ucm.es, granito@geo.ucm.es, cris@ucm.es, dorejana@ucm.es.
2 Dpto de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Instituto Dom Luiz, C. Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal. jmata@ciencias.ulisboa.pt.
3 Unidade de geologia e cartografia geologica, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), strada da Portela Bairro do Zambujal, 2610-999. Amadora, Portugal. rita.caldeira@lneg.pt.

Abstract: *Sal island is located in the northeast and is the oldest of the Cape Verde archipelago, with magmatic activity starting ~25 Ma ago. It presents a series of circular plutons that could represent the subvolcanic roots of the exposed extrusive rocks. In this work we compare the geochemical characteristics of melagabbro-gabbro of circular (~16.3 Ma) intrusions in the Old Eruptive Complex, with basaltic and nephelinitic lavas of equivalent age (~15.8 and 14.2 Ma, Torres et al., 2010). This comparison allows observing a geochemical overlap between basalts and gabbros, and the similarity between trends of part of the samples in Harker-type diagrams and REE patterns. However, this compositional overlap is incomplete, with considerable differences and absence of fractionated (intermediate) lava types related to these terms of the circular complexes. This partial but incomplete overlap of the compositional fields of the plutonic and volcanic trends argues against the possibility of a direct genetic relationship between the two.*

Key words: *Circular Complexes, Genetic Relationship, Sal Island, Cape Verde Archipelago.*

Resumen: Sal se localiza en el noreste de Cabo Verde y es la isla más antigua del archipiélago, con actividad magmática que comenzó hace 25 Ma. Presenta una serie de plutones circulares que podrían representar las raíces subvolcánicas de las rocas extrusivas expuestas. En este trabajo comparamos las características geoquímicas de melagabros-gabros de los complejos circulares (~16.3 Ma) intrusivos en el *Old Eruptive Complex*, con lavas basálticas y nefeliníticas de edad equivalente *(*~15.8 y 14.2 Ma, Torres et al., 2010). Esta comparativa permite observar un solapamiento geoquímico entre basaltos y gabros, y la similitud entre tendencias de parte de las muestras en diagramas tipo Harker y patrones de REE. Sin embargo, este solapamiento composicional es incompleto, existiendo diferencias considerables y una ausencia de lavas fraccionadas (intermedias) que se relacionen con estos términos de los complejos circulares. Esta superposición parcial pero incompleta de los campos composicionales de las rocas plutónicas y volcánicas complica la posibilidad de existencia de una relación genética directa entre ambos conjuntos magmáticos.

Palabras clave: Complejos Circulares, Relaciones genéticas, Isla de Sal, Archipiélago de Cabo Verde.

INTRODUCTION AND GEOLOGICAL SETTING

The relationship between volcanic and plutonic rocks can provide relevant information about the magmatic differentiation processes occurring in igneous systems. The comparison of mineral chemistry, whole-rock geochemistry and geochronological data allows the study of this relationship between intrusive and extrusive systems and helps to recognise genetic links. In this work we compare the petrological and geochemical characteristics of a set of plutonic samples with lavas of similar age from Sal Island in order to study a possible genetic relationship.

Sal is the northeasternmost island of the Cape Verde archipelago and forms part of the northern alignment along with São Nicolau, São Vicente and Santo Antão islands. It is the oldest island of the archipelago with magmatic activity that started about 25 Ma ago (Torres et al., 2010). It has been mainly studied for its volcanic formations, and there are few studies addressing the circular intrusive complexes that could represent the subvolcanic roots of the extrusive rocks exposed in the island (Torres et al., 2010).

These intrusions are located in the central part of Sal and yielded a K-Ar age of 16.3 ± 0.6 Ma (belonging to the *Old Eruptive Complex: OEC* in Fig. 1) (Torres et al., 2010). Roughly contemporary volcanic units are found in the south-central part of the island (*Main Eruptive Formation*, 15.8 - 14.2 Ma) and in the north (the slightly younger *Ponta do Altar-Baleia Complex (PAB)*, 11.2 - 8.7 Ma) (Holm et al., 2008; Torres et al., 2002) (Fig. 1). Due to their relatively coeval intrusion we compare the

petrological and geochemical features of the different lithologies that make up the plutons with the basaltic lavas belonging to the *Main Eruptive Formation* (MEF).

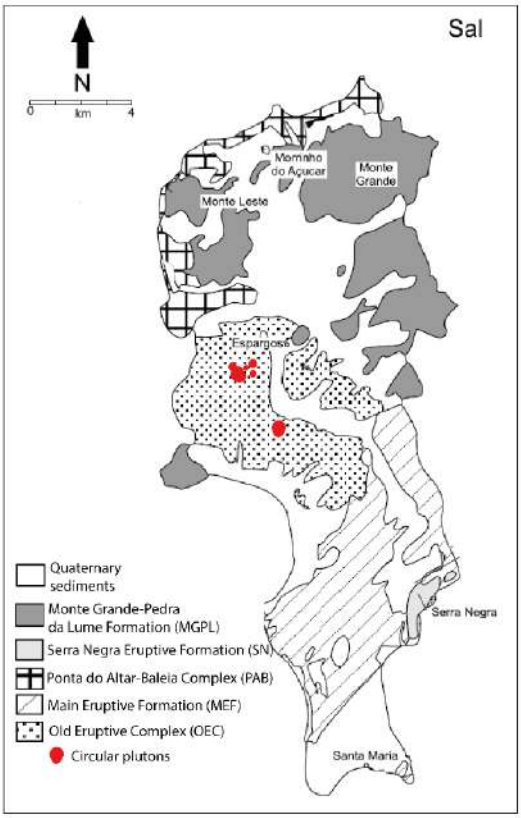


FIGURE 1. *Schematic geological map of Sal Island with the location of the circular complexes (Silva et al., 1990).*

PETROGRAPHY

The intrusions are plutons of circular morphology comprised by gabbro, melagabbro, monzogabbro and monzosyenite defining a normal zoning (i.e., mafic margin to felsic cores). The more felsic rocks usually appear in the highest topographic level of the pluton as a topping layer broadly defining a stratified intrusion. The larger complexes (1 and 2) are between 240 and 500 m in diameter, while the smaller one (complex 6) is between 60 and 130 m and is formed exclusively by the most differentiated terms (as are plutons 3, 4 and 5).

The classification of the samples has been carried out by modal and chemical characterization (Fig. 2). Thus, we have sampled a number of melagabbro, gabbro, monzogabbro (essexite) and monzosyenite from six circular complexes. Only two basalts from the *Main Eruptive Formation* have been sampled which added to previous data from this unit (Torres et al. 2010), to complete the comparison.

The most mafic types (mela-gabbros) are mostly cumulate rocks while gabbros *s.s.* are usually banded rocks with seriate inequigranular texture. Both have clinopyroxene, amphibole, plagioclase, phlogopite and magnetite, and gabbros also present olivine, nepheline, apatite and chromite (hosted by olivine).

Intermediate terms (monzogabbros and monzosyenites) also present a seriate inequigranular texture although with a lower proportion of mafic minerals and higher modal plagioclase, alkali feldspar and nepheline, plus apatite, spinel and titanite. In addition, some monzogabbros show accesory olivine and magnetite with ilmenite exsolutions.

Among the extrusive rocks, basaltic lavas are hypocrystalline to holocrystalline rocks, mainly porphyritic. They have olivine and clinopyroxene as phenocrysts, locally accompanied by amphibole. The groundmass consists mainly of plagioclase, clinopyroxene, Ti-magnetite, ilmenite and olivine, plus chromite inclusions (Torres et al., 2010). Locally, olivine nephelinite lavas with similar textural features to basalts appear in the MEF.

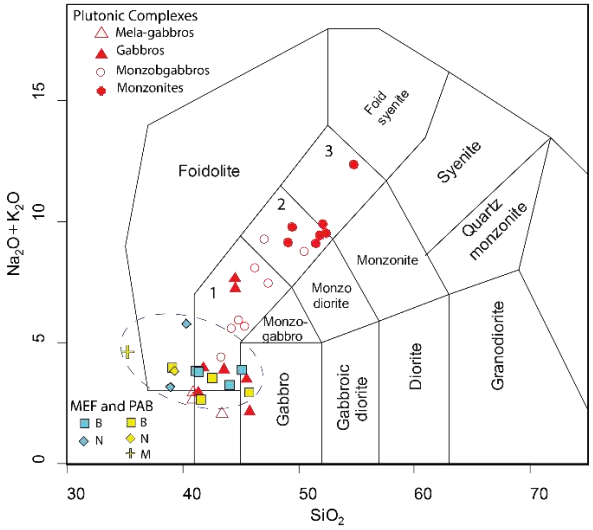


FIGURE 2. *Classification of studied samples in the TAS diagram for plutonic rocks of Middlemost (1994). Fields: 1: foid gabbro (and cumulate melagabbro); 2: foid monzogabbro; 3: foid monzosyenite. Note that modal terms (legend) does not always coincide with chemical TAS classification for some rocks (cumulates). MEF (blue) and PAB (yellow symbols) lavas composition field has been marked: B= Basalts; N= Nephelinites and M= Melilitites.*

MINERAL CHEMISTRY

Fo content of olivine in the OEC intrusive rocks shows a progressive decrease from the most mafic (gabbros, Fo_{81-61}) to the intermediate (monzogabbros, Fo_{49-39}) terms (Fig. 3). They show significant MnO contents (0.9-1.87 wt%) and a positive correlation with increasing FeO.

Clinopyroxene are classified as diopside, from gabbros to monzosyenites (Fig. 3) decreasing its Mg# (0.94 to 0.55). They show FeO_t and Na_2O contents that increase towards the intermediate terms (up to 14% and 1.2 % wt%, respectively), whereas Al_2O_3 and TiO_2 contents decrease.

Amphibole is mainly kaersutite-pargasite-Mg-hastingsite (Mg# 0.4 – 0.83), and the mica is biotite-phlogopite with Mg# that ranges from 0.54 to 0.96 (monzogabbros to gabbros).

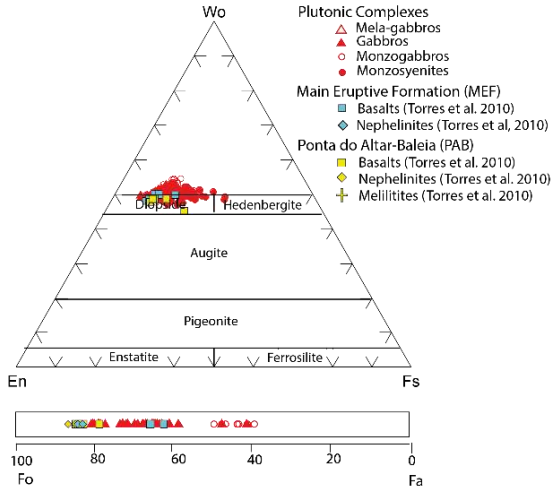


FIGURE 3. *Chemical composition of clinopyroxene (top) and olivine (bottom) of samples from Sal island.*

Plagioclase is bytownite-andesine showing direct zoning (An_{86-44} from core to rim) in gabbros, and labradorite-oligoclase in monzogabbros and monzosyenites (An_{66-16}). Alkali feldspar (anorthoclase to sanidine: Or_{20-98}) occurs only in monzogabbros and monzosyenites. Nepheline (Ne_{70-86}) becomes more potassic from gabbros to monzosyenites, and the main accessory phases are Ti-magnetite, chromite (as inclusions in olivine), titanite, apatite and ilmenite.

The basaltic lavas show a mineral chemical composition similar to gabbros of the circular complexes. Olivine ranges from low magnesian (Fo < 70) to high magnesian (Fo > 77) terms in nephelinites whereas it is Fo_{88-62} in basalts. Clinopyroxene are diopsides (Fig. 3) and displays zoning marked by a core to rim Ti enrichment (TiO_2 = 1.23 - 2.51 wt%) (with values in a similar range to that of gabbros). Plagioclase ranges from labradorite to bytownite (An_{73-57}) (Torres et al. 2010).

WHOLE ROCK GEOCHEMISTRY

Whole rock geochemistry (major and trace elements) of the different lithologies of the circular complexes has been compared with the MEF data (Torres et al., 2010, and unpublished data). This comparison allows to note the existence of a partial compositional overlap between basalts and gabbros (Fig. 4).

The volcanic rocks from the *Main Eruptive Formation* that plot close to the major and trace elements compositional field of the gabbros are mainly basalts (Figs. 4, 5). Nevertheless, the plutonic complexes show a progressive evolution from mafic to intermediate types, characterized by a linear decrease of MgO, TiO_2, FeO_t, CaO, Ni and Cr, and a gradual increase in SiO_2, Al_2O_3, K_2O, Na_2O, Rb, Ba, Zr and Nb, suggesting a significant crystal fractionation evolution. By contrast, nephelinites from the MEF unit are displaced from general gabbro-monzosyenite trends towards higher MgO, CaO and most trace element (Ba, La, Y, Zr, Sr and Ce) contents. They also display broadly constant values of K_2O, Na_2O, FeO_t and Rb similarly to data from Late Miocene lavas of the *Ponta do Altar-Baleia Complex* (Fig. 4).

Incompatible trace element patterns (primitive mantle-normalised) show a strong similitude between gabbros (specially circular complexes 1 and 2) and the MEF basalts. All of them show negative Th, U and Pb, as well as positive anomalies in Ba, Nb-Ta and Sr, typical features of OIB patterns (e.g., Akbary et al., 2023). Some samples show slightly positive Ti- anomalies due to the accumulation of ferromagnesian minerals and titanite (Fig. 5).

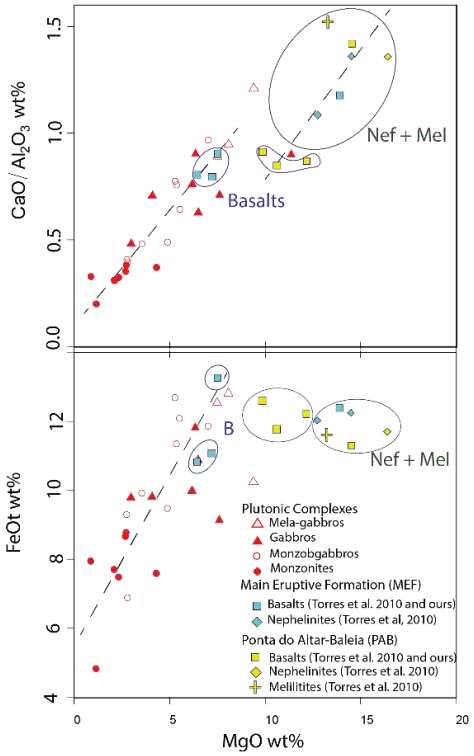


FIGURE 4. *Chemical composition (CaO/Al_2O_3 and FeO vs MgO) of the sampled lithologies and those obtained from Torres et al. (2010). B= Basalts; Nef+Mel= Nephelinite and melilitite.*

In REE (as in multitrace) diagrams the gabbros show similar trends to those of the MEF basalts. They show an enrichment of LREE with respect to HREE, typical of oceanic island basalts, indicative of their origin by low degree of partial melting (Mc. Donough and Sun., 1995) (Fig. 5).

Nephelinitic and melilitic rocks (not plotted in Fig. 5), on the other hand, show significant differences with respect to basalts and gabbros since they are characterized by marked negative anomalies of Rb, K and Hf (Torres et al. 2010). In addition, they present a progressive increase in REE fractionation with the degree of silica undersaturation, which is not shown neither by gabbros from circular complexes nor by basaltic lavas of the MEF (Torres et al., 2010).

DISCUSSION

The similarities in mineral chemistry (Fig. 3), along with similar whole-rock major and trace element

geochemical trends between the *Main Eruptive Formation* basalts and the gabbros of the circular plutons (Figs. 4 and 5), open the possibility of a genetic relationship between the two assemblages. Nevertheless, these are weak arguments as most of the OIB share similar chemical patterns (e.g., Akbari et al., 2023). In fact, most of the recent basaltic lavas from other northern Cape Verde islands show very similar multi-trace or REE element patterns to those here presented (e.g., lavas from Santo Antao, Holm et al., 2006; or basaltic lavas from Sao Nicolau, Millet et al., 2008). Nevertheless, geochemical trends of the MEF nephelinites indicate a greater affinity with the Late Miocene *Ponta do Altar-Baleia Complex* than with the plutonic rocks or associated MEF basaltic lavas.

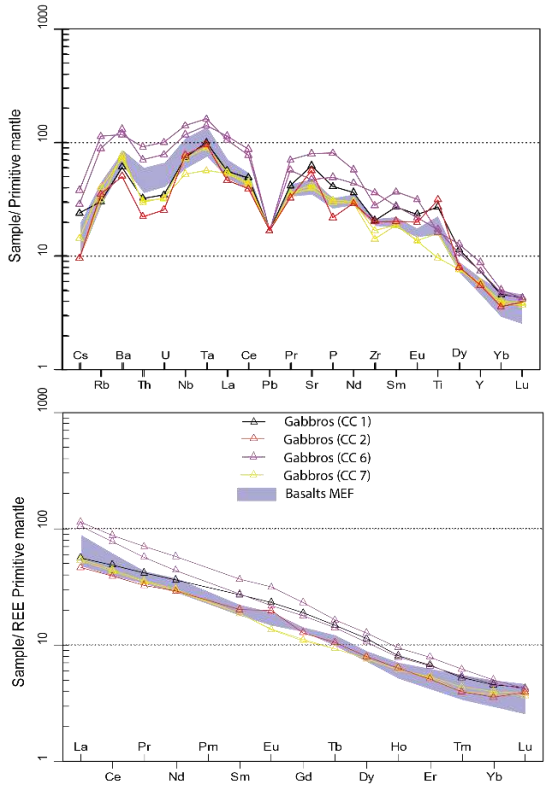


FIGURE 5. *Multitrace (top) and rare-earth element patterns (bottom) of gabbros from Sal island, normalized to primitive mantle values from McDonough and Sun (1995). The grey field are data from Torres et al. (2010) and unpublished data.*

Some other arguments make unlikely the existence of a genetic relationship between these circular plutons and the *Main Eruptive Formation.* First, the absence of fractionated (intermediate) lava types within the MEF in comparison to the abundance of these terms in upper layers of stratified circular complexes, potentially the most easily eruptible magmas in a volcanic process. Second, the geochronological data is not conclusive on the coeval formation of studied plutonic and volcanic events. More precise and abundant geochronological studies on the plutonic complexes are needed to determine the age range of their formation. Finally, the scarce published isotopic data from MEF basalts ($^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0.703350-703460, and $^{143}Nd/^{144}Nd$ = 0.513029) (Torres et al., 2010) do not overlap our preliminary data set on Sr-Nd isotope composition of gabbros from circular complexes (Villaseca et al., 2024 in litt.) and this should also be revised in the future.

ACKNOWLEDGMENTS

We are grateful to Alfredo Fernández Larios for EMP analysis and R. Casillas, A. García-Casco and I. Novo for their helpfull review. This study was funded by project PID2020-115980 GB-100 of the Spanish Ministry of Science and Innovation and to Banco Santander-UCM predoctoral grant (MGR).

REFERENCES

Akbari, M., Ghrobani, M.R., Cousen, B.L., Graham, I.T. (2023): A robust dischrimination scheme for ocean island basalts based on Ce/Rb, Tb/La, and Ba/Nb ratios. *Chemical Geology*, 628: 121486.

Holm, P.M., Wilson, J.R., Christensen, B.P., Hansen, L., Hansen, S.L:, Hein, K.M., Mortensen, A.K., Pedersen, R., Plesner, S., Runge, M.K. (2006): Sampling the Cape Verde mantle plume: Evolution of melt compositions on Santo Antao, Cape Verde islands. *Journal of Petrology*, 47: 145-189.

Holm, P. M., Grandvuinet, T., Friis, J., Wilson, J. R., Barker, A.K. and Plesner, S. (2008): An ^{40}Ar-$_{39}Ar$ study of the Cape Verde hot spot: Temporal evolution in a semistationary plate environment. *Journal of geophysical research*, 113: B08201.

McDonough, W.F. and Sun, S.S. (1995): The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253.

Middlemost, E. A. K. (1994): Naming materials in the magma/igneous rocksystem. *Earth Sciences Review*, 37: 215-224.

Millet, M-A., Doucelance, R., Schiano, P., David, K., Bosq, C. (2008): Mantle plume heterogeneity versus shallow-level interactions: A case study, the Sao Nicolau Island, Cape verde archipelago. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176: 265-276.

Silva, L. C., Serralheiro, A., Macedo, J. R., Gomes, M. Mota, A., Torres, P.C. (1990): *Carta geológica de Cabo Verde, Ihla do Sal*, folios 1 and 2, scale 1/25000, Inst. Invest. Cient. Trop./Inst. Coop. Econ., Lisbon.

Torres, P., Silva, L.C., Serralherio, A., Tassinari, C. Munhá, J. (2002): Enquadramento geocronológico pelo método K/Ar das principais sequências vulcano-estratrigráficas da Ilha do Sal- Cabo Verde. Garcia de *Orta Ser. Geol.* , 18 (1-2): 9- 13.

Torres, P., Silva, L.C., Munhá, J., Caldeira, R., Mata, J., Tassinari, C. (2010): Petrology and geochemistry of lavas from Sal Island: Implications for the variability of the Cape Verde magmatism. *Comunicaçoes Geológicas*, 97: 35-62.

Villaseca, C., Orejana, D., Huertas, M.J., Ancochea, E., de Ignacio, C., García-Rodríguez, M., Moreno, J.A. (2024, in litt.). Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of magmatism from the Sal-Boavista-Maio ridge (Cape Verde archipelago): temporal evolution of its mantle sources. Geotemas XII SGE National Congress.

Dataciones U-Pb SHRIMP sobre zircones de los granitoides paleozoicos de la Meseta Marroquí

Zircon U-Pb SHRIMP of the Paleozoic Granitoids of the Moroccan Mesetas

A. Jabaloy-Sánchez[1], C. Accotto[2], L. González-Menéndez[3], D. Martínez Poyatos[1], A. Azor[1], A. Azdimous4[d], H. El Haïbi[5], A. Tahiri[6], H. El Hadi[7] y F. González Lodeiro[1]

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, Spain, jabaloy@ugr.es, djmp@ugr.es, azor@ugr.es, lodeiro@ugr.es
2 Department of Geology and Geological Engineering, Université Laval, Québec, Canada, cristina.accotto.1@ulaval.ca
3 CSIC-Instituto Geológico y Minero de España; Unidad territorial de León, León, Spain, l.gonzalez@igme.es
4 Faculté Pluridisciplinaire de Nador et Laboratoire des Géosciences Appliquées, Faculté des Sciences, Université Mohammed I, Oujda, Morocco, azdi61@yahoo.fr
5 Dynamics of the Lithosphere and Genesis of Resources Laboratory (DLGR), Department of Geology, Faculty of Sciences-Semlalia, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco, elhaibi.hind@gmail.com
6 Laboratory of Geo-biodiversity and Natural Patrimony (GEOBIO), Scientific Institut; Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry Research Center (GEOPAC), Mohammed V University in Rabat, Morocco, abdelfatahtahiri@gmail.com
7 Laboratory of Geodynamics of Ancient Belts, Faculty of Science Ben M'Sik, Hassan II, University of Casablanca, Morocco, elhadihas@gmail.com

Palabras clave: geocronología, granitos, Meseta Marroquí, Paleozoico superior.

Resumen

Hemos analizado y datado mediante el método de U-Pb SHRIMP en circones diecinueve de los cuerpos de granitoides variscos de la Meseta Marroquí. Las edades $^{238}U/^{206}Pb$ determinadas se agrupan en: 1) Qz-monzonitas del Carbonífero Inferior, con edades que oscilan entre 325 y 336 Ma y que en algunos casos pueden estar asociadas a rocas máficas e intermedias (Qz-dioritas/tonalitas); 2) granitos del Carbonífero Superior (299-315 Ma), más escasos de las Qz-monzonitas, que pueden tener ± Amp ± Ttn ocasionalmente; 3) granitoides del Pérmico Inferior (el grupo más abundante) que incluyen granodioritas, Qz-monzonitas y granitos con edades entre los 283 y 296 Ma; 4) escasos leucogranitos del Pérmico Inferior-Medio con edades que varían entre 273 y 268 Ma. Las Qz-monzonitas del Carbonífero inferior pueden relacionarse con el "slab-breakoff" de la subducción del Océano Rheico durante el Viseense, lo que produjo un ascenso de la astenosfera, y una perturbación térmica. Los granitoides del Carbonífero superior-Pérmico inferior podrían estar vinculados a la fase extensional inducida por las importante rotaciones de eje vertical vinculadas a la formación del Arco Ibérico Varisco (Pastor-Galán, 2022, Fig. 8).

Abstract

We analysed and dated (U-Pb SHRIMP) zircon grains from nineteen granitoid bodies from the Moroccan Variscan Meseta. The $^{238}U/^{206}Pb$ ages we obtained grouped into: 1) Mississippian Qz-monzonites ranging from 325 to 336 Ma, and locally associated with mafic-intermediate igneous rocks (Qz-diorites/tonalites); 2) Pennsylvanian granites (299-315 Ma), scarcer than the previous ones, and occasionally containing ± Amp ± Ttn; 3) Lower Permian granitoids, which represent the most frequent group of rocks and include granodiorites, Qz-monzonites and granites with ages ranging between 283 and 296 Ma in age; 4) Lower-Middle Permian leucogranites, though quite scarce, with ages varying between 273 and 268 Ma. The Mississippian Qz-monzonites can be linked to the breakoff of the subducting slab of the Rheic Ocean at Visean times, producing an asthenosphere upwell and a thermal perturbation. The Pennsylvanian-Permian granitoids can be linked to the extensional phase induced by the significant vertical axis rotations linked to the formation of the Variscan Iberian arc (Pastor-Galán, 2022, its Fig. 8).

Referencias

Pastor-Galán, D. (2022). *Earth-Science Reviews* 226, 103918.

Presencia de circones detríticos africanos y amazónicos en la sucesión ediacárica del Orógeno Mauritano.

African and amazonian detrital zircon sources in the ediacaran rocks of the Mauritanian Belt.

R. Jiménez[1], D. Martínez Poyatos[1], A. Azor[1], F. González Lodeiro[1], C. Accotto[1], M. Salem Sabar[2] y A. Lekouyrie[2].

1 Dpto de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Campus Fuentenueva, Universidad de Granada, 18002 Granada. robertojb@ugr.es, djmp@ugr.es, azor@ugr.es, lodeiro@ugr.es, accotto@ugr.es.
2 Dpto de Geología, Facultad de Ciencias y Técnicas, Universidad de Nouakchott Al-Aasriya, BP 5026 Nouakchott, 1306 Mauritania. sabarms3@gmail.com, ahmedlekourie@gmail.com.

Palabras clave: Cinturón Mauritano, geocronología, circones detríticos, Ediacárico, Amazonia.

Resumen

Vestigios de un cinturón orogénico del Paleozoico superior afloran a lo largo de la región costera del noroeste de África (Mauritánides). En el sector de Akjoujt, el cinturón contiene una sucesión de rocas metasedimentarias siliciclásticas, atribuida al Neoproterozoico. La datación U/Pb de circones detríticos de nueve muestras de cuarcita de esta sucesión indican edades máximas de sedimentación ediacáricas (615-565 Ma). Las poblaciones principales de edades obtenidas permiten identificar dos grupos de muestras con firmas distintas. El Grupo 1 presenta picos de 2170, 2026, 999, 753 y 614 Ma, con ausencia notable de edades del Mesoproterozoico y Paleoproterozoico tardío (1.8-1.1 Ga). El Grupo 2 muestra picos de 2948, 1907, 1458, 1328, 1280, 1031 y 616 Ma, con predominio de edades del Mesoproterozoico y Paleoproterozoico tardío (2.0-1.0 Ga). La distribución de edades del grupo 2 indica contribuciones de fuentes desconocidas en el noroeste de África, pero presentes en el este de Laurentia, Baltica y Amazonia. Las reconstrucciones paleogeográficas disponibles para el período Ediacárico sugieren que Amazonia estaría vinculada a Gondwana y ubicada cerca de África occidental, mientras que Laurentia y Baltica habrían estado separadas de Gondwana por dominios oceánicos. En consecuencia, la fuente de sedimento más plausible para las muestras del Grupo 2 sería Amazonia. La coexistencia de firmas de circones detríticos del Grupo 1 y 2 en los Mauritanides sugiere un depocentro ediacárico alimentado por dos cratones diferentes o una historia tectónica compleja que yuxtapuso terrenos paleogeográficos distintos.

Abstract

Remnants of a late Paleozoic Mauritanian Orogenic Belt emerge along the coastal region of northwest Africa. Within the Akjoujt sector, the belt is composed of a sequence of siliciclastic metasedimentary rocks, loosely ascribed to the Neoproterozoic era. The U/Pb dating of detrital zircons was conducted on nine quartzite quartzite samples from this sequence reveals Ediacaran maximum depositional ages (615-565 Ma). Two groups of samples displaying distinctive inherited zircon grain populations are recognized. Group 1 displays main zircon age peaks at c. 2170, 2026, 999, 753, and 614 Ma, with a noticeable absence of dates from the Mesoproterozoic and late Paleoproterozoic eras (1.8-1.1 Ga). Meanwhile, Group 2 exhibits main peaks at c. 2948, 1907, 1458, 1328, 1280, 1031, and 616 Ma, predominantly featuring Mesoproterozoic and late Paleoproterozoic ages (2.0-1.0 Ga). The ages distribution of Group 2 indicates contributions from unknown sources in northwest Africa but present in eastern Laurentia, Baltica, and Amazonia paleocontinents. In line with available paleogeographic reconstructions for the Ediacaran era, Amazonia is suggested to had been joined to Gondwana, and positioned near West Africa. In contrast, Laurentia and Baltica would have been distant from Gondwana by intervening oceanic domains. Consequently, the most likely primary source of sediment for Group 2 samples is Amazonia. The occurrence of detrital zircon signatures from both Group 1 and Group 2 in the studied sequence of the Mauritanides implies the existence of an Ediacaran depocenter fed by two very distinct cratons, or a convoluted tectonic history that brought together diverse paleogeographic domains.

La sucesión volcano-sedimentaria ediacarana del inlier de Ougnat Oriental (Anti-Atlas Oriental, Marruecos): análisis de facies, geocronología e implicaciones geodinámicas

The Ediacaran volcano-sedimentary succession in the Eastern Ougnat inlier (Eastern Anti-Atlas, Morocco): facies analysis, geochronology and geodynamic implications

B. Karaoui[1], Ch. Breitkreuz[2], Z. Yajioui[1], A. Karaoui[2,3], A. Mahmoudi[2], A. Zanetti[4], M. Bonazzi[4]

1 Laboratory of Applied Geology, Faculty of Sciences and Techniques-Errachidia, Moulay Ismail University of Meknes, Morocco. b.karaoui@umi.ac.ma; yajioui91@gmail.com
2 Faculty of Sciences, Moulay Ismail University of Meknes, Morocco. geo_mahmoudi@yahoo.fr;
3 Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Bergakademie, Freiberg, Germany. christoph.breitkreuz@geo.tu-freiberg.de
4 Institute of Geosciences and Earth Resources, National Research Council (C.N.R), 27100, Pavia, Italy. zanetti@crystal.unipv.it; mattia.bonazzi@crystal.unipv.it

Palabras clave: Anti-Atlas Oriental, vulcanología física, circón U-Pb, terrane Peri-Gondwana.

Resumen

El inlier de Ougnat, en el Anti-Atlas marroquí, está formado por formaciones precámbricas. En su parte oriental, además de una intrusión granodiorítica, existe una sucesión volcano-sedimentaria de unos 400 m de espesor que incluye una variedad de ignimbritas litificadas y no litificadas, lavas coherentes y sedimentos fluviales, que se agrupan en cinco asociaciones de litofacies correspondientes a diferentes medios sedimentarios. La sucesión volcano-sedimentaria del inlier de Ougnat Oriental representa una evolución en cinco etapas en un ambiente subaéreo. Presentamos la datación en U-Pb de circones en cuatro ignimbritas riolíticas con edades entre 581 ± 20 Ma y 538 ± 20 Ma. También hemos datado la granodiorita con una edad de 574 ± 12 Ma. Los eventos ígneos descritos tuvieron lugar durante la sedimentación ediacárica del "Supergrupo de Ouarzazate", en el Anti-Atlas, así como en el Alto Atlas y el dominio de la Meseta en el norte de Marruecos y sus exponentes análogos de la orogenia Cadomiense.

Key words: Eastern Anti-Atlas, Physical volcanology, U–Pb zircon, Peri-Gondwana terrane.

Abstract

The Ougnat inlier in the Moroccan Anti-Atlas consists of thick Precambrian formations. In addition to granodiorite intrusion, it displays in its Eastern part a volcano-sedimentary succession of about 400 m thickness. It includes a variety of welded and non-welded ignimbrites, coherent lava, and fluvial sediments, which are grouped into five lithofacies associations corresponding to different depositional environments. The volcano-sedimentary succession of the Eastern Ougnat inlier represents an evolution in five stages in a subaerial environment. U–Pb zircon dating on four rhyolitic ignimbrites range in ages from 581 ± 20 Ma to 538 ± 20 Ma. Furthermore, the granodiorite yielded an age of 574 ± 12Ma. This evolution took place in the north Peri-Gondwana, during the Ediacaran deposition of the “Ouarzazate Supergroup” in the Anti-Atlas, as well as in the High Atlas and the Meseta domains in northern Morocco and its analogous exponents of the Cadomian orogeny.

CatVolc: Nueva base de datos sobre geoquímica y geocronología de los materiales volcánicos de la Zona Volcánica Catalana (España).

CatVolc: A new database of geochemical and geochronological data of volcanic-related materials from the Catalan Volcanic Zone (Spain).

M. Miranda-Muruzábal[1], A. Geyer[2], M. Aulinas[1,3], H. Albert[1,3], M. Vilà[4], F. Michero[4], X. Bolós[2], D. Pedrazzi[2], G. Gisbert[1], L. Planagumà[5]

1 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona, Marti Franquès s/n, 08028 Barcelona. mmirandamuruzabal@gmail.com, meritxellaulinas@ub.edu, halbert@ub.edu, ggisbertp@ub.edu
2 Geosciences Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona, Spain. ageyer@geo3bcn.csic.es, xbolos@geo3bcn.csic.es, dpedrazzi@geo3bcn.csic.es
3 Geomodels Research Institute. Universitat de Barcelona, Martí Franquès s/n, 08028 Barcelona.
4 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc s/n, 08038 Barcelona, Spain. Miquel.Vila@icgc.cat, Fus.Micheo@icgc.cat
5 Tosca, Environment Services, 17800, Olot, Spain. llplanaguma@gmail.com

Palabras clave: Campo Volcánico de la Garrotxa, Vulcanismo monogenético, Rift Cenozoico Europeo, Datación radiométrica y de termoluminiscencia, Revisión geoquímica.

Resumen

La Zona Volcánica Catalana (ZVC) (NE de España) es una de las numerosas manifestaciones de volcanismo alcalino intraplaca que han tenido lugar en Europa occidental y central desde el Mioceno hasta la actualidad. La actividad volcánica en la ZVC se inició en el Empordà (ca. > 12 - 8 Ma), luego se trasladó a La Selva (7.9 - 1.7 Ma) y finalmente migró al Campo Volcánico de La Garrotxa (CVG) (< 0.7 - 0.01Ma). A pesar del interés científico en la ZVC desde el siglo XIX, la evolución espacio-temporal de su sistema magmático o la cronología del volcanismo no se han estudiado aún en profundidad. Para abordar estas cuestiones, se requieren datos de geoquímica y geocronología, los cuales están dispersos y no han sido analizados conjuntamente. La base de datos CatVolc (**Cat**alan **Volc**anism) recopila los datos disponibles de geoquímica y geocronología de materiales volcánicos de la ZVC. La versión actual de la base de datos contiene análisis de geoquímica de 296 juveniles y 109 xenolitos, y dataciones de 57 rocas magmáticas, entre otros. El análisis preliminar de los datos recopilados destaca la necesidad de adquirir nuevos datos de geocronología, especialmente en el CVG, y ampliar la información geoquímica disponible en ciertos volcanes del CVG, así como en las otras dos zonas. Esta investigación es parte del proyecto NEOVOLC (PID2022-139047NA-I00) financiado por el MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Abstract

The Catalan Volcanic Zone (CVZ) (NE Spain) is one of the many manifestations of intraplate alkaline volcanism occurring in western and central Europe from the Miocene to the present. Volcanic activity in the CVZ started in the L'Empordà area (ca. > 12 - 8 Ma), extended to La Selva (7.9 - 1.7 Ma), and finally migrated to the Garrotxa Volcanic Field (GVF) (< 0.7 - 0.01Ma). Despite the scientific interest in the CVZ since the 19th century, the spatial and temporal evolution of the CVZ's plumbing system or the chronology of the volcanism, remain poorly understood. Addressing these questions requires geochemical and geochronological data, which are scattered and have never been analysed together. The CatVolc (**Cat**alan **Volc**anism) database compiles available geochemical and geochronological data of volcanic-related materials of the CVZ. The current version contains geochemical analyses from 296 juvenile magmatic rocks and 109 xenoliths, and radiometric/thermoluminescence dating data from 57 magmatic rocks, among others. The preliminary analysis of the compiled data underscores the necessity for additional geochronological measurements, especially within the GVF and highlights the need to broaden the available geochemical data in some volcanoes of the GVF and in the other two zones. This research is part of NEOVOLC (PID2022-139047NA-I00) project funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

The Ediacaran margin of Laurentia, the Clymene Ocean and the related sedimentary basins. A study case from the Sierra de Fiambalá (Argentina)

El margen ediacarense de Laurentia, el océano Clymene y las cuencas sedimentarias relacionadas. Un ejemplo de la Sierra de Fiambalá (Argentina)

C.D. Ramacciotti[1,2], M.A. Larrovere[3,4], C. Casquet[5], C.I. Lembo Wuest[1,2], M. Morales Cámera[1,2], P.H. Alasino[3,4], J.A. Murra[1,2], M.A. Basei[6], L. Herazo[7], E.G. Baldo[1,2]

1 Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA, Córdoba, Argentina. Corresponding author: carlos.ramacciotti@unc.edu.ar. ORCID iD 0000-0002-0317-0019.
2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), CICTERRA. Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA, Córdoba, Argentina. ivan.lembow@unc.edu.ar. matiasmmoralesc@unc.edu.ar. juan.murra@unc.edu.ar. Edgardo.baldo@unc.edu.ar.
3 Centro Regional de Investigaciones Científicas y Transferencia Tecnológica de La Rioja (Prov. de La Rioja–UNLaR–SEGEMAR–UNCa–CONICET), Entre Ríos y Mendoza s/n, 5301 Anillaco, Argentina. marianolarro@gmail.com. phalasino@gmail.com.
4 Instituto de Geología y Recursos Naturales, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, Universidad Nacional de La Rioja (INGeReN–CENIIT–UNLaR), Av. Gob. Vernet y Apóstol Felipe, 5300 La Rioja, Argentina.
5 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense (UCM), 28040 Madrid, Spain. casquet@ucm.es.
6 Instituto de Geociencias, Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, 05508-080 São Paulo, Brazil. baseimas@usp.br.
7 LA.TE. ANDES S.A. Las Moreras 510, Vaqueros [A4401XBA] Salta, Argentina. herazol@lateandes.com.

Abstract: The Sierra de Fiambalá in the Sierras Pampeanas – Puna transition is mainly formed by metamorphic and granitic rocks. U-Pb zircon dating carried out in siliciclastic protoliths of the Fiambalá Metasedimentary Succession (FMS) reveals that deposition occurred between ca. 950 and 525 Ma. Sediments were deposited in a mixed carbonate-siliciclastic platform that fringed eastern Laurentia (present coordinates) and had a Paleoproterozoic basement (the MARA block). The platform records sedimentation from at least ca. 630 Ma (Ediacaran). This basin, which we call here the Difunta Correa Basin, formed coeval with other basins along the margins of the Clymene Ocean (southern Brazil, Paraguay, Uruguay and Río de La Plata Craton). The main source areas of the Difunta Correa Basin were the Grenville and the Granite-Rhyolite provinces of Laurentia. Sedimentary protoliths of the FMS were overprinted by low- to high- metamorphism in the early Cambrian, after collision of MARA with the Kalahari Craton (Pampean Orogeny), following the closure of the Clymene Ocean.

Key words: U-Pb zircon geochronology, SW Gondwana, Clymene Ocean, Neoproterozoic basins.

Resumen: *La Sierra de Fiambalá, en la transición Sierras Pampeanas – Puna está compuesta principalmente por rocas metasedimentarias y graníticas. La geocronología U-Pb de circones de los protolitos siliciclásticos de la Sucesión Metasedimentaria Fiambalá (SMF) revela que la sedimentación tuvo lugar entre ca. 950 y 525 Ma. Los sedimentos se habrían depositado en una plataforma mixta carbonática-siliciclástica sobre el margen oriental de Laurentia (coordenadas actuales), sobre un basamento paleoproterozoico (bloque MARA). La plataforma registra sedimentación desde al menos los ca. 630 Ma. Esta cuenca, denominada aquí Difunta Correa, se formó a la vez que otras cuencas sedimentarias a lo largo de los márgenes de del Oceano Clymene (sur de Brasil, Paraguay, Uruguay y Cratón del Río de La Plata). Las principales áreas fuente de sedimentos de la Cuenca Difunta Correa fueron las provincias geológicas Grenville y Granite-Rhyolite de Laurentia. Los protolitos sedimentarios de la SMF fueron afectados por un metamorfismo de grado bajo a alto en el Cámbrico inferior, luego de la colisión entre MARA y el Cratón de Kalahari (Orogénesis Pampeana) que siguiera al cierre del Océano Clymene.*

Palabras clave: *Geocronología U-Pb en circón, Suroeste de Gondwana, Océano Clymene, Cuencas neoproterozoicas.*

INTRODUCTION

Ancestral South America consists of a collage of several cratons amalgamated between the late Neoproterozoic and the early Paleozoic (e.g., Cordani et al., 2003). This period involved the development of sedimentary basins, deformation and metamorphic events, as well as magmatism related to the break-up of the Rodinia supercontinent and the later assembly of SW Gondwana.

The Neoproterozoic Clymene Ocean (Trindade et al., 2006) formed between a large continental mass consisting of Laurentia, Amazonia and MARA (acronym of Maz, Arequipa, Rio Apa; Casquet et al. 2012) in the east (Neoproterozoic coordinates) and other Gondwana

blocks such as Kalahari and Rio de la Plata in the west. Several sedimentary basins formed along the margins of this ocean, which closed in the early Cambrian leading to the collisional Pampean Orogeny and bringing to an end the amalgamation of the SW Gondwana (Casquet et al., 2012, 2018; Tohver et al., 2010).

The Pampean orogen is well exposed in the Sierras Pampeanas of NW Argentina (Fig. 1), making this region a crucial area for the study of the Neoproterozoic to early Paleozoic evolution of the SW Gondwana margin. Of particular interest are the sedimentary basins that resulted from this complex geodynamic evolution, which underwent metamorphism and deformation. To asses this problem, U-Pb zircon geochronology constitutes a powerful tool to constraint the depositional age of the sediments, the source areas, and to evaluate different paleogeographic scenarios and the geodynamic evolution.

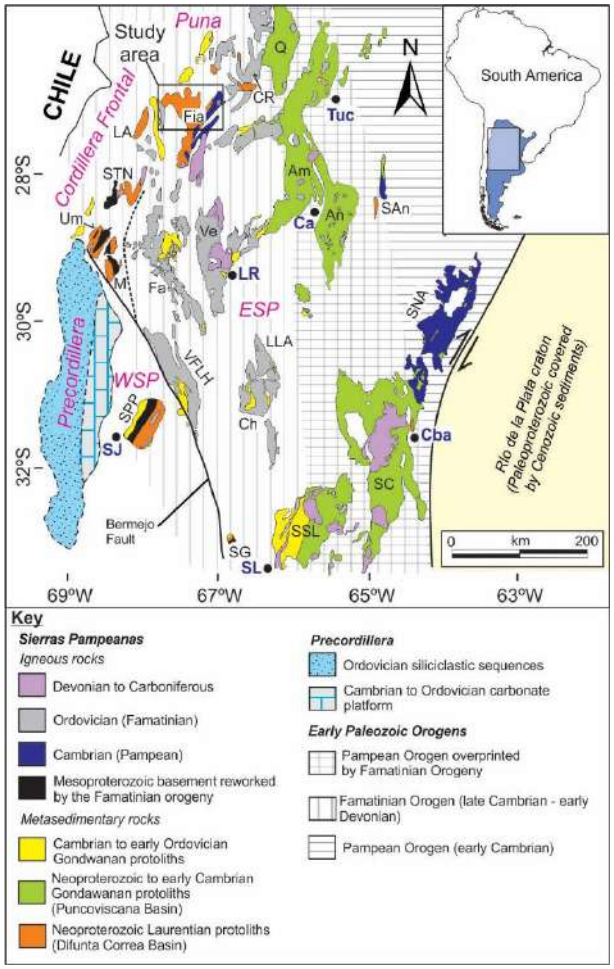


FIGURE 1. *Geological map of northwestern Argentina. ESP: Eastern Sierras Pampeanas, WSP: Western Sierras Pampeanas. The names of ranges and cities are detailed in Rapela et al. (2016).*

We report here evidence of a sedimentary basin related to the Clymene Ocean in the Sierra de Fiambalá (Fig. 1). This range consists mainly of the Fiambalá Metasedimentary Succession (FMS; *nov. nom*) and granitic bodies (Loconte Intrusive Complex; *nov. nom*) resulting from the Pampean Orogeny (Larrovere et al., 2021). The FMS includes variably mylonitized migmatites (Tatón Unit), low-grade metaconglomerates, metapsammites and phyllites (Laguna Helada Unit), and marbles (Totorillas Unit). We present here new U-Pb LA-ICP-MS zircon ages from the Tatón and Laguna Helada units and propose regional correlations.

U-Pb ZIRCON GEOCHRONOLOGY

Two mylonitic migmatites from the Tatón Unit and two low-grade rocks (one metaconglomerate and one metapsammite) from the Laguna Helada Unit were chosen for U-Pb zircon dating by LA-ICP-MS. Zircon grains range from 50 to 400 μm with variable shapes and internal texture denoted by CL images. All samples show a main group of ages between ca. 950 and 1100 Ma with a peak at 1020-1040 Ma. One secondary group occurs between ca. 1100 and 1400 Ma with few Paleoproterozoic-Neoarchean ages (Fig. 2). The youngest grains (three or more that overlap in age at 2 sigma) yielded ca. 950 Ma that corresponds to a minimum age of sedimentation. Moreover, one mylonitic migmatite shows detrital zircon grains with overgrowths with Th/U < 0.1 that yielded a Concordia age of 526 ± 2 Ma, which is considered the age of metamorphism.

DISCUSSION

The depositional age of the FMS must be between ca. 950 Ma (youngest detrital zircon grains) and ca. 525 Ma (metamorphic overgrowths). Remarkably, the youngest age is coincident with that of the Loconte Intrusive Complex (526 ± 3 Ma; Larrovere et al., 2021).

Comparison of detrital zircon age patterns along with Sr-isotope composition of marbles (e.g., Galindo et al., 2004) allow to correlate the Fiambalá metasedimentary rocks with successions located elsewhere in the Sierras Pampeanas, i.e., the Difunta Correa, Ancaján and Sierras de Córdoba metasedimentary successions (e.g., Ramacciotti et al., 2015; Rapela et al., 2016). Therefore, we interpret that these successions, now scattered throughout the Sierras Pampeanas, formed in a continuous basin that we name here the Difunta Correa Basin (Fig. 3). Sediments were deposited from at least 630 Ma (Ediacaran) to the early Cambrian, on a continental platform along the eastern margin (Neoproterozoic coordinates) of the Clymene Ocean (Fig. 4). The main source areas were the Grenville and Granite-Rhyolite provinces of Laurentia (e.g., Ramacciotti et al., 2015, Martin et al., 2020).

Other Neoproterozoic successions were deposited along the two conjugate paleo-margins of the Clymene Ocean. Some locations are shown in Fig. 3, and in a paleogeographic reconstruction at ca. 570 Ma, in Fig. 4. These successions are in southern Brazil, Paraguay, Uruguay and were involved in the orogenic belts (Paraguay and Araguaia belts) north of the Pampean belt, also as a result of the closure of the Clymene Ocean (e.g., Tohver et al., 2010). Some were deposited on the Río de la Plata Craton. Different cratonic regions on both sides of the Clymene Ocean constitute the main source of sediments. Those of southern Brazil and Paraguay (Paraguay Basin in Fig. 3) came from the Amazonia

Craton, whereas the Arroyo Soldado, Sierras Bayas and Rocha successions were supplied by the same Río de La Plata, and Kalahari Cratons and from the Brasiliano belts on the opposite margin of the Ocean (Fig. 4).

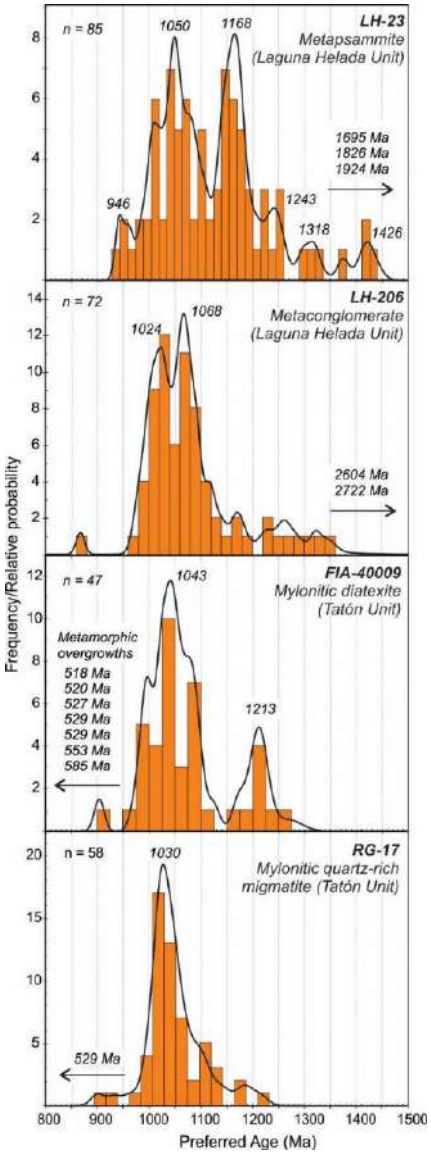


FIGURE 2. *Frequency/Relative probability plots of the analyzed samples.*

Moreover, the Puncoviscana Formation (NW Argentina) and some South African successions (e.g., Malmesbury Group) also formed along the western margin (Neoproterozoic coordinates; Fig. 4) of this ocean, partly coeval with the Difunta Correa Basin. However, the Puncoviscana-Malmesbury successions are mainly turbiditic and hosted the arc-type magmatism. Therefore, the tectonic setting of these sediments was an active margin along the southern Kalahari Craton (Frimmel et al., 2013; Casquet et al., 2018). This suggests that the western margin of the Clymene Ocean was segmented with active and passive sections, whereas the eastern margin remained passive all the time.

Closure of the Clymene Ocean led to the oblique collision of the MARA block with the Kalahari Craton producing the collisional Pampean Orogeny in Argentina (e.g., Casquet et al., 2012, 2018). The Difunta Correa Basin was thoroughly imbricated with the Puncoviscana - Malmesbury successions with a dismembered ophiolite in between that is a relic of the former Clymene Ocean (e.g., Escayola et al., 2007).

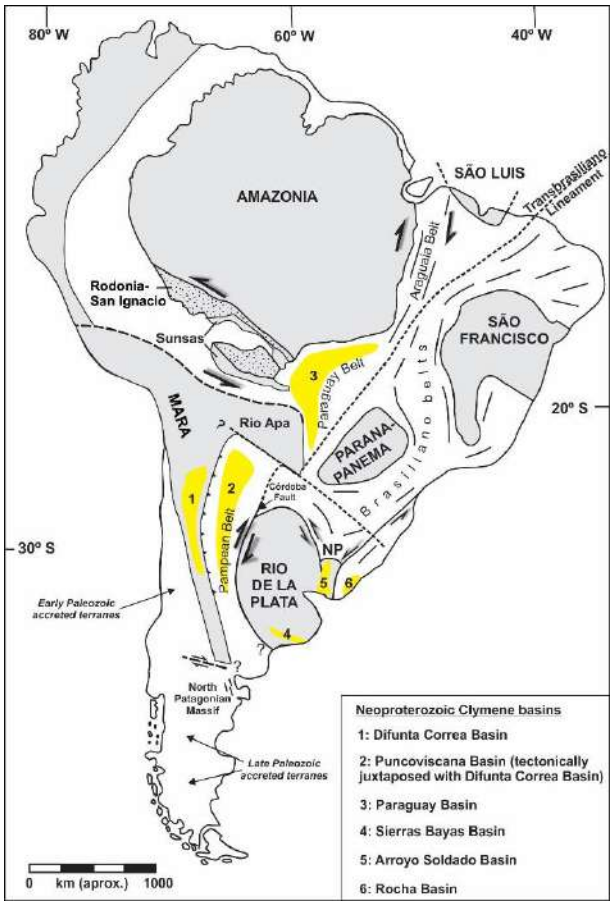


FIGURE 3. *South America cratons and Neoproterozoic Clymene basins modified from Casquet et al. (2012). NP: Nico Perez Terrane.*

CONCLUSIONS

The metamorphic rocks of the Sierra de Fiambalá comprise migmatites (Tatón Unit), low-grade metaconglomerates, metapsammites, metapelites and phyllites (Laguna Helada Unit), and marbles (Totorillas Unit). The protoliths were deposited between ca. 950 and 525 Ma, more probably after ca. 630 Ma, and the main source areas were the Grenville and Granite-Rhyolite provinces of Laurentia. This sedimentation occurred in a platform (the Difunta Correa Basin) along the margin of the Clymene Ocean. This basin is one of the several basins that formed along both conjugate paleo-margins of this ocean.

The Pampean orogeny of NW Argentina involved the imbrication of the Difunta Correa Basin and the Puncoviscana Formation after oblique collision of MARA block against the Kalahari Craton at ca. 530 Ma. During this event, the Fiambalá protoliths were subjected to low- and high-grade metamorphism and intruded by granitic magmas.

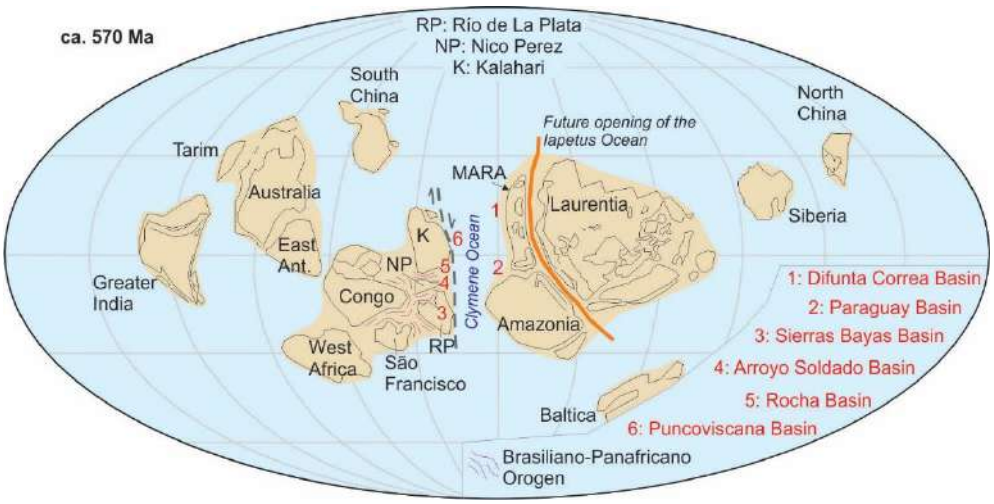


FIGURE 4. *Paleogeographic reconstruction at ca. 570 Ma modified from Li et al. (2008) showing location of Neoproterozoic (to early Cambrian) basins (numbered) that formed on both margins of the Clymene Ocean.*

ACKNOWLEDGEMENTS

Funding was provided by Argentine public grants CONICET PIBAA 2022-2023 28720210100782CO, PUE 2016-CONICET-CICTERRA, CONICET PIP 11220150100901CO, FONCYT PICT 2017–0619 and SECyT 2023–2027, and CGL 2016-76439-P of former Ministry of Economy MINECO (Spain).

REFERENCES

Casquet, C., Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Baldo, E.G., Galindo, C., Fanning, C.M., Dahlquist, J.A. and Saavedra, J. (2012): A history of Proterozoic terranes in southern South America: From Rodinia to Gondwana. *Geoscience Frontiers*, 3:137–145.

Casquet, C., Dahlquist, J.A., Verdecchia, S.O., Baldo, E.G., Galindo, C., Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Morales Cámera, M.M., Murra, J.A. and Fanning, M.C. (2018): Review of the Cambrian Pampean orogeny of Argentina: a displaced orogen formerly attached to the Saldania Belt of South Africa? *Earth-Science Reviews*, 177: 209–225.

Cordani, U.G., Brito-Neves, B.B., D and Agrella-Filho, M.S. (2003): From Rodinia to Gondwana: a review of the available evidence from South America. *Gondwana Research*, 6 (2): 275–284.

Escayola, M.P., Pimentel, M.M. and Armstrong, R. (2007): Neoproterozoic back arc basin: sensitive high-resolution ion microprobe U–Pb and Sm–Nd isotopic evidence from eastern Pampean ranges, Argentina. *Geology*, 35: 495–498.

Frimmel, H.E., Basei, M.A.S., Correa, V.X. and Mbangula, N. (2013): A new lithostratigraphic subdivision and geodynamic model for the Pan-African western Saldania Belt, South Africa. *Precambrian Research*, 231: 218-235.

Galindo, C., Casquet, C., Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Baldo, E.G. and Saavedra, J. (2004): Sr, C and O isotope geochemistry and stratigraphy of Precambrian and lower Paleozoic carbonate sequences from the Western Sierras Pampeanas of Argentina. Tectonic implications. *Precambrian Research*, 131: 55–71.

Martin, E.L., Collins, W.J., Spencer, C.J. (2020): Laurentian origin of the Cuyania suspect terrane, western Argentina, confirmed by Hf isotopes in zircon. *GSA Bulletin*, 132 (1-2): 273–290.

Larrovere, M.A., Casquet, C., Haciar, H., Baldo, E.G., Alasino, P.H. and Rapela, C.W. (2021) Extending the Pampean orogen in western Argentina: New evidence of Cambrian magmatism and metamorphism within the Ordovician Famatinian belt revealed by new SHRIMP U–Pb ages. *Journal of South American Earth Sciences*, 109 (103222). ISSN 0895-9811.

Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R.E., Fitzsi-mons, I.C.W., Fuck, R.A., Gladkochub, D.P., Jacobs, J., Karlstrom, K.E., Lu, S., Nat-apov, L.M., Pease, V., Pisarevsky, S.A., Thrane, K. and Vernikovsky, V. (2008): Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, 160: 179–210.

Ramacciotti, C.D., Baldo, E.G. and Casquet, C. (2015): U-Pb SHRIMP detrital zircon ages from the Neoproterozoic Difunta Correa Metasedimentary Sequence (Western Sierras Pampeanas, Argentina): Provenance and paleogeographic implications. *Precambrian Research*, 270: 39–49.

Rapela, C.W., Verdecchia, S.O., Casquet, C., Pankhurst, R.J., Baldo, E.G., Galindo, C., Murra, J.A., Dahlquist, J.A. and Fanning, C.M. (2016) Identifying Laurentian and SW Gondwana sources in the Neoproterozoic to early Paleozoic metasedimentary rocks of the Sierras Pampeanas: Paleogeographic and tectonic implications. *Gondwana Research*, 32: 193–212.

Tohver, E., Trindade, R.I.F., Solum, J.G., Hall, C.M., Riccomini, C. and Nogueira, A.C. (2010): Closing the Clymene ocean and bending a Brasiliano belt: evidence for the Cambrian formation of Gondwana, southeast Amazon craton. *Geology*, 38: 267–270.

Trindade, R., DÁgrella-Filho, M., Epof, I. and Brito Neves, B. (2006): Paleomagnetism of early Cambrian Itabaiana mafic dikes (NE Brazil) and the final assembly of Gondwana. *Earth and Planetary Science Letter*, 244 (1–2), 361–377.

Parental magma signatures recorded in hybrid zones

Signaturas de magma parental registradas en zonas híbridas

C. Rodriguez[1], J. Martí[2] y M. F. Pereira[3]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Avda de las Palmeras 4, 18100, Armilla Granada. carmen.ralmodovar@csic.es
2 Dep. of Geosciences, IDAEA-CSIC Institute of Environmental Assessment and Water Research Jordi Girona St., 18-26 08034 Barcelona. joanmartimolist@gmail.com
3 Departamento de Geociências, Instituto de Ciências da Terra, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Évora 7002-554, Portugal. mpereira@uevora.pt

Palabras clave: magma mixing, intermediate compositions, crustal magmatism, silicic batholiths, ultra-high liquidus.

Resumen

La mezcla de magmas ha sido propuesta como proceso que explica las composiciones intermedias de los sistemas magmáticos. La caolescencia de magmas de propiedades contrastantes en cámaras magmáticas compuestas es un hecho observado en los sistemas fósiles o plutones y también se deduce de secuencias de lava en productos volcánicos. Estas zonas híbridas, objetivo de este trabajo, pueden ser divididas en mono- y poli-composicionales, de acuerdo a las diferencias texturales y composicionales, respectivamente. Proponemos un mecanismo llamado magma splitting como responsable de la segregación de dos sistemas submagmáticos con propiedades contrastantes. El desencadenante de la separación de sistemas con diferencias texturales y composicionales es la ebullición secundaria que segrega un fundido saturado en agua (grano grueso; magma con bajo *liquidus*, LLM) de un residuo sólido (grano fino; magma con alto *liquidus*, HLM) por medio del efecto del filtro prensa (Langmuir, 1989). El escenario más favorable para la eficacia del magma splitting es el ambiente subvolcánico ya que la segunda ebullición se puede alcanzar repentinamente y las texturas quedarán preservadas por quenching. Las zonas híbridas son, por esto, usadas como una aproximación a los magmas parentales congelados en el nivel de emplazamiento. Estas zonas híbridas son ahora clave para determinar la composición parental que vincula HLM y LLM y para establecer un nuevo protocolo de estudio de estas suites magmáticas.

Abstract

Mixing of magmas has been argued as a process to account the intermediate composition of magmatic systems. The coalescence of magmas of contrasted compositions in composite magma chambers is fact observed in fossil magma chambers or plutons and is also deduced from lava sequences in volcanic successions. Nevertheless, it remains unclear if this process can produce magma with an intermediate composition. Hybrid zones, addressed in this study, can be divided into mono- and poly-compositional types according to textural and compositional differences, respectively. We propose magma splitting as mechanism able to segregate two submagmatic systems with so contrasting textures. The trigger for the compositional and textural splitting is the second boiling segregating a water-saturated melt (coarse-grained end member; low *liquidus* magma, LLM) from the solid residue (fine-grained end member; high *liquidus* magma, HLM) by means of gas-driven filter pressing (Langmuir, 1989). The most favorable scenario for the magma splitting effectiveness is the subvolcanic environment since the second boiling can be suddenly reached and the textures are preserved by quenching. Hybrid zones are used as a proxy of parental magmas quenched at the level of emplacement. The hybrid zones are now considered as key outcrops to determinate the parental composition linking the HLM and LLM end-members of the calc-alkaline magmas and to stablish an innovative protocol to study these magmatic suites.

Referencias

Langmuir, C.H. (1989). *Nature* 340, 199-205

Assessing the formation of Cordilleran batholiths: A study based on the geochronology of the Carboniferous Tabaquito batholith in the Frontal Cordillera (Argentina)

Explorando la formación de batolitos Cordilleranos: Un estudio basado en la geocronología del batolito Tabaquito del Carbonífero de la Cordillera Frontal (Argentina).

G. Santos da Cruz[1,2], J. A. Moreno[3,4], J. A. Dahlquist[1,2], M. M. Morales Cámera[1,2], M. A.S. Basei[5] and P. S. Zandomeni[2]

1 Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Vélez Sársfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina. gilmarasdacruz@outlook.com, juan.andres.dahlquist@unc.edu.ar, matiasmmoralesc@unc.edu.ar.
2 Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016CGA Córdoba, Argentina. priscilazandomeni@gmail.com.
3 Department of Earth Sciences - Faculty of Experimental Sciences, University of Huelva. 21071 Huelva. Spain.
4 Center for Research in Sustainable Chemistry (CIQSO), University of Huelva. 21071. Huelva. Spain. juanantonio.moreno@dct.uhu.es.
5 Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, do lago 562 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-080, Brazil. baseimas@usp.br.

Abstract: The Carboniferous Tabaquito batholith in the Frontal Cordillera of Argentina, stands out as a representative example of Carboniferous arc-related magmatism in the region. The study employed advanced techniques such as LA-MC-ICP-MS and SHRIMP, using recent and previous U-Pb data in zircon. The results reveal the presence of five major crystallization magmatic events in the Tabaquito batholith, with ages of 325 ± 2 Ma, 332 ± 2 Ma, 337 ± 2 Ma, 346 ± 1 Ma, and 362 ± 2 Ma. The event at 325 Ma is considered the best estimate for the crystallization age during the emplacement (i.e., zircon autocrysts). The other magmatic events (332 Ma, 337 Ma, 346 Ma, and 362 Ma) suggest the presence of zircon antecrysts, indicating a complex magmatic system that spanned an extensive period of approximately 30 million years, or 15 million years if the ages of 346 and 362 Ma are considered as xenocrysts from the reworking of early stages of the Carboniferous magmatic arc. Additionally, the study identifies inherited zircons with ages older than approximately 370 Ma, consistent with the detrital zircon pattern found in the country rock (hornfels).

***Key* words:** Cordilleran batholiths, Carboniferous arc magmatism, U-Pb ages, zircon antecrysts and autocrysts.

Resumen: *El batolito Tabaquito de la Cordillera Frontal de Argentina, se destaca como un ejemplo representativo del magmatismo Carbonífero de arco en la región. El estudio empleó técnicas avanzadas como LA-MC-ICP-MS y SHRIMP, utilizando datos recientes y previos. Los resultados revelan la existencia de cinco eventos magmáticos de cristalización para el batolito Tabaquito, con edades de 325 ± 2 Ma, 332 ± 2 Ma, 337 ± 2 Ma, 346 ± 1 Ma y 362 ± 2 Ma. Se considera que el evento de 325 Ma representa la mejor estimación para la edad de cristalización durante el emplazamiento (i.e., autocristales de circón). Los eventos restantes (332 Ma, 337 Ma, 346 Ma y 362 Ma) sugieren la presencia de antecristales de circón, indicando el desarrollo de un sistema magmático complejo que abarcó un extenso período de aproximadamente 30 millones de años, o 15 millones de años si se consideran las edades de 346 y 362 Ma como xenocristales provenientes del reciclado de los estadios iniciales del arco magmático Carbonífero. Además, el estudio identifica circones heredados con edades superiores a 370 Ma, en concordancia con el patrón de circones detríticos encontrado en la roca de caja (hornfels).*

Palabras clave: *Batolitos cordilleranos, magmatismo de arco Carbonífero, edades U-Pb, autocristales y antecristales de circón.*

INTRODUCTION

The Cordilleran batholiths, regarded as plutonic manifestations of continental arcs, offer invaluable insights into extensive silicic magmatic systems within subduction environments. Contrary to the traditional belief that the formation and emplacement of granitic magmas occur within one million years, recent geochronological studies indicate a more prolonged duration (e.g., Lim et al., 2023). The idea of a magmatic chamber is currently debated, with a growing focus on a model where an ephemeral magmatic chamber only covers the top of a larger and long-live magmatic system at depth, functioning as zircon incubators, yielding zircon antecrysts (e.g., Lim et al., 2023). In this work, we present a summary of our manuscript under review (Santos da Cruz et al., *under review*), providing a detailed geochronological analysis of the Tabaquito

batholith (Fig. 1), the most significant exposure of Carboniferous arc-related granitoids in the Frontal Cordillera of Argentina, aiming to comprehend the time of formation and emplacement of granitic rocks developed in an arc magmatic system.

GENERAL GEOLOGICAL CHARACTERISTICS

The Tabaquito batholith is a large outcrop (ca. 896 km^2) of granitic rocks formed in an Andean-type subduction setting. This batholith is localized in the western region of Argentina, Frontal Cordillera (Moreno et al., 2020; Dahlquist et al., 2021) and is mostly composed of medium-grained equigranular gray granodiorites (Pl + Qz + Afs + Bt + Opq ± Amp) intruded into low-grade Devonian metasedimentary rocks (Chinguillos Group). A distinctive feature is the presence of Carboniferous dikes swarms of mainly andesitic composition with a dominant E-W orientation. These dikes are crosscut by Permian rhyolitic dikes with a N-S orientation (Fig. 1).

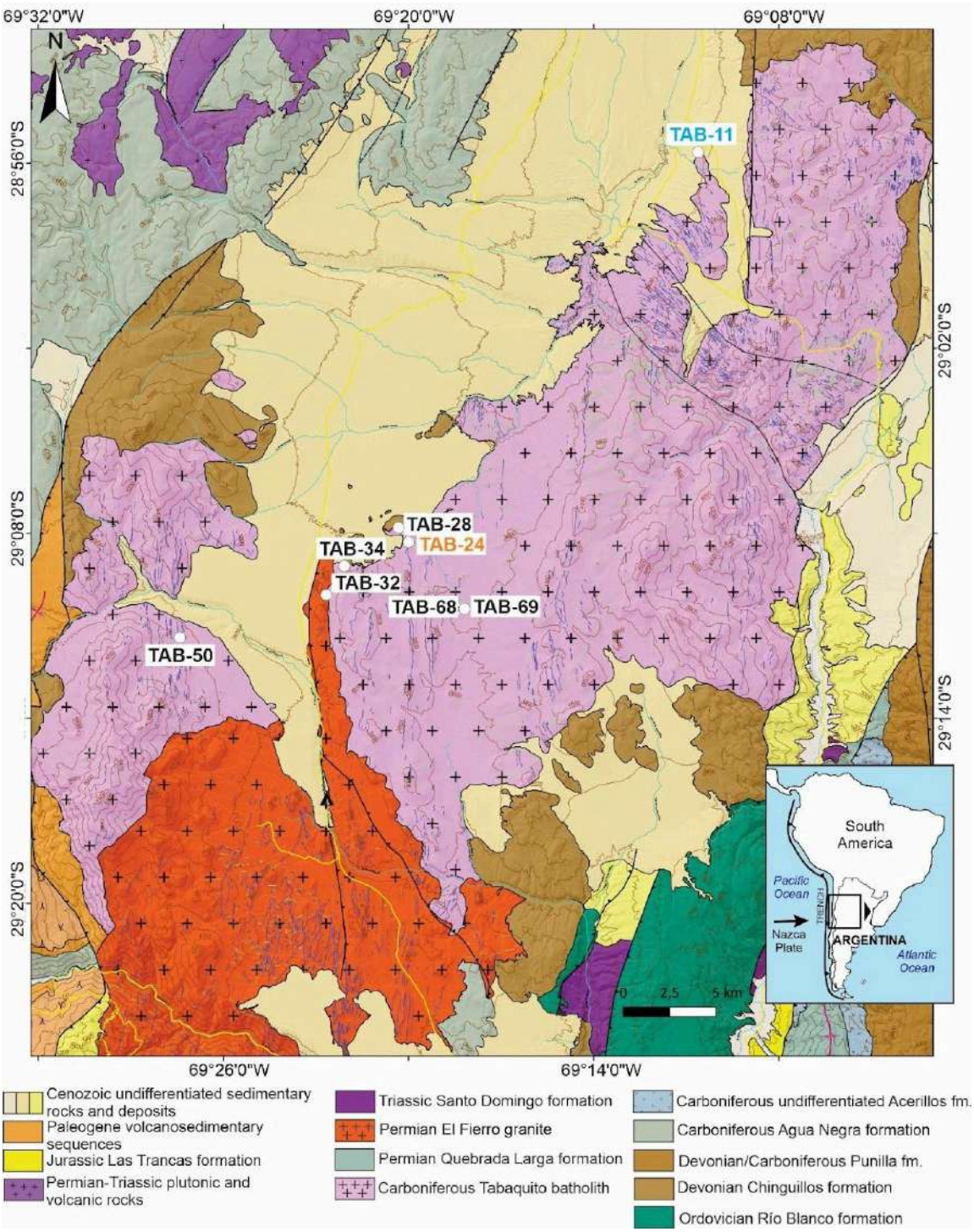


FIGURE 1. Simplified geological map of the Tabaquito batholith. Blue and green lines are schematic representations of dykes N-S and E-W, respectively. White points represent the location of the studied samples. In the boxes close to each point, the samples collected in that area are indicated. Samples collected for this study are indicated with black text, whereas two samples collected by Dahlquist et al. (2018a; 322 ± 5 Ma) and Moreno et al. (2020; 337 ± 2) are highlighted in blue and orange, respectively.

U-Pb ZIRCON AGES

Previous data show that dated samples from the Tabaquito batholith display a significant time span, ranging from 322 ± 5 to 337 ± 2 Ma, indicating a duration of approximately 15 million years among calculated U-Pb zircon ages (Dahlquist et al., 2018a and Moreno et al., 2020). The zircon ages obtained in this study for five representative samples vary widely between 327-363 Ma, 324-363 Ma, 324-364 Ma, 322-363 Ma and 326-365 Ma, respectively, showing comparable ranges between them and with previous findings. To analyze the data in more detail, we employed combined diagrams recommended by Siégel et al. (2018). Linearized probability plots and weighted mean age diagrams (not shown in this work) were used to identify zircon antecrysts and autocrysts (cf. Miller et al., 2007). The linearized probability plot (Fig. 2a) reveals a multimodal distribution with four inflection points, indicating five distinct age populations, which are used to calculate ages in the Tera-Wasserburg Concordia diagram (Fig. 2b). These age populations, strongly suggest that five major zircon crystallization events occurred during the formation of the batholith.

Magmatic crystallization events (Fig. 2) were identified, revealing five distinct ages: I) 325 ± 2 Ma (equivalent to the 322 Ma age reported by Dahlquist et al., 2018), II) 332 ± 2 Ma, III) 337 ± 2 Ma (corresponding to antecrysts recognized by Moreno et al., 2020), IV) 346 ± 1 Ma, and V) 362 ± 2 Ma. In this study, ages younger than approximately 310 Ma were excluded from crystallization interpretations, because a partial Pb loss and a possible U-Pb system restart was assumed. The interaction of Permian dikes with the Carboniferous granitic rocks could have been the main cause of the mentioned Pb loss. Ages older than approximately 370 Ma, were found in the country rock (hornfels) (Santos da Cruz et al., *under review*) and they were considered as inherited ages (xenocrysts).

MEANING OF THE OBTAINED U-Pb ZIRCON AGES: ANTECRYSTS AND AUTOCRYSTS

The 325 Ma event represents the crystallization age during the emplacement (zircon autcrysts), while the 337 Ma event corresponds to previously recognized antecrysts. A newly identified 332 Ma antecrysts event highlight the importance of a more robust database. Additionally, two older magmatic events (346 ± 1 Ma and 362 ± 2 Ma) indicate the presence of older antecrysts, implying a magmatic system duration of approximately 30 Myr, longer than previously thought (15 Myr; Moreno et al., 2020). These older ages are comparable to those reported for other Carboniferous granites, such as the reported for the Potrerillos Pluton (353 ± 2 Ma; Dahlquist et al., 2018), suggesting inheritance from a source like this pluton. Moreno et al. (2020) suggested a link between the Tabaquito batholith and sources like the quartz diorites and monzogranites of the Potrerillos Pluton based on isotopic data, further investigations of trace elements, REE, and Hf isotopes in zircon are required to clarify this hypothesis.

CONCEPTUAL MODEL

This study proposes a conceptual model (Fig. 3; modified from Dahlquist et al., *under review*) for the Tabaquito batholith, emphasizing prolonged magmatic activity spanning 15-30 million years. While previous research identified two major crystallization events, the current study recognizes five major events, contemplating also that two events might be considered xenocrysts from the source. This model suggests the existence of mush reservoirs at 20–30 km depth, functioning as zircon incubators over about 30 million years (or 15 Ma considering that the two older events were calculated from zircon xenocrysts), leading to the formation of antecrysts.

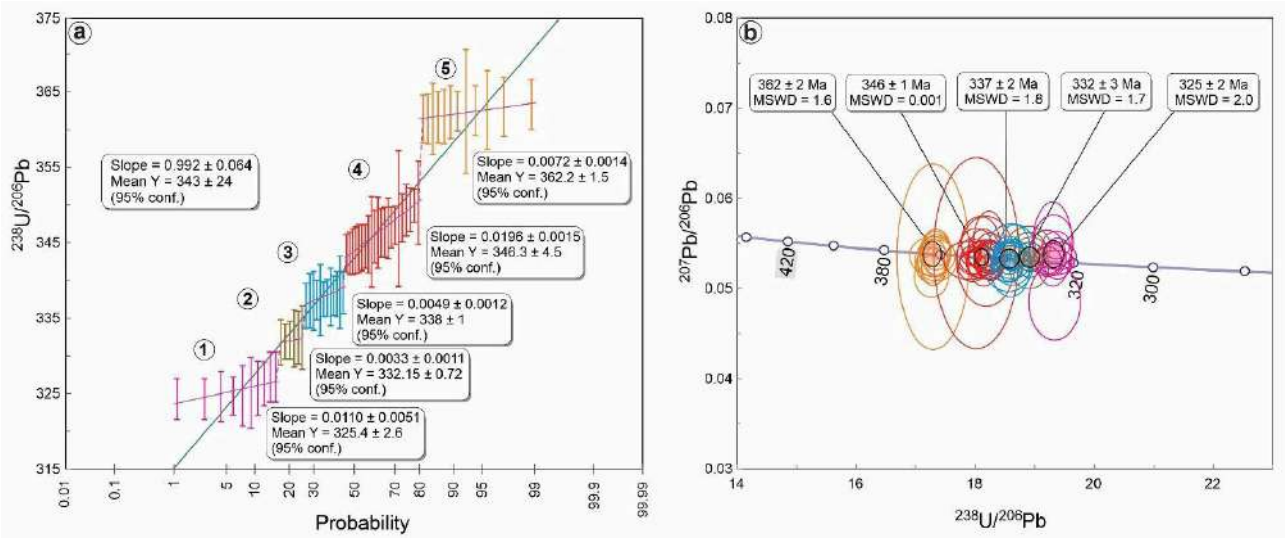


FIGURE 2. (a) Linearized probability plots. (b) Tera-Wasserburg Concordia diagram. The Concordia ages are calculated at 2σ.

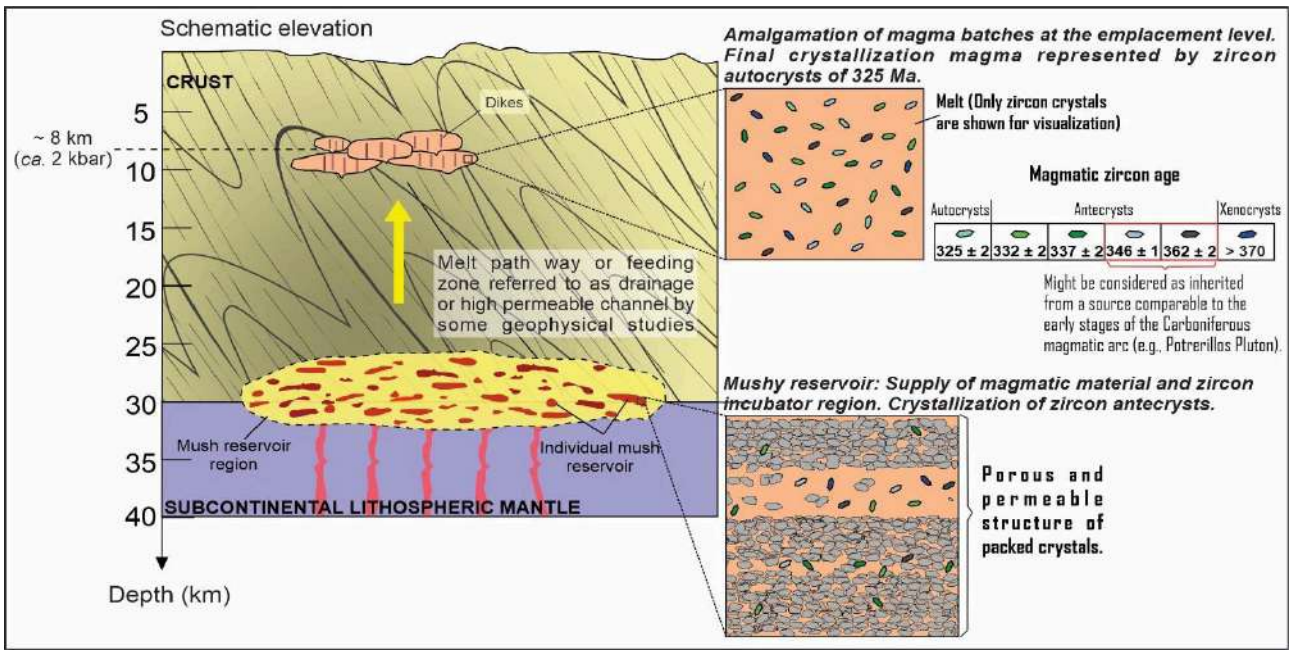


FIGURE 3. Conceptual model. The location of that mush reservoir is relatively speculative.

Subsequently, numerous granitic magmas are emplaced almost simultaneously at shallow levels (around 10 km), where the crystallization of new zircons (autocrysts), is recorded in an ephemeral magmatic chamber. Considering these geochronological data, we postulate the presence of a deep mush reservoir, where an extended magmatic activity permitted the prolonged crystallization of antecrysts (Fig. 3). Migration of the parental magma from the mush reservoir zone occurred near the time of emplacement and culminated in the formation of an ephemeral magma chamber located at shallow levels, where zircon autocrysts crystallized (Fig. 3). This prompts a reassessment of geochronological data used to calculate crystallization ages for igneous rocks. The combination of geochronological data from antecrysts and autocrysts is highlighted as a potential source of misleading ages and erroneous interpretations.

ACKNOWLEDGEMENTS

PICT2020 0378 and PIP0564 CONICET FAPESP 2018/06837-3 linked to Thematic Project FAPESP 2015/03737-0. *Consolidar* 2023 SECyT-UNC.

REFERENCES

Dahlquist, J.A., Alasino, P.H., Basei, M.A.S., Morales Camera, M., Macchioli Grande, M., and da Costa Campos Neto, M.C. (2018): Petrological, geochemical, isotopic, and geochronological constraints for the Late Devonian - early Carboniferous magmatism in SW Gondwana (27°-32° LS): an example of geodynamic switching. *International Journal of Earth Sciences*, 107: 2575–2603.

Dahlquist, J.A., Morales Cámera, M.M., Moreno, J.A., Basei, M.A.S., Santos da Cruz, G., and Oliveira, E.P. (*under review*): Geochronological U-Pb zircon studies from the Devonian granitic magmatism in Sierra de San Luis: A conceptual model for the evolution of a magmatic system. *International Geology Review, submitted*.

Lim, H., Nebel, O., Weinberg, R.F., Nebel-Jacobsen, Y., Barrote, V.R., Park, J., Myeong, B., and Cawood, P.A. (2023): Lower crustal hot zones as zircon incubators? Inherited zircon antecrysts in diorites from a mafic mush reservoir. *Geological Society*, London, Special Publications, 537: 411–433.

Miller, J.S., Matzel, J.E.P., Miller, C.F., Burgess, S.D., and Miller, R.B. (2007): Zircon growth and recycling during the assembly of large, composite arc plutons. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167: 282–299.

Moreno, J.A., Dahlquist, J.A., Morales Cámera, M.M., Alasino, P.H., Larrovere, M.A., Basei, M.A.S., Galindo, C., Zandomeni, P.S., and Roche, S. (2020): Geochronology and geochemistry of the Tabaquito batholith (Frontal Cordillera, Argentina): geodynamic implications and temporal correlations in the SW Gondwana margin. *Journal of the Geological Society of London*, 177: 455–474.

Santos da Cruz, G., Moreno, J.A., Dahlquist, J.A., Morales Cámera, M.M., Basei, M.A.S., and Zandomeni, P.S. (*under review*): Contributing to understand how Cordilleran batholiths build from detailed geochronology of the Carboniferous Tabaquito batholith, Frontal Cordillera (Argentina). *Chemical Geology, submitted*.

Siégel, C., Bryan, S.E., Allen, C.M., and Gusta, D.A. (2018): Use and abuse of zircon-based thermometers: A critical review and a recommended approach to identify antecrystic zircons. *Earth-Science Reviews*, 176: 87–116.

Ignimbritas reomórficas riolíticas y traquíticas Misisipienses de la Cuenca de Matachel (Zona de Ossa-Morena).

Mississippian rhyolitic and trachytic rheomorphic ignimbrites of the Matachel Basin (Ossa-Morena Zone).

F. Sarrionandia[1], J. Errandonea-Martin[2], E. Larrondo[3], M. Carracedo-Sánchez[2], L. Eguiluz[1] y J.I. Gil Ibarguchi[2]

1 Dpto. Geología, Facultad de Farmacia, Universidad del País Vasco UPV/EHU 01006 Vitoria-Gasteiz.
fernando.sarrionandia@ehu.eus; luis.eguiluz@ehu.eus
2. Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU 48080 Bilbao.
jon.errandonea@ehu.eus; manuel.carracedo@ehu.eus; josei.gil@ehu.eus
3 Team Ingeniería y Consultoría S.L., Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia, 207C, 48170, Zamudio.
egoitz.larrondo@gmail.com

Palabras clave: ignimbritas, riolitas, volcanismo, Matachel, Zona de Ossa-Morena.

Resumen

La unidad tectono-estratigráfica conocida como cuenca de Matachel (Zona de Ossa-Morena; Badajoz), integra un registro volcano-sedimentario marino somero de edad Misisipiense. Entre estos depósitos destacan por su singularidad unas ignimbritas reomórficas riolíticas y traquíticas. Estos depósitos tabulares, fuertemente soldados, están groseramente estratificados (10-60 m de potencia) y carecen de intercalaciones, mostrando una extensión lateral aproximada de 1 a 3 km. Están integrados por tobas de lapilli vítreas no vesiculares, presentando una textura clástica formada por *fiammes* (27-40 % modal), fragmentos traquíticos de hasta 5 cm (5-15 % modal) y cristales y fragmentos de cristales (4-10 % modal), inmersos en una matriz afanítica felsítica (43-54 % modal). Las *fiammes* son tanto discoidales (texturas eutaxíticas) como elipsoidales (texturas parataxíticas), y presentan escasos micro-fenocristales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo. La fábrica eutaxítica indica el estiramiento y deformación plástica, a alta temperatura, por compactación de fragmentos de vidrio, y el desarrollo de una fábrica groseramente planar. Estos depósitos fuertemente soldados son proximales, y fueron probablemente generados por erupciones poco explosivas, con altas tasas de acumulación, que permitirían un apilamiento rápido de los clastos, el aplastamiento a alta temperatura, y su soldadura y aglutinación por compactación. Su identificación permitirá conocer mejor la localización de los centros eruptivos Misisipienses y, por tanto, reconstruir mejor la paleogeografía de esta cuenca marina somera.

Abstract

The tectono-stratigraphic unit known as Matachel basin (Ossa-Morena Zone; Badajoz), integrates a shallow marine Mississippian volcano-sedimentary record. Among these deposits, some rheomorphic rhyolitic and trachytic ignimbrites stand out. These sheet-shaped, strongly welded deposits are roughly stratified (10-60 m of thickness), extending 1 to 3 km in length, and lack other interbedded deposits. The componentry of these non-vesicular glassy lapilli tuffs, which show a clastic texture, comprises fiammes (27-40 % in mode), trachyte clasts up to 5 cm in size (5-15 % modal), and crystals and crystal fragments (4-10 % mode), embedded within a felsitic aphanitic groundmass (43-54 % modal). The fiammes are both discoidal (eutaxitic textures) and ellipsoidal (parataxitic textures), and show scarce alkali feldspar, plagioclase and quartz micro-phenocrystals. The presence of an eutaxitic texture indicates high temperature deformation and ductile stretching by compaction of glassy fragments, and the development of a coarse planar fabric. These strongly welded deposits are proximal, and were probably generated by weak explosive eruptions with high accumulation rates, allowing a prompt high-temperature accumulation and flattening of clasts, their compaction and subsequent welding by agglutination, with development of a coarse planar fabric. Their identification will allow a better location of the Mississippian eruptive centers and, therefore, a better paleogeographic reconstruction of this shallow marine basin.

Estructuras relacionadas con el emplazamiento de la granodiorita de la sierra de Collserola en la aureola de contacto (Cadena Costera Catalana).

Emplacement-related structures of the Collserola granodiorite in the contact aureole (Catalan Coastal Range).

J. Soler[1], G. Alías[1] y C. Aguilar[1]

1 Dpt. Geoquímica, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. julsi.soler@gmail.com; galias@ub.edu; carmenmaguilar@ub.edu

Resumen: El batolito de la Cadena Costera Catalana, compuesto por numerosos plutones de composiciones muy variadas, que van desde términos más ultramáficos a leucocráticos, intruye en rocas de edad Paleozoica a diferentes niveles estructurales. En la parte central de este batolito, en la cadena litoral, en la sierra de Collserola (Barcelona), aflora un pequeño cuerpo de granodiorita biotítica con una aureola de contacto asociada de unos 1200 m que afecta a las rocas encajantes de edades ordovícica y silúrica. Este estudio presenta datos novedosos acerca de los mecanismos de emplazamiento de dicha granodiorita, basados en la caracterización estructural y petrográfica de las cornubianitas y filitas moteadas, así como el cálculo de las condiciones de P-T obtenidas a partir del programa Theriak-Domino. La presencia de pliegues de borde (*fold rims*) de la foliación varisca (S_1) en el contacto con la granodiorita, así como la presencia de pliegues de crenulación (S_2) asociados, y un metamorfismo de contacto precoz a coetáneo a esta deformación D_2 sugiere que, durante el ascenso del magma, la roca encajante se acortó por expansión lateral permitiendo el emplazamiento del plutón a unos 2-4,2 km de profundidad, y una temperatura máxima de 540-745ºC.

Palabras clave: metamorfismo de contacto, aureola tectónica, Collserola, Cadena Costera Catalana.

Abstract: *The batholith of the Catalan Coastal Range, composed of numerous plutons of very varied compositions, ranging from more ultramafic to leucocratic terms, intrudes into rocks of Paleozoic age at different structural levels. In the central part of this batholith, in the pre-littoral chain, in the Collserola mountain range (Barcelona), a small body of biotite granodiorite outcrops with an associated contact aureole of about 1200 m that affects the host rocks of Ordovician and Silurian ages. This study presents innovative data about the emplacement mechanisms of the granodiorite, based on the structural and petrographic characterization of the hornfels and mottled phyllites, together with the calculation of the P-T conditions obtained from the Theriak-Domino software. The presence of folds rim of the Variscan foliation (S_1) in contact with the granodiorite, as well as the presence of crenulation folds (S_2) associated, and a contact metamorphism prior to coeval to this deformation D_2 suggest that, during the rise of the magma, the host rock was shortened by lateral expansion allowing the emplacement of the pluton at a depth of about 2-4,2 km and a maximum temperature of 540-745ºC.*

Key words: *contact metamorphism, aureole tectonics, Collserola, Catalan Coastal Range*

INTRODUCCIÓN

Las aureolas de metamorfismo de contacto desarrolladas en torno a intrusiones ígneas en la corteza continental han sido motivo de estudio a lo largo de mucho tiempo. Aunque tienen una extensión limitada, las rocas de las aureolas de contacto registran aspectos transitorios de las condiciones regionales, como perturbaciones térmicas y estructurales durante el emplazamiento y enfriamiento de la intrusión (Paterson, et al., 1991). Los mecanismos que hacen posible la intrusión de grandes cuerpos graníticos en la corteza superior siguen siendo motivo de debate. Sin embargo, existen estudios de las rocas encajantes que demuestran que estas experimentan cambios a escala regional (fracturación, pliegues) a causa del crecimiento vertical y lateral de los plutones (Paterson y Farris, 2008; Festa et al., 2013). Esta deformación es especialmente patente si las rocas presentan estructuras preexistentes, como foliaciones o estratificación, que se pliegan adyacentes al plutón con ejes de pliegues concordantes al contacto intrusivo. Esta deformación consiste en monoclinales o sinformales de borde que pueden estar acompañados del desarrollo de hendiduras o microcrenulaciones (He et al., 2009). Esta zona de deformación, denominada aureola tectónica, puede ocupar extensiones de más de 3000 m.

En la cadena litoral de la Cadena Costera Catalana, afloran importantes cuerpos de rocas intrusivas del Carbonífero-Pérmico con una aureola de contacto asociada, que se encuentra expuesta muy restringidamente en la sierra de Collserola, en el macizo del Montnegre, en las Gavarres y algunos sectores de la Costa Brava. El conocimiento sobre la aureola de contacto en esta zona es muy limitado, y se centra únicamente en la sierra de Collserola (Fig. 1a; Gil Ibarguchi y Julivert, 1988). En todos los trabajos previos se hace referencia a las estructuras tectónicas de edad

varisca y a la relación temporal con el metamorfismo de contacto, que lo sitúan post-foliación regional y previo a fases deformativas tardías. Sin embargo, más recientemente, Alías et al. (2022) señalan de forma preliminar que las condiciones de clímax del metamorfismo de contacto se sitúan en torno a los 0,25-2,5 kbar y 560-690ºC, y que podría ser coetáneo al menos con alguna de las fases deformativas tardías.

Este trabajo pretende aportar más información sobre las relaciones temporales entre el magmatismo-metamorfismo-deformación para entender mejor las condiciones de emplazamiento de la granodiorita de la sierra de Collserola.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La Cadena Costera Catalana se localiza al NE de la Península Ibérica y corresponde a sistema de horsts y grabens, de dirección NE-SW paralelos a la costa, configurados durante la compresión paleógena y la extensión neógena. La sierra de Collserola se halla en el horst de Garraf-Montnegre, en la parte alta de la ciudad de Barcelona, y está limitada per la falla normal de Collserola (Fig. 1a). La mayor extensión de la sierra está ocupada dominantemente por una secuencia estratigráfica del Paleozoico (Cambro-Ordovícico-Carbonífero), que ha sido atribuida al margen pasivo del norte de Gondwana a partir del estudio geoquímico y de isotopía Sm-Nd (Vilà y Pin, 2016). Todos estos materiales fueron afectados por diversas fases de deformación y un metamorfismo regional de grado bajo durante la orogenia varisca. Posteriormente, fueron intruidos por una granodiorita de grano medio constituida por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y en menor proporción hornblenda, que aflora de manera muy limitada en la falda de la sierra. Alrededor de la granodiorita se desarrolla una aureola de contacto de unos 1200 m estimada a partir del corte geológico. En la zona de estudio afloran únicamente pelitas del Ordovícico y una potente intercalación de rocas volcano derivadas de composición básicas (Fig. 1b).

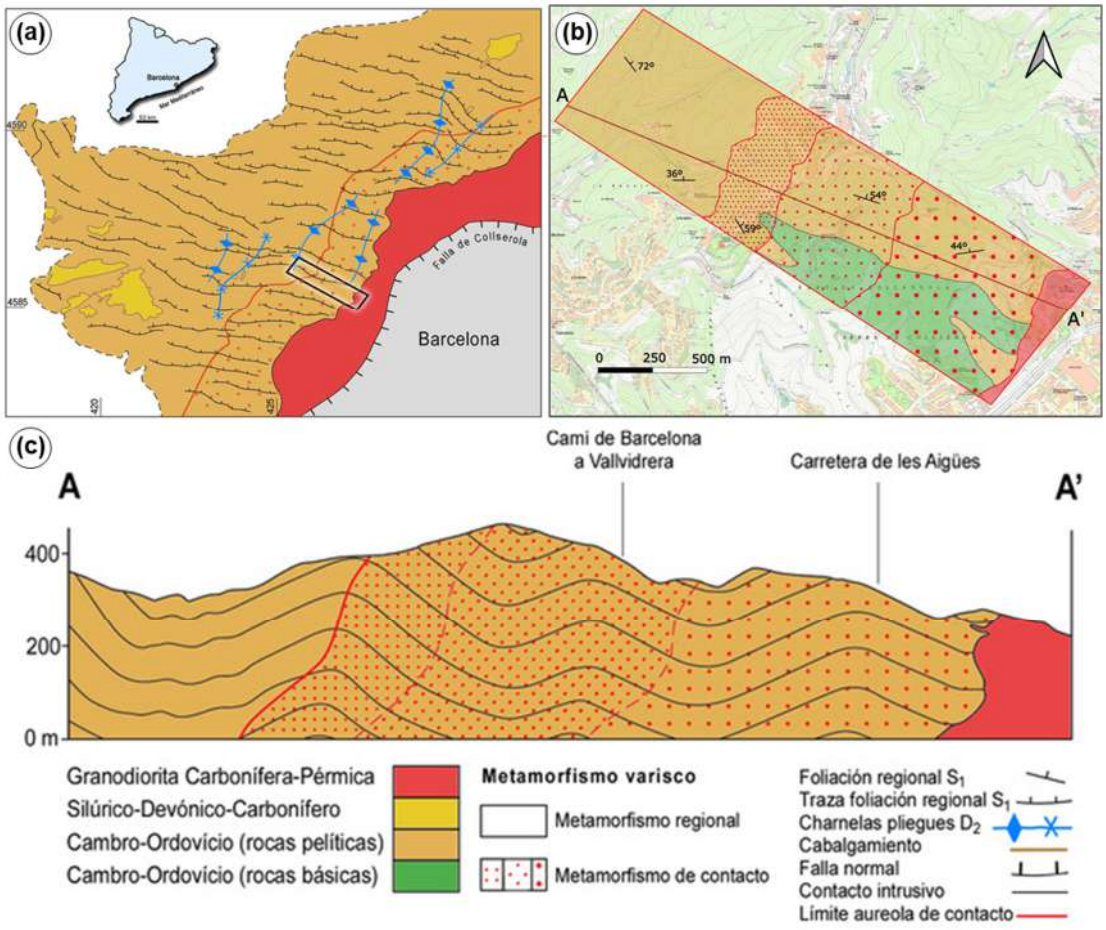


FIGURA 1. *(a) Mapa geológico de la sierra de Collserola con la localización de la zona de estudio. Modificado de Vilà y Pin (2015). (b) Mapa geológico esquemático del sector central de la aureola de contacto. (c) Corte geológico esquemático del sector central de la aureola de contacto.*

FASES DEFORMATIVAS

En la zona de estudio se reconocen tres fases deformativas. La primera fase (D_1) se caracteriza por el desarrollo de una foliación regional penetrativa (S_1) de dirección NW-SE y un buzamiento medio de 50º hacia el NE, que es plano axial de pliegues isoclinales de la estratificación. La segunda fase (D_2) genera un sistema de pliegues abiertos de dirección NE-SW vergentes hacia el SW con micropliegues y un clivaje de crenulación asociados (S_2). Una tercera fase deformativa D_3 da lugar a pliegues tipo kink o chevron de dirección NNW-SSE y buzamiento de 75º al NNE.

A partir del mapa y del corte geológico se observa que el contacto intrusivo corta la foliación regional S_1 y que los pliegues de D_2 tienen longitudes de onda variable entre 0,5 a 2 km y sus ejes discurren aproximadamente paralelos a la intrusión (Fig. 1b).

PETROGRAFÍA

Las rocas de fuera de la aureola corresponden a filitas, con intercalaciones más cuarcíticas, que presentan la asociación mineral moscovita de grano muy fino, clorita, cuarzo y feldespato. En lámina delgada, las micas siguen una orientación preferente paralela a la S_1, que se interpreta que crecieron durante la fase D_1 en facies de los esquistos verdes (Fig. 2a). En la aureola de contacto se han distinguido tres zonas atendiendo a la textura de las rocas: una aureola externa determinada por filitas moteadas, una aureola interna caracterizada por cornubianitas moteadas, y entre ambas una zona de tránsito. Las rocas de la aureola externa y zona de tránsito están constituidas por biotita, moscovita, cordierita y cuarzo, mientras que las de la aureola interna presentan localmente feldespato potásico en lugar de moscovita. La *moscovita* está alineada según la S_1 (0,1 mm) o decusada (0,3 mm), pero deformada por las fases D_2 y D_3. La *biotita* se dispone mimética a la foliación S_1 (0,1 mm), aunque mayormente se encuentra al azar (0,3 mm) y plegada por la fase D_2 en toda la aureola. Algunas biotitas están orientadas preferentemente en los planos axiales de los pliegues D_2. La *cordierita* es poiquiloblástica, forma cristales ovalados de 1 a 3 mm y es responsable del moteado de la roca (Fig. 2b-c). Crece mimética en los planos de S_1, aunque está decusada sobre ellos, corta la foliación S_1, y contiene trazas de la foliación S_1 en su interior (Si/S_1). Esta Si/S_1 suele ser recta, aunque en algunos casos se observa que en los bordes está ligeramente plegada según los pliegues D_2. Algunas cordieritas están claramente deformadas por la D_2, mientras que en las cornubianitas se ha distinguido además una nueva generación de cordieritas idiomórficas macladas, que incluyen pequeñas biotitas paralelas a la D2 (Fig. 2d).

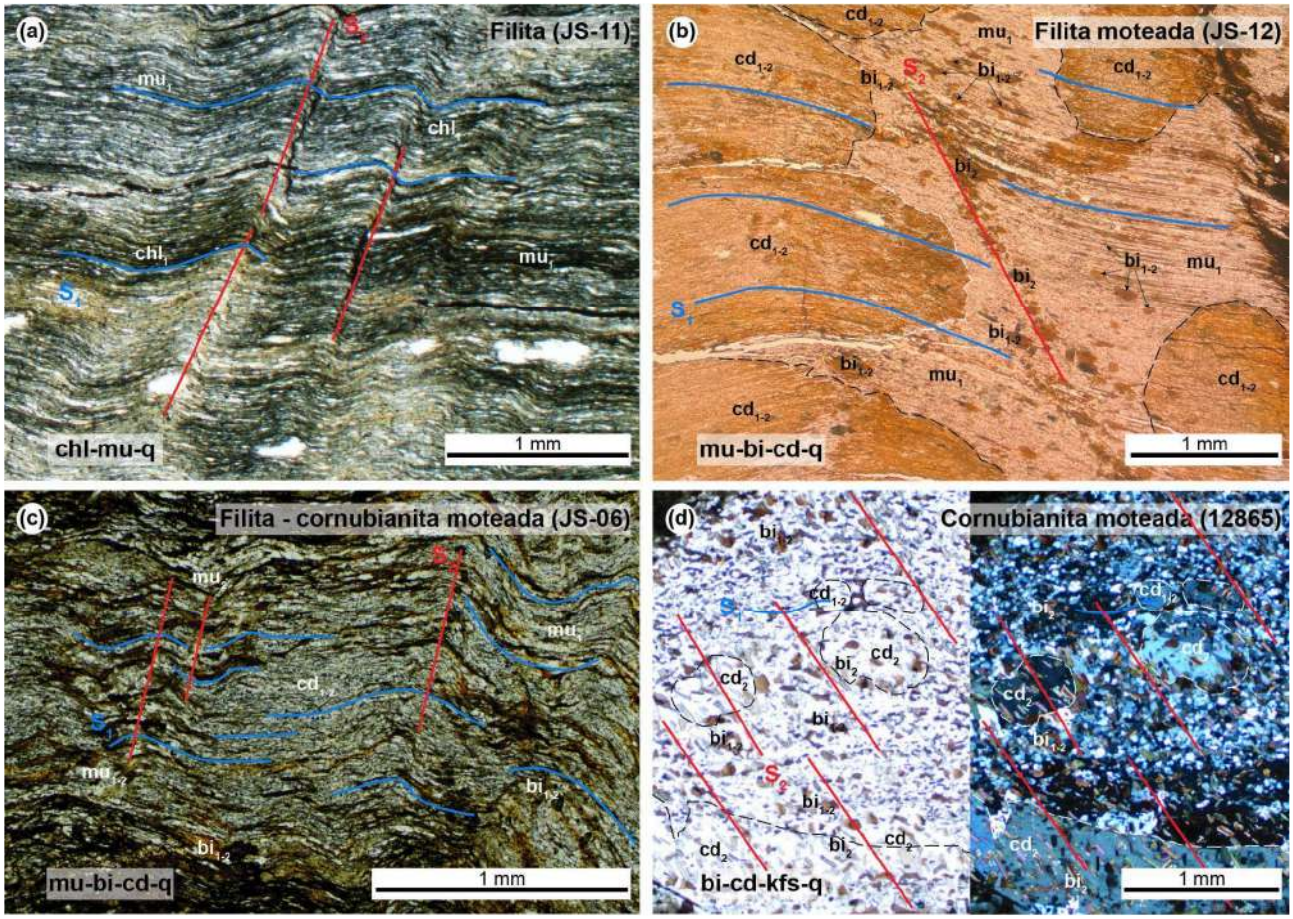


FIGURA 2. *Aspecto microscópico de diferentes rocas pelíticas observadas fuera y dentro de la aureola de contacto de la sierra de Collserola y su asociación mineral y las fases deformativas observadas: (a) filita de fuera de la aureola con clorita (chl), moscovita (mu) y cuarzo (q), (b) filita moteada de la zona externa de la aureola con moscovita (mu), biotita (bi), cordierita (cd) y cuarzo (q), (c) tránsito de filita moteada a cornubianita moteada y (d) cornubianita moteada de la zona interna de la aureola con biotita (bi), cordierita (cd), feldespato potásico (kfs) y cuarzo.*

MODELIZACIÓN TERMODINÁMICA

Con el objetivo de determinar las condiciones de presión (P) y temperatura (T) máximas alcanzadas en la aureola interna, se ha calculado una pseudosección a partir de la composición de roca total de la cornubianita moteada 12865 (Fig. 2d). La pseudosección está calculada con H_2O en exceso y con un valor estimado de Fe_2O_3 alrededor de 0,11, ya que, según las observaciones de microscopio, la asociación mineral modelizada incluye solo ilmenita, mientras que el rutilo y la magnetita son ausentes. La composición utilizada en este

diagrama en moles por cien es SiO_2: 65,34; Al_2O_3: 12,99; FeO: 7,42; Fe_2O_3: 0,11; MgO: 5,55; CaO: 1,56; Na_2O: 3,28; K_2O: 2,85 y TiO_2: 0,91.

La asociación mineral biotita, cordierita, feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo e ilmenita de la cornubianita moteada se encuentra en el campo de estabilidad que comprende entre 0,25 y 2,9 kbar y 540-745°C. Sin embargo, estas rocas no presentan aluminosilicatos, interpretando que las rocas vienen del campo de estabilidad situado a más baja temperatura y con una P limitada de 0,54 a 1,15 kbar. De acuerdo con esto, se establece que las rocas han seguido una trayectoria isobárica (Fig. 3).

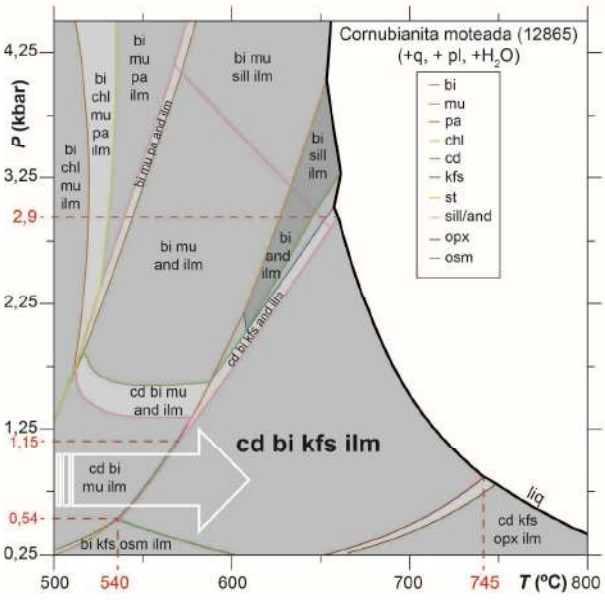


FIGURA 3. *Diagrama de presión (P) y temperatura (T) calculado para la composición de una cornubianita moteada (12865) de la zona interna de la aureola de contacto de la sierra de Collserola en un sistema químico NCKFMASHTO. El solidus está subrayado por una línea negra gruesa y la flecha blanca indica la trayectoria isobárica.*

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio estructural de la aureola de contacto de la granodiorita de la sierra de Collserola ha permitido reconocer la presencia de pliegues de borde, anticlinales y sinclinales, en las rocas encajantes adyacentes a la intrusión, a lo largo de una aureola tectónica de unos 6 km. Estos pliegues deforman la foliación regional (S_1) y tienen asociado un clivaje de crenulación (S_2). El paralelismo de las charnelas de los pliegues D_2 con el contacto intrusivo sugiere una relación temporal entre ambos. En este sentido el crecimiento de placas de biotita y porfiroblastos de cordierita post-D_1/pre-D_2 y sin-D_2 indica que el metamorfismo de contacto es coetáneo a precoz a la D_2 y, por consiguiente, la intrusión está relacionada temporalmente con la fase deformativa D_2.

Los datos termobarométricos han puesto de manifiesto que el emplazamiento del magma tuvo lugar entre 2 y 4,2 km, profundidades relativamente someras de la corteza continental superior, donde rigen procesos de deformación frágil. Sin embargo, la temperatura alcanzada, entre 540-745°C, facilita la deformación de tipo dúctil de las rocas. La presencia de pliegues de borde es un hecho de observación en otras áreas orogénicas del cinturón varisco (Festa et al., 2013) y está relacionada con la generación de espacio necesario para la instalación del magma. Los pliegues pueden responder a: 1) un componente de movimiento vertical responsable del arrastre de la fábrica dominante dando lugar a sinformales, anticlinales o monoclinales de borde (He et al., 2009; Paterson y Farris, 2008), y/o 2) un componente de expansión lateral ligado a la fuerza del emplazamiento con el consecuente acortamiento de las rocas encajantes (Festa et al., 2013), dando lugar a una serie de sinformes y antiformes. Los resultados de este trabajo apuntan que el mecanismo de emplazamiento de la granodiorita de la sierra de Collserola tuvo lugar por expansión lateral.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al grupo de recerca GEOXiS. Las autoras agradecen a Pep Agulló la digitalización de los cortes y mapas, y a los revisores.

REFERENCIAS

Alías, G., Aguilar, C., Liesa, M., Aulinas, M. y Vilà, M. (2022): L'aureola de metamorfisme de contacte de la part central de la granodiorita de Barcelona (Serra de Collserola). En: *Geologia de la ciutat de Barcelona: coneixements, condicionants i aprofitaments d'una zona urbana complexa.* (M. Vilà, ed.). Monografies tècniques 11, ICGC, 45-64.

Festa, V., Caggianelli, A., Langone, A. y Prosser, G. (2013): Time–space relationships among structural and metamorphic aureoles related to granite emplacement: a case study from the Serre Massif (southern Italy). *Geological Magazine,* 150: 441-454.

Gil Ibarguchi, J.I. y Julivert, M. (1988): Petrología de la aurèola metamórfica de la granodiorita de Barcelona en la Sierra de Collcerola (Tibidabo). *Estudios geológicos*, 6: 105-114.

He, B., Xu, Y. y Paterson, S. (2009): Magmatic diapirism of the Fangshan pluton, southwest of Beijing, China. *Journal Structural Geology*, 31: 615-626.

Paterson, S.R. y Farris, D. (2008): Downward host rock transport and the formation of rim monoclines during the emplacement of Cordilleran batholiths. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 97: 397-413

Paterson, S.R., Vernon, R.H. y Fowler, T.K. (1991): Aureole tectonics. En: *Contact Metamorphism* (D.M. Kerrick, ed.). Reviews in Mineralogy 26. Washington: Mineralogical Society of America, 673-722.

Vilà, M. y Pin, C. (2016): Geochemistry and Nd isotope signature of the Collserola Range Palaeozoic succession (NE Iberia): Gondwana heritage and pre-Mesozoic geodynamic evolution. *Geological Magazine,* 153: 643-662

Fragmentos líticos en vulcanismo postcaldera: Descifrando el sistema hidrotermal de la Isla Decepción, Antártida

Lithics fragments in post-caldera volcanism: Unravelling the hydrothermal system of Deception Island, Antarctica

O. Vilanova-Pagès[1], H. Albert[1], A. Geyer[2], M. Aulinas[1], J. Ibáñez[2], A. Álvarez-Valero[3] y Antonio Polo-Sánzhez[3]

1 Dept. Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. Carrer Martí Franqués s/n. 08028 Barcelona. (o_vilanova@ub.edu, halbert@ub.edu, meritxellaulinas@ub.edu)
2 GEO3BCN, CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona (ageyer@geo3bcn.csic.es, jibanez@geo3bcn.csic.es)
3 Depto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. 37008, Salamanca (aav@usal.es, polosanchezantonio@gmail.com)

Palabras clave: Sistema hidrotermal, alteraciones, Isla Decepción, volcán

Resumen

Isla Decepción (Islas Shetland del Sur) es uno de los sistemas volcánicos más activos de la Antártida, con más de 20 erupciones en los dos últimos siglos y dos periodos de *unrest* registrados entre 1999 y en 2014-2015. Además, aloja dos bases científicas (Gabriel de Castilla, España – Base Decepción, Argentina), y recibe más de 15.000 visitantes al año. Es por eso por lo que el vulcanismo presente y pasado de la isla ha sido estudiado durante las últimas décadas. Aun así, todavía quedan algunas incógnitas por resolver, como por ejemplo la situación y dinámica del sistema hidrotermal de la isla y sus ramificaciones en superficie. Este trabajo pretende añadir conocimiento sobre el sistema hidrotermal de Isla Decepción mediante el estudio de los fragmentos líticos recuperados de erupciones posteriores al colapso de caldera. Los resultados preliminares muestran que, en algunos líticos, principalmente los recogidos en el NW de la isla, hay cristalización de cuarzo, feldespato potásico y pumpellyita, además de presencia de pirita con hábito cúbico. Estas alteraciones indican temperaturas de más de 250 ºC. En la zona NE de la isla también se han encontrado fases como la arsenopirita y el yeso en líticos de la erupción del 1967, que implican circulación de fluidos hidrotermales. Nuestro estudio corrobora la existencia de un reservorio hidrotermal en la corteza superior de la zona central - norte de la isla sugerido anteriormente por distintos modelos geofísicos. Esta investigación es parte del proyecto HYDROCAL (PID2020-114876GB-I00) financiado por el MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Abstract

Deception Island (South Shetland Islands) is one of the most active volcanic systems in Antarctica, with over 20 eruptions in the last two centuries and two periods of unrest recorded in 1999 and 2014-2015. Additionally, it hosts two scientific bases (Gabriel de Castilla, Spain – Base Decepción, Argentina), and receives more than 15,000 visitors annually. This is why the island's present and past volcanism has been studied over the last few decades. However, there are still some unresolved questions, such as the location and dynamics of the island's hydrothermal system and its surface ramifications. This work aims to improve our understanding of the hydrothermal system of Deception Island by studying lithic fragments recovered from eruptions occurring after the caldera collapse. Preliminary results show that some lithics, especially those collected in the NW of the island, exhibit alterations indicative of temperatures exceeding 250°C. For example, they show quartz crystallization, K-feldspars, pumpellyite, and the presence of pyrite with cubic habit. In the NE area of the island, from lithics of the 1967 eruption, phases such as arsenopyrite and gypsum have also been found. Our study corroborates the existence of a hydrothermal reservoir in the upper crust of the central-northern part of the island, as suggested by various geophysical models. This research is part of the HYDROCAL (PID2020-114876GB-I00) project funded by the MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Palagonitización en rocas volcánicas de la Isla Decepción, Antártida.

Palagonitisation in Volcanic rocks from Deception Island, Antarctica.

O. Vilanova-Pagès[1], A. Geyer[2], H. Albert[1], M. Aulinas[1], G. Gisbert[1], J. Ibáñez[2], A. Álvarez-Valero[3] y A. Polo-Sánchez[3]

1 Dept. Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. Carrer Martí Franqués s/n. 08028 Barcelona. o_vilanova@ub.edu, halbert@ub.edu, meritxellaulinas@ub.edu, ggisbertp@ub.edu)
2 GEO3BCN, CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona (ageyer@geo3bcn.csic.es, jibanez@geo3bcn.csic.es)
3 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. 37008, Salamanca (aav@usal.es, polosanchezantonio@gmail.com).

Palabras clave: Palagonita, alteración, Isla Decepción, volcán.

Resumen

La alteración del vidrio volcánico, o palagonitización, es un proceso común en rocas volcánicas de todo el mundo. En este trabajo hemos estudiado el proceso de palagonitización en los materiales volcánicos de Isla Decepción (Antártida), en concreto en depósitos de corrientes piroclásticas de densidad e hialoclastitas de composición máfica a intermedia, con el objetivo de caracterizar la alteración hidrotermal en ambientes polares. Las rocas estudiadas se depositaron tanto antes como durante el colapso de caldera que tuvo lugar en la isla hace 3940 años aproximadamente.

Los resultados indican una palagonitización muy extendida, sobre todo en las rocas más antiguas (entre el 50% y el 95% del vídrio está alterado a palagonita), previas al evento de colapso de caldera. Aun así, se ha observado vidrio remanente en todas las muestras, permitiendo comparar la composición del vidrio original con la palagonita en distintos perfiles hechos con microsonda electrónica. Los análisis muestran resultados parecidos a los publicados por otros autores en Isla Decepción: hay pérdida de Si, Al, Na, K, Ca y Mg, mientras que el Fe y el Ti tienden a enriquecerse en la palagonita. A través de observaciones con microscopia de electrones retrodispersados (BSE), en algunas se ha distinguido un segundo estadio de palagonitización. En comparación al primer estadio, hay enriquecimiento en Mg y, puntualmente, en K, sugiriendo la precipitación de fases de arcilla microcristalinas ya que, el Mg y el K son cationes que entran a formar parte de la estructura de fases como la esmectita que forma parte de la palagonita.

Esta investigación es parte del proyecto HYDROCAL (PID2020-114876GB-I00) financiado por el MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Abstract

The alteration of volcanic glass, or palagonitization, is a common process in volcanic rocks worldwide. In this study, we have investigated the palagonitization process in volcanic materials from Deception Island (Antarctica), specifically in deposits of pyroclastic density currents and hyaloclastites of mafic to intermediate composition. These rocks were deposited both before and during the caldera collapse that occurred on the island approximately 3940 years ago.

The results indicate widespread palagonitization, especially in the older rocks (between 50% and 95% of the glass is altered to palagonite), predating the caldera collapse event. Nevertheless, residual glass has been observed in all samples, allowing for a comparison of the original glass composition with palagonite in different profiles using electron microprobe analysis. The analyses show results similar to those published by other authors in Deception Island: there is a loss of Si, Al, Na, K, Ca, and Mg, while Fe and Ti tend to enrich in palagonite. Through observations with backscattered electron imaging (BSE), a second stage of palagonitization has been distinguished in some samples. In comparison to the first stage, there is an enrichment in Mg and, occasionally, in K, suggesting the precipitation of microcrystalline clay phases since these are cations that enter in the structure of minerals like smectite which is part of palagonite.

This research is part of the HYDROCAL (PID2020-114876GB-I00) project funded by the MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Una revisión de los entornos sedimentarios volcánicos de Ediacara en el interior de Saghro, Anti-Atlas oriental, Marruecos, que revela la diversidad de estilos volcánicos en condiciones terrestres.

A Review of Ediacaran Volcano-sedimentary Environments in the Saghro inlier, eastern Anti-Atlas, Morocco, Unveiling the diversity of Volcanic styles in terrestrial Conditions.

Z. Yajioui[1], B. Karaoui[1], A. Karaoui[2,3], C. Breitkreuz[3], A. Mahmoudi[2]

1 Laboratory of Applied Geology, Faculty of Sciences and Techniques, Moulay Ismail University of Meknes, Errachidia, BP. 509, Boutalamine, 52000, Errachidia**,** Morocco. z.yajioui@umi.ac.ma**,** karaouibrahim@yahoo.fr
2 Faculty of Sciences, Moulay Ismail University of Meknes, BP. 11201, Zitoune, Meknès, Morocco. amar.karaoui@yahoo.com, geo_mahmoudi@yahoo.fr
3 Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Bergakademie, Freiberg, Bernhard-von-Cotta-Str. 209599 Freiberg, Germany. Christoph.Breitkreuz@geo.tu-freiberg.de

Palabras clave: Ediacaran, Ourazazate Supergroup, volcanism, environment**,** Wacadomian**.**

Resumen

Durante el período Ediacárico Tardío, ocurrió una actividad volcánica significativa en las montañas del Anti-Atlas de Marruecos, formando el 'Supergrupo de Ouarzazate' durante un período de 40 millones de años (580-540 Ma; Yajioui *et al.*, 2020). El afloramiento de Saghro ofrece excelentes sucesiones de hasta 3.5 km de espesor. La sucesión, principalmente representada en pliegues monoclinales, muestra una variación estratigráfica vertical y lateral considerable. El análisis de facies revelan distintas litofacies, inluyendo una ignimbrita riolítica, lavas andesíticas a riolíticas, una secuencia volcanoclástica laminada, un complejo hidroclástico, unos conglomerados, unos diques con material piroclástico, una brecha caótica y unos sedimentos finos bien estratificados con intercalaciones de caliza. Estas litofacies reflejan diversos estilos volcánicos y ambientes deposicionales, como una ignimbrita relacionada con el colapso de la columna eruptiva, un complejo de lava, un depósito de caída, una erupción freatomagmática relacionada con un cono de escoria, un complejo de caldera con diques alimentadores, unos depósitos de oleada piroclástica, unos depósitos fluviales, una avalancha de escombros relacionada con la destrucción parcial de un estratovolcán, un depósito de flujo de escombros, unos sedimentos lacustres y un sistema de diques. Estas sucesiones evolucionan en un ambiente terrestre bajo condiciones húmedas, relacionadas con un arco continental asociado a la orogenia cadomiense del oeste de África.

Abstract

During the Late Ediacaran time, a significant volcanic activity occurred in the Anti-Atlas mountains of Morocco, forming the ‘’Ouarzazate Supergroup’’, which was deposited over a period of 40-Ma (580-540 Ma; Yajioui *et al.*, 2020). The Saghro inlier offers excellent successions up to 3.5 km thick. The succession, mainly displayed in a monocline fold, exhibits considerable vertical and lateral stratigraphic variation. Facies analysis reveal distinct lithofacies including; rhyolitic ignimbrite, the andesitic to rhyolitic lavas, a laminated volcanoclastic deposit, a hydroclastic complex, a polygenic conglomerate, dykes of pyroclastic material, a chaotic breccia, and well bedded fine sediments with interbedded limestone. These lithofacies reflect various volcanic styles and depositional environments, such as an ignimbrite related to collapse of eruption column, lava complexes, a fallout deposit, a phreatomagmatic eruption related to scoria cone, a caldera complex with feeding dykes, a surge deposit, a fluvial deposit, a debris avalanche related to partial destruction of stratovolcano, a debris flow deposit, lacustrine sediments, and a dyke system. These successions are evolved in terrestrial environment under humid conditions, associated with a continental arc related to the West African- Cadomian orogeny.

Referencias

Yajioui, Z., Karaoui, B., Chew, D., Breitkreuz, C., Mahmoudi, A., (2020). *Gondwana Res.* 87, 263–277.

Nota sobre la presencia de una sucesión cretácica-cenozoica bajo el Manto de Somiedo. Implicaciones tectónicas.

The occurrence of a Cretaceous-Cenozoic succession underlying the Somiedo Nappe. Tectonic implications.

J. L. Alonso[1], L. P. Fernández[1] , M. I. de Paz-Álvarez[1] , G. de Vicente[2] y S. Llana-Fúnez[1]

1 Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. C/Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005, Oviedo. jlalonso@uniovi.es, lpedro@uniovi.es, midepaz @outlook.es, llanasergio@uniovi.es
2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, GEODESPAL. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. gdv@geo.ucm.es

Resumen: La presencia de un afloramiento de arenas y arcillas de la Fm Voznuevo (Cretácico, facies Utrillas) y de brechas carbonatadas probablemente cenozoicas bajo una de las unidades tectónicas variscas mas importantes de la Zona Cantábrica (Manto de Somiedo), en la comarca de Babia, nos permite conocer las características de la deformación Alpina en este sector de la Cordillera Cantábrica. La sucesión mencionada, de unos 250 metros de espesor, consiste en arenas y arcillas de la facies Utrillas cubiertas de modo disconforme por brechas y conglomerados desorganizados o estratificados en capas gradadas a groseramente laminadas. El cabalgamiento Alpino que cobija dichos materiales es subparalelo al cabalgamiento Varisco de Somiedo, al que corta ligeramente a lo largo de su traza. También trunca el anticlinal de Villasecino, el cual pliega al cabalgamiento de Somiedo. Sin embargo, el cabalgamiento alpino también está plegado por el anticlinal de Villasecino, con menor amplitud y curvatura que el pliegue que deforma al cabalgamiento de Somiedo; ello implica un considerable reapretamiento de dicho anticlinal, originalmente Varisco, en tiempos Alpinos.

Palabras clave: Formación Voznuevo, Zona Cantábrica**,** deformación Alpina, deformación Varisca, reactivación de estructuras.

Abstract: *In the Babia region, Cretaceous sands and clays (Voznuevo Fm, Utrillas facies) and carbonate breccias of probable Cenozoic age underlie one of the most important Variscan tectonic units of the Cantabrian Zone (the Somiedo Nappe). This occurrence allows us to know the features of the Alpine deformation in this sector of the Cantabrian Mountains. The aforementioned succession, about 250 meters thick, consists of sands and clays of the Utrillas facies disconformably overlain by disorganized to graded-stratified breccias and conglomerates. The Alpine thrust overlying the Cretaceous-Cenozoic succession is subparallel to the Variscan Somiedo Thrust, which it cuts slightly along its trace. It also truncates the Villasecino anticline, which folds the Somiedo Thrust. However, the Alpine thrust is also folded by the Villasecino anticline with a lower amplitude and curvature in the hinge zone than the fold deforming the Somiedo Thrust. This implies tightening of the Villasecino anticline, originally Variscan, in Alpine times.*

Key words: *Voznuevo Formation, Cantabrian Zone, Alpine deformation, Variscan deformation, reactivation of structures*.

INTRODUCCIÓN

El área estudiada se sitúa en la zona más externa del Macizo Varisco Ibérico, conocida como Zona Cantábrica (Fig. 1). Durante la orogenia Alpina el basamento paleozoico de dicha zona fue levantado e incorporado a la cordillera Cántabro-Pirenaica. Sobre la sucesión del Precámbrico-Paleozoico se apoyan discordantemente rocas permo-mesozoicas y cenozoicas en los bordes norte, este y sur de la Zona Cantábrica, lo que permite comparar las estructuras variscas y alpinas en dichos sectores (Pulgar et al., 1999). Sin embargo, los afloramientos mesozoico-terciarios son una excepción en el interior del gran afloramiento de materiales paleozoicos (Alonso et al., 2007; de Vicente et al., 2007), lo que da lugar a una gran incertidumbre cuando tratamos de determinar la deformación Alpina que afecta a la estructura del basamento paleozoico.

El objetivo de este artículo es describir una sucesión sedimentaria de la Fm Voznuevo (Evers, 1967, facies Utrillas, Cretácico), seguida de brechas carbonatadas posiblemente cenozoicas, situada en las inmediaciones de la localidad de Robledo de Babia (Fig. 2). Además, se describe su contexto estructural, con el fin de determinar las características de la deformación Alpina y Varisca en dicha área. Este afloramiento de materiales mesozoicos fue representado en la hoja 1:200.000 de

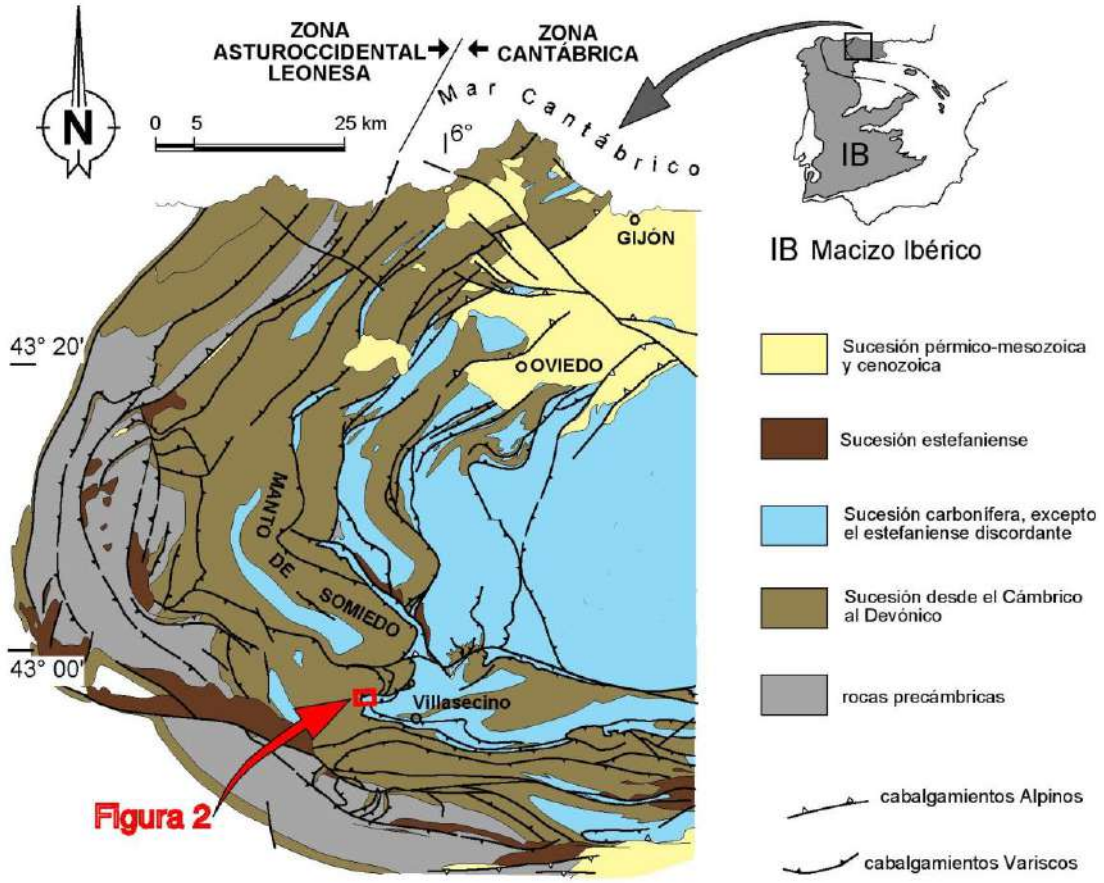


FIGURA 1. *Esquema geológico del sector occidental de la Zona Cantábrica mostrando la ubicación del área estudiada.*

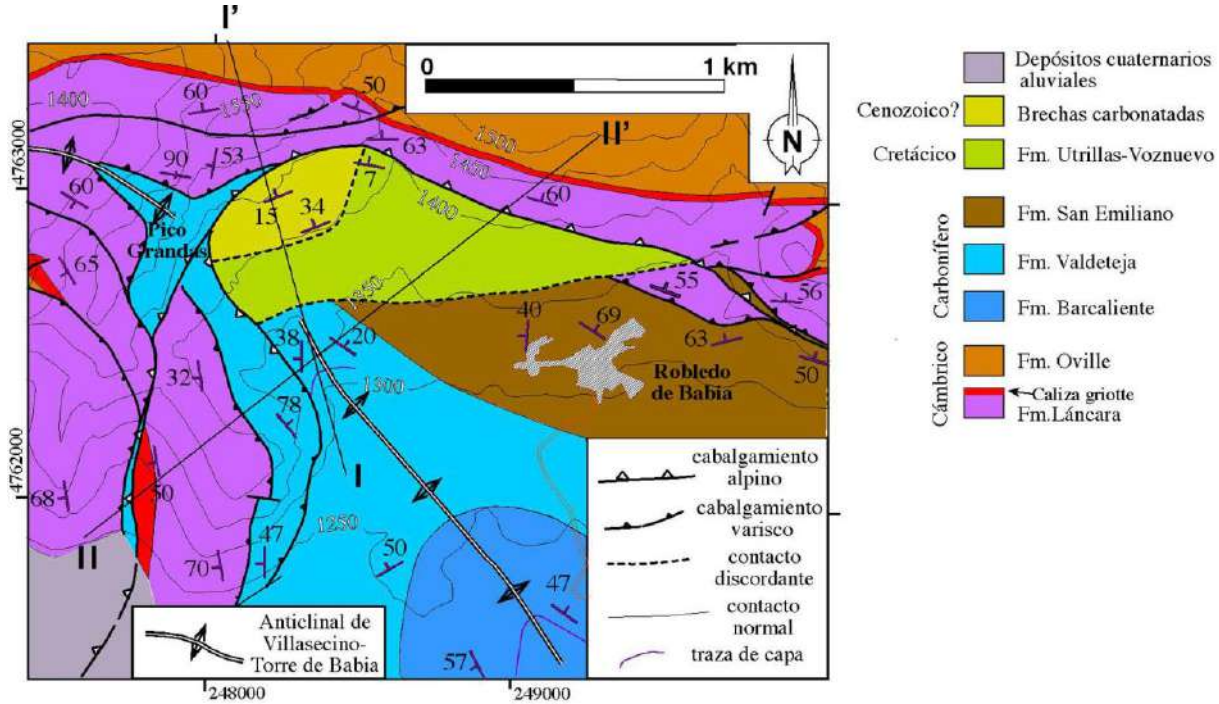


FIGURA 2. *Mapa geológico del área señalada con marco rojo en la figura 1 mostrando la ubicación de los cortes geológicos I-I' y II-II' de la figura 5*

Cangas de Narcea (Alonso et al., 2023), cuyo mapa se realizó entre 2005-2010, pero por razones de escala y por sus implicaciones tectónicas era conveniente una descripción más detallada. También está representado en De Paz-Álvarez (2023).

ESTRATIGRAFÍA

Los depósitos con facies Utrillas aparecen de modo fragmentario, en pequeños afloramientos de arenas y arcillas muy meteorizadas, sin estructuras sedimentarias visibles (Fig. 3). Las arenas, de colores blanquecinos a

rojizos, presentan dos facies. La primera es de arenas de grano grueso, mal calibradas, con clastos de cuarzo bien redondeados de hasta 1,5 cm de diámetro (Fig. 3A), aunque localmente se observan clastos sueltos de hasta 3-4 cm. Los clastos están flotando en la matriz arenosa o formando delgados niveles de ortoconglomerados. La segunda es de arenas de grano medio a fino, las más finas algo arcillosas. Las arcillas son masivas y de colores rojizos. El conjunto de la sucesión, de unos 125 m de espesor parece organizarse en varios ciclos granodecrecientes desde arenas hasta arcillas (Fig. 3B).

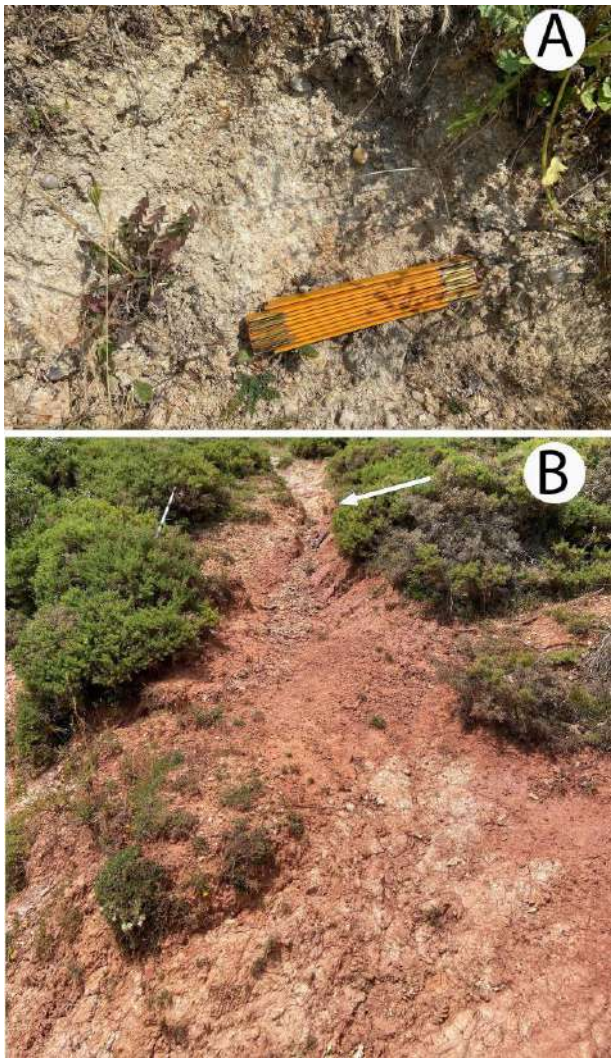


FIGURA 3. (A) *Arenas gruesas con gravas de cuarzo.* (B) *Vista de un ciclo desde arenas blanquecinas hasta arcillas rojizas. Su techo bajo las arenas del siguiente ciclo es visible por el cambio brusco de color (flecha).*

La sucesión cenozoica, de unos 125 m de espesor mínimo y base disconforme, está constituida por brechas a conglomerados con clastos de rocas carbonatadas. La parte inferior la integran capas métricas mal definidas de brechas a conglomerados con clastos de tamaño hasta métrico, principalmente de dolomías de la Fm. Láncara, en una matriz de grano fino. Hacia la parte superior, estas son sustituidas por brechas a conglomerados clasto-soportados, con clastos de calizas de la Fm. Valdeteja de hasta 7-10 cm, bien calibrados, y dispuestos principalmente paralelos a la estratificación. Los espacios entre los clastos se hallan abiertos o rellenos por una matriz carbonatada de grano fino. Se organizan en capas lateralmente continuas, de base plana y de espesor decimétrico a métrico, gradadas a groseramente laminadas; en su parte inferior presentan porosidad abierta y en la superior, cerrada por la matriz (Fig. 4). Estos rasgos sugieren un depósito de la sucesión cenozoica por flujos gravitacionales que evolucionan a flujos más diluidos, posiblemente flujos acuosos de carácter tractivo, no confinados, muy probablemente rellenando un paleovalle.



FIGURA 4. *Brechas/conglomerados calcáreos. Se observa la geometría de las capas y su fábrica con porosidad intergranular abierta en la parte inferior de las capas y con matriz carbonatada de grano fino en la parte alta de las mismas*.

ESTRUCTURA

La disposición estructural de los depósitos cretácicos y de los presumiblemente cenozoicos se muestra en el mapa de la figura 2 y en los cortes geológicos de la figura 5. Estos depósitos se apoyan en discordancia angular sobre las formaciones paleozoicas, inclinándose hacia el NO o NE con un valor máximo de unos 35º, aunque el buzamiento suele ser bastante menor (Fig. 2 y 5). En el mapa aparecen dos tipos de cabalgamientos. Un primer cabalgamiento, mas antiguo, coloca las dolomías y calizas cámbricas de la Fm. Láncara sobre la sucesión del Carbonífero; se trata del denominado Cabalgamiento de Somiedo (Julivert et al., 1968). La dirección de transporte de este cabalgamiento y sus imbricados ha sido estimada hacia el ENE (De Paz-Álvarez, 2023). Un segundo cabalgamiento corta al de Somiedo y cobija la sucesión mesozoica-cenozoica (Fig. 2 y 5). Ambos cabalgamientos están plegados por el anticlinal de Villasecino, aunque con diferentes grados de apretamiento, de modo que el cabalgamiento alpino corta ambos flancos de dicho anticlinal en la charnela del Pico Grandas y, sin embargo, se encuentra plegado por el mismo anticlinal (Fig. 2 y 5B). El cabalgamiento alpino corta al de Somiedo generalmente con mayor ángulo, dando lugar a la duplicación de la Fm. Láncara y la sucesión carbonífera (Fig. 2 y 5B). No obstante, a veces corta con menor ángulo dando lugar a la omisión de parte de la Fm. Láncara.

Respecto a la dirección de transporte tectónico del cabalgamiento alpino en el área representada en la Fig.

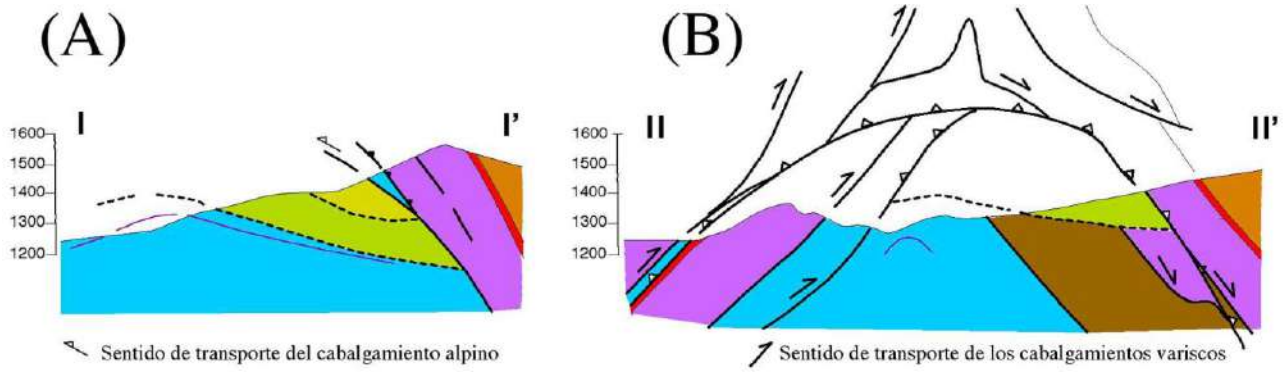


FIGURA 5. *Cortes geológicos cuya localización se muestra en la figura 2. El (A) está trazado aproximadamente en la dirección de transporte alpino y el corte (B) en la dirección de transporte varisca. Leyenda como en la figura 2.*

2 es desconocida. No obstante, en un área contigua situada unos 2 kilómetros hacia este, Caldera (2016) obtuvo dos direcciones de movimiento en el cabalgamiento de Somiedo, una primera hacia el NE, coherente con las direcciones de transporte variscas y una segunda hacia el sur, que atribuyó a la reactivación alpina del cabalgamiento varisco. Si extrapolamos esa dirección de movimiento alpino hacia el oeste de Robledo, este podría tener unos valores mínimos de unos 500 metros desplazamiento y 300 metros de salto (Fig. 5A).

CONCLUSIONES

En las inmediaciones de Robledo de Babia se ha reconocido un afloramiento de arenas con cantos y arcillas de la Fm Voznuevo (facies Utrillas), seguida en modo disconforme por brechas carbonatadas que pueden atribuirse al Cenozoico. Esta sucesión buza hacia el N ó NO y está cobijada por un cabalgamiento alpino que discurre subparalelo al cabalgamiento varisco de Somiedo. La relación estructural de los cabalgamientos alpino y varisco con el Anticlinal de Villasecino nos ilustra sobre la historia alpina de este área de la Cordillera Cantábrica. Aunque el cabalgamiento alpino trunca dicho anticlinal, cortando sus dos flancos, ambos cabalgamientos, varisco y alpino, están plegados con diferente grado de apretamiento. El pliegue del cabalgamiento alpino tiene menor amplitud y curvatura en la zona de charnela, lo que implica un considerable reapretamiento de dicho anticlinal, originalmente varisco, en tiempos cenozoicos. El reapretamiento de los pliegues variscos durante la deformación alpina ha sido descrito también en otros sectores de la Zona Cantábrica en donde la cobertera mesozoica se encuentra mejor preservada (Pulgar et al., 1999) y en otras cordilleras alpinas como la Ibérica (Casas et al., 2000) y el Sistema Central (Díez Fernández et al., 2024), por lo que probablemente es un proceso más común de lo que aparece en la literatura geológica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de los trabajos de campo y preparación del manuscrito a los proyectos GRUPINIDI/2018/000216, CGL2017-86487-P y SV-PA-21-AYUD/2021/51293.

REFERENCIAS

Alonso J.L., Martínez Abad, I. y García-Ramos, J.C. (2007): Nota sobre la presencia de una sucesión cretácica en el Macizo de Las Ubiñas (Cordillera Cantábrica). Implicaciones tectónicas y geomorfológicas. *Geogaceta*, 43: 47-50.

Alonso, J.L., Marcos, A., García Sansegundo, J. y Heredia, N. (2023): *Mapa Geológico de España 1:200.000, hoja nº 10 (Cangas de Narcea)*. IGME, Madrid.

Caldera, N. (1987): *Geometría, cinemática y rocas de falla en la parte basal del Manto de Somiedo (Región de Babia, noroeste de España)*. Tesis Fin de Máster, Univ. de Oviedo, 42 p.

Casas, A.M., Cortés, A.L., Maestro, A. (2000). Intra-plate deformation and basin formation during the Tertiary within the Northern Iberian plate: origin and evolution of the Almazán Basin. *Tectonics*, 19: 258–289.

De Paz-Álvarez, M.I. (2023): *Deformación y rocas de falla en las zonas de cizalla basales de los mantos cantábricos*. Tesis Doctoral, Univ. de Oviedo, 441 p.

De Vicente, G., González-Nistal, S., Muñoz-Martín, A., Vegas, R., Olaiz, A., Fernández-Lozano, J. y De Vicente, R. (2007): El cabalgamiento cenozoico de Boinás (Cordillera Cantábrica, España). *Geogaceta*, 42: 7-10.

Díez Fernández, R., de Vicente, G., Moreno Martín, D., Fernández, C., Arenas, R. and Rubio Pascual, F.J. (Aceptado, en revisión). Mega-folding of a crystalline basement during incipient intra-plate continental subduction (Alpine Central Iberia). Tectonics.

Evers, H.J. (1967): Geology of the Leonides between the Bernesga and Porma Rivers, Cantabrian Mountains, NW Spain. *Leidse Geologische Mededelingen*, 41, 83-151

Julivert, M., Pello, J. y Fernández-García, L. (1968): La estructura del Manto de Somiedo (Cordillera Cantábrica). *Trab. Geol., Univ. Oviedo*, 2: 1-44.

Pulgar, J.A., Alonso, J.L., Espina, R.G., y Marín, J.A., (1999): La deformación alpina en el basamento varisco de la Zona Cantábrica *Trabajos de Geología* 21: 283–294.

Análisis estructural de la Falla de Santa María del Espino (Rama Castellana, Cordillera Ibérica): Transpresión debida a convergencia en dirección NNO-SSE.

Structural analysis of the Santa María del Espino Fault (Castilian Branch, Iberian Chain): Transpression due to NNW-SSE-oriented convergence.

J. Alonso-Henar[1], C. Fernández[1], G. de Vicente[1], A. Muñoz-Martín[1], A. Olaiz[2]

1 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. c/José Antonio Novais, 12, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid. jahenar@geo.ucm.es; gdv@geo.ucm.es; cafern08@geo.ucm.es; amunoz@geo.ucm.es.
2 Repsol E&P, C/ Mendez Álvaro, 44. 28045 Madrid. antoniojose.olaiz@repsol.com

Resumen: La Falla de Santa María del Espino se localiza en la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica (CI). Se orienta en dirección NO-SE, buzando hacia el SO. Superpone, en su parte central, el basamento Paleozoico (pizarras y cuarcitas del Ordovícico y pizarras del Silúrico) sobre los materiales sedimentarios del Triásico (areniscas, arcillas y conglomerados del Buntsandstein). Se ha determinado la orientación y cinemática de las estructuras generadas por la falla en ambos bloques, que incluyen pliegues a distintas escalas, *kink bands* y un conjunto de fallas menores. Se han aplicado distintas técnicas de análisis estructural con objeto de determinar tanto la cinemática de la falla principal como la orientación de los ejes principales del esfuerzo. El resultado muestra la actuación de una transpresión lateral derecha triclínica, con una vorticidad cercana a la transición entre el dominio de la cizalla pura y de la cizalla simple, y una convergencia NNO-SSE entre los bloques separados por la falla. La máxima compresión horizontal (σ_1) se sitúa en dirección NO-SE. Estos resultados confirman la naturaleza transpresiva de las estructuras de la Rama Castellana de la CI.

Palabras clave: Falla de Santa María del Espino, Rama Castellana, Cordillera Ibérica, transpresión dextral, convergencia NNO-SSE**.**

Abstract: *The Santa María del Espino Fault is located in the Castilian Branch of the Iberian Chain (IC). It is oriented in a NW-SE direction, dipping towards the SW. It superimposes, in its central part, the Paleozoic basement (slates and quartzites from the Ordovician and Silurian slates) on Triassic sedimentary materials (sandstones, clays and conglomerates from the Buntsandstein). The orientation and kinematics of the structures generated by the fault in both blocks have been determined, which include folds at different scales, kink bands, and a set of minor faults. Different structural analysis techniques have been applied to determine both the kinematics of the main fault and the orientation of the main stress axes. The result shows the activity of a triclinic dextral transpression, with a vorticity close to the transition between the pure shear- and simple shear-dominated fields, and an NNW-SSE convergence between the blocks separated by the fault. The azimuth of the maximum horizontal compression (σ_1) is NW-SE. These results confirm the transpressive nature of the main structures of the Castilian Branch of the IC.*

Key words: *Santa María del Espino Fault, Castilian Branch, Iberian Chain, dextral transpression, NNW-SSE-oriented convergence.*

INTRODUCCIÓN Y SITUACIÓN GEOLÓGICA

La Cadena Ibérica (CI) es el resultado, durante el Cenozoico, de la inversión tectónica de la Cuenca Ibérica, en la que se habían desarrollado una serie de *grabens* Pérmico-Mesozoicos. Los procesos extensionales tuvieron lugar en dos pulsos: en el Triásico Inferior y en el Cretácico Medio-Superior (p.ej. Van Wees et al., 1998). Hay dos modelos opuestos para explicar la arquitectura contractiva de la CI: como un cinturón de pliegues y cabalgamientos intraplaca (p.ej. Guimerà, 2018) o como cinturones transpresivos NO-SE (las Ramas Aragonesa y Castellana) que conectan grandes cabalgamientos E-O (Cameros-Demanda y Montalbán) (p.ej. de Vicente et al., 2019). La importancia de las fallas en dirección en el desarrollo de la CI fue ya puesta en evidencia por estudios muy tempranos (p.ej. Colomer y Santanach (1988) y ampliamente documentada para la Rama Castellana (de Vicente et al., 2009). En este trabajo, analizaremos la cinemática y la dinámica de una de las grandes estructuras de esta Rama, la Falla de Santa María del Espino (FSME), de dirección NO-SE, con tramos orientados E-O, que superpone el basamento Varisco sobre materiales mesozoicos. Contribuiremos, así, a dilucidar entre los dos modelos de deformación contractiva propuestos. La FSME se sitúa en la provincia de Guadalajara, en la mitad septentrional de la Rama Castellana de la CI y al E de la terminación nororiental de la Cuenca Cenozoica de Madrid (Fig. 1).

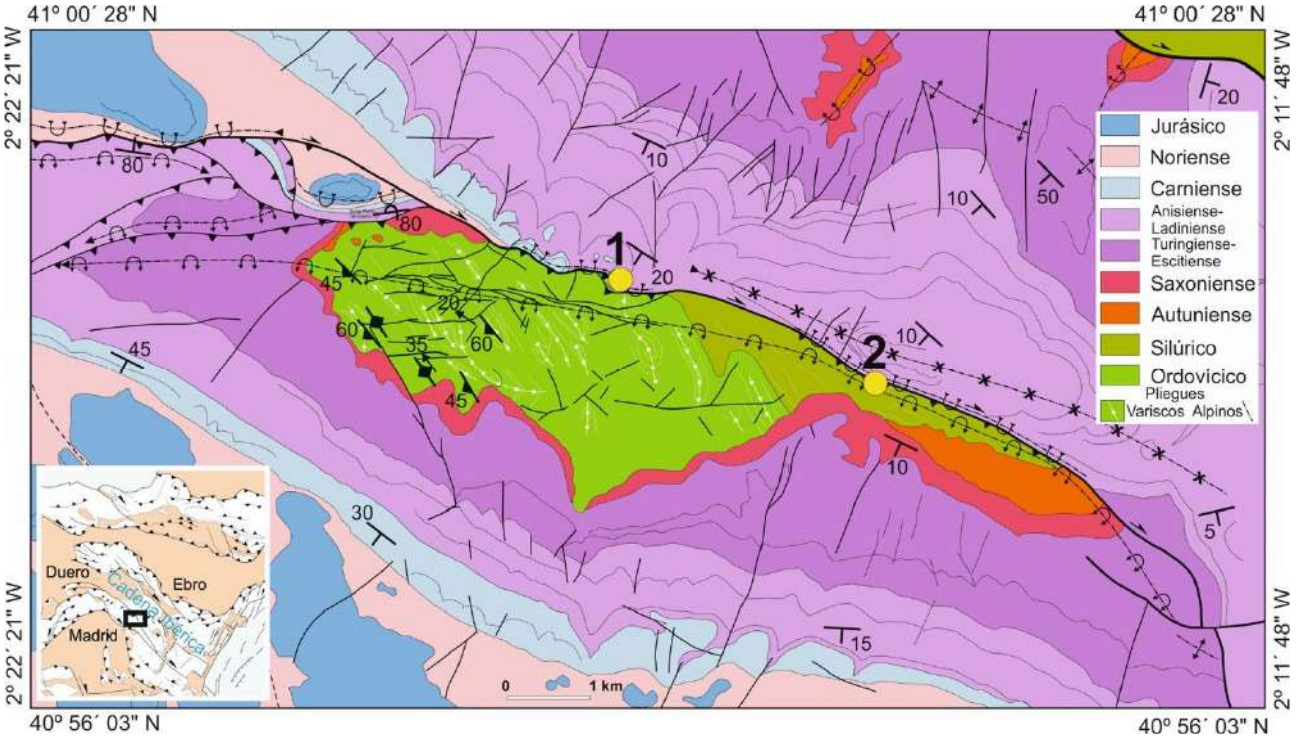


FIGURA 1. *Esquema geológico de la FSME (Rama Castellana de la CI). La situación geológica general se muestra mediante un rectángulo azul en el recuadro de la parte inferior izquierda. Las líneas finas representan trazas de capas. Los puntos 1 y 2 señalan la posición de las estaciones de toma de datos estructurales utilizados en el análisis cinemático de la falla. Pérmico y Triásico modificado de Ramos (1979).*

DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL

La FSME, con unos 15 km de longitud, se orienta en dirección NO-SE con segmentos E-O y NNO-SSE, buzando entre 50º y 70º hacia el SO (Fig. 2). Ha sido descrita clásicamente como una falla inversa, que superpone en su parte central materiales del basamento varisco (ordovícicos y silúricos) sobre sedimentos mesozoicos, principalmente del Triásico (Figs. 1 y 2).



FIGURA 2. *Aspecto de campo de la traza principal de la FSME, poniendo en contacto pizarras y cuarcitas del Ordovícico superior (derecha) con conglomerados, areniscas y arcillas de la facies Buntsandstein (izquierda). A un lado y otro las rocas afectadas muestran zonas de deformación con desarrollo de diversos tipos de estructuras (ver texto principal).*

En el extremo noroccidental de la falla se observa un tramo con orientaciones E-O, apareciendo dúplexes y una ramificación de tipo *splay*. En el extremo suroriental la falla se incurva hacia una dirección NNO-SSE, disminuyendo la separación y generándose una terminación con fracturas escalonadas.

Con objeto de obtener una descripción lo más completa posible de la falla, se han realizado dos estaciones de toma de datos estructurales (Fig. 1, estaciones 1 y 2). Además del plano de falla principal (Fig. 2, estación 1), se observan numerosas fallas menores asociadas. Los criterios cinemáticos de todas ellas indican un deslizamiento oblicuo, con una componente lateral derecha, además de la componente inversa en buzamiento (Fig. 3A, estación 1). Aparte del propio plano de falla, marcado por la presencia de una roca de falla de varios decímetros a unos pocos metros de grosor, se observa una zona de deformación que afecta tanto al basamento varisco como a la cobertera mesozoica, y que presenta decenas a centenares de metros de potencia. Entre las estructuras asociadas al movimiento de la falla, en la zona de deformación mencionada, se puede citar la aparición de pliegues alpinos afectando al basamento varisco. Estos pliegues presentan una longitud de onda decamétrica a centimétrica, tendiendo a ser angulares y asimétricos. Sus charnelas se presentan dispersas, variando entre verticales a ligeramente inclinadas hacia el ENE, con escasas diferencias entre las desarrolladas en pizarras y en cuarcitas del Ordovícico (Fig. 3B, estación 1). Por su parte, las pizarras del Silúrico muestran sistemas de *kink bands*, mayoritariamente con asimetría en S, cuyos ejes se inclinan fuertemente hacia el SO (Fig. 3C, estación 2). En lo referente a los materiales del Buntsandstein, sus superficies de estratificación forman en las cercanías de la falla sinclinales de longitud de onda hectométrica a kilométrica, con charnelas subhorizontales, de dirección NO-SE (Figs. 1 y 3D, estaciones 1 y 2). Es habitual que el flanco sur de los sinclinales esté verticalizado, e incluso aparezca invertido junto a la falla, afectado por numerosas fallas menores que producen repeticiones e imbricaciones tectónicas de los distintos niveles estratigráficos.

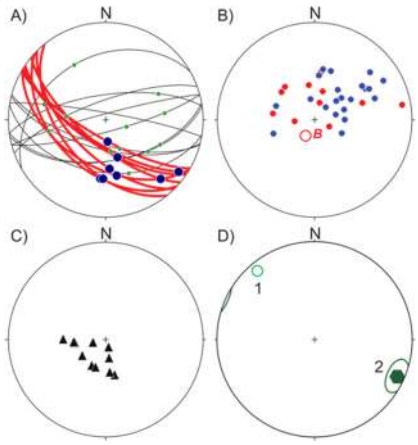


FIGURA 3. *Orientación de las principales estructuras asociadas a la FSME medidas en las estaciones 1 y 2. Proyección equiareal, hemisferio inferior. A) Planos de falla (círculos mayores) y estrías (puntos) en la estación 1. Las asociadas al plano de falla principal se muestran en rojo y las estrías en azul. Los planos secundarios en negros y las estrías en verde. En todos los casos la componente de desplazamiento en buzamiento es inversa. B) Líneas de charnela de pliegues centimétricos a decimétricos en los materiales ordovícicos (cuarcitas, en rojo, pizarras en azul), estación 1. El círculo rojo marcado con la letra B indica la orientación del eje estadístico de un pliegue decamétrico. C) Ejes de* kink bands *afectando a las pizarras silúricas en la estación 2. D) Ejes estadísticos de los pliegues del Buntsandstein en las estaciones 1 y 2.*

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA FALLA

Análisis cinemático:

De acuerdo con las características estructurales de la FSME, ha sido posible efectuar un estudio cinemático de su zona de deformación mediante el modelo analítico de zonas de cizalla presentado por Fernández y Díaz Azpiroz (2009). Los datos tomados en la estación 1 (Figs. 1, 2 y 3) han permitido obtener una orientación media para el plano de falla de N130ºE/70ºSO, con un cabeceo de 63º al SE para la estría promedio (componente de cizalla simple, Fig. 4A). El desplazamiento en la zona de deformación es inverso-dextral. Los datos disponibles han sido comparados con un modelo de transpresión (que incluye la cizalla simple como un caso extremo), por lo que se ha asumido la posible actuación de una componente coaxial de cizalla pura. Se han explorado siete posibles orientaciones de la dirección de máximo estiramiento (dirección de extrusión) de la componente coaxial (Fig. 4A). Finalmente, para considerar la vorticidad del flujo se han tenido en cuenta hasta nueve valores del número de vorticidad cinemático (W_k = 0.1, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.81, 0.9, 0.99, 0.9999). El modelo analítico permite predecir las orientaciones teóricas de los pliegues generados tanto en el basamento varisco como en la cobertera triásica, que variarán de acuerdo con la orientación inicial de las superficies plegadas (distintas en el Paleozoico –N128ºE/62ºNE–, y en el Buntsandstein –sub-horizontales) y con el valor concreto asignado a las variables del modelo (dirección de extrusión, valor de vorticidad y magnitud de la deformación finita). Estas predicciones son comparadas con los datos medidos en las estaciones 1 y 2 (Fig. 3), lo que permite constreñir el rango de condiciones cinemáticas que explican la deformación observada y, en su caso, llegar a establecer la dirección de convergencia entre los bloques separados por la falla. En este trabajo sólo se muestran los resultados con los que se han obtenido los mejores ajustes entre el modelo cinemático y los datos observados (Fig. 4). Las predicciones del modelo para un cabeceo de la dirección de extrusión de 150º (Fig. 4A) suponen un ajuste del 80% de los pliegues del Ordovícico, con más del 60% de los datos explicados con las trayectorias correspondientes a vorticidades de entre 0.6 y 0.9999 (Fig. 4B). Por su parte, los pliegues que afectan a los materiales triásicos (al menos en la estación 2) se pueden ajustar con valores similares de las variables del modelo y números de vorticidad de entre 0.6 y 0.9 (Fig. 4C). Conjuntamente, todas estas estructuras pueden explicarse mediante una zona de cizalla transpresiva ligeramente triclínica, con un cabeceo de la dirección de extrusión de 150º (aunque es posible también obtener ajustes razonables con cabeceos de hasta 170º) y valores de W_k en el rango de 0.7 a 0.9.

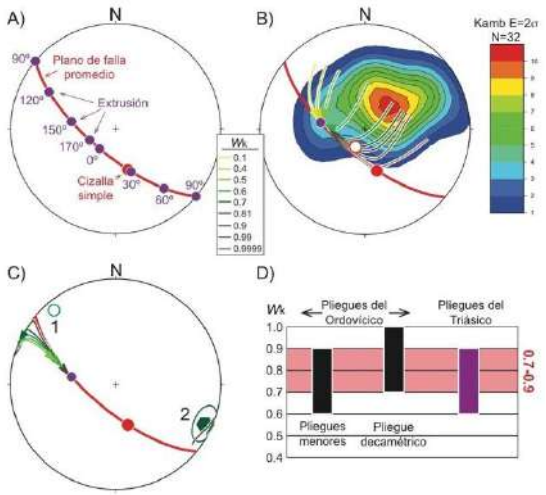


FIGURA 4. *(A) Orientación promedio de la FSME (círculo mayor rojo) y de la dirección de cizalla simple (punto rojo), así como las diferentes posiciones de la dirección de extrusión (puntos morados) considerados en el modelo cinemático. (B) Diagrama de densidad de las charnelas de los pliegues menores del Ordovícico y posición del pliegue decamétrico (círculo blanco con borde rojo) sobre los que se han representado los resultados del modelo cinemático para un cabeceo de la extrusión de 150º y distintos valores de* W_k. *(C) Orientación de los ejes estadísticos de los pliegues del Buntsandstein en las cercanías de la falla para las estaciones 1 y 2 (en ésta última se representa también un cono de confianza al 95%), junto con las trayectorias predichas por el modelo bajo las mismas condiciones que en la Figura 4B (*W_k *sólo entre 0.5 y 0.9). (A) a (C): Proyección equiareal, hemisferio inferior. (D) Valores del número de vorticidad que producen los mejores ajustes entre el modelo y la realidad para los distintos tipos de estructuras analizadas.*

Análisis dinámico:

Los *kink bands* que afectan a las pizarras del Silúrico en la estación 2 han sido analizados para determinar la orientación de los ejes principales del esfuerzo (método de Ramsay y Huber, 1987) responsables de su formación. El resultado obtenido (Fig. 5A) indica una orientación NO-SE, horizontal, para el máximo esfuerzo compresivo (σ_1). Por su parte, la inversión de esfuerzos sobre la muestra de fallas de la estación 1 (Fig. 3A), de acuerdo con el método propuesto por Reches et al., (1992), que es uno de los más restrictivos y obliga a los planos de falla a vencer la resistencia friccional, muestra la misma

disposición de Δ_1 (Fig. 5B). El cálculo de la apófisis oblicua de flujo para los resultados óptimos del modelo cinemático sugiere una dirección de convergencia NNO-SSE para los bloques separados por la FSME (Fig. 5C). Finalmente, los resultados del modelo analítico apuntan a una transpresión triclínica en el límite entre el dominio de la cizalla simple y la cizalla pura (Fig. 5D).

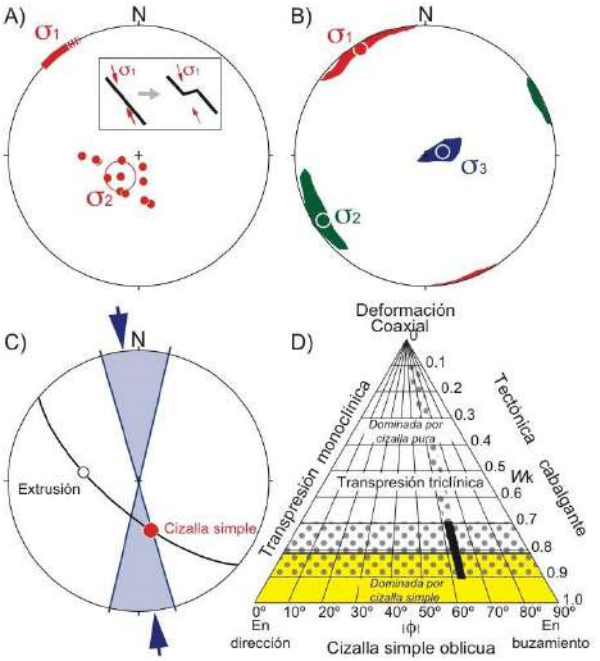


FIGURA 5. *(A) Determinación de los ejes principales del esfuerzo a partir de los* kink bands *medidos en la estación 2. (B) Estimación de la orientación de los ejes principales del esfuerzo mediante el análisis poblacional de las fallas de la estación 1. (C) Rango de orientaciones del vector de convergencia entre los bloques separados por la FSME calculado a partir del modelo cinemático (vectores azules: mejor estimación). (A) a (C), proyección equiareal, hemisferio inferior. (D) Diagrama triangular de transpresión indicando la posición de la zona de deformación de la FSME (línea negra gruesa).*

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados del modelo cinemático indican una convergencia en dirección N-S a NNO-SSE para los bloques separados por la FSME. La cinemática de la falla sería transpresiva triclínica (con un ángulo de deflexión cercano a los 70º), de componente horizontal derecho de movimiento horizontal, con un flujo en el límite entre el predominio de la cizalla simple y el de la cizalla pura. Hay una diferencia de unos 20º a 30º entre la dirección de convergencia obtenida mediante el estudio cinemático y la orientación de Δ_1 obtenida del estudio de los *kink bands* y de la orientación de los esfuerzos principales a partir del análisis poblacional de fallas. Se hace notar que la dirección de convergencia es la apófisis oblicua del flujo, no la dirección de máximo acortamiento infinitesimal. Por otro lado, es esperable una reorientación de Δ_1 en las cercanías de la falla. La representación de la dirección de convergencia en un mapa regional (Fig. 6) muestra cómo el estudio detallado, cinemático y dinámico de la FSME coincide plenamente con los modelos que proponen una evolución transpresiva para la Rama Castellana de la CI.

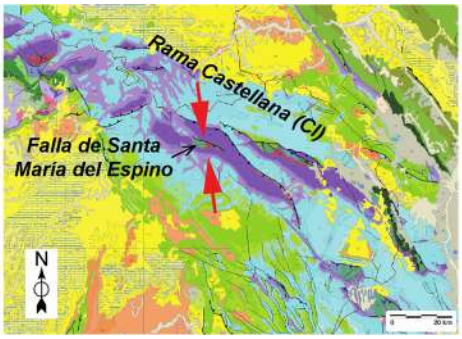


FIGURA 6. *Esquema geológico de la parte central de la Rama Castellana de la CI mostrando la dirección de convergencia (flecha roja) obtenida en este trabajo (cartografía geológica: Visor IGME, descarga 21 de enero de 2024).*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación de los siguientes proyectos: PGC2018-095999-B-I00, PID2021-124155NB-C31 y PID2021-126347NB-IOO

REFERENCIAS

Colomer, M. y Santanach, P. (1988): Estructura y evolución del borde sur-occidental de la Fosa de Calatayud-Daroca. *Geogaceta*, 4: 29-31.

de Vicente, G., Vegas, R., Muñoz-Martín, A., Van Wees, J.D., Casas-Sáinz, A., Sopeña, A., Sánchez-Moya, Y., Arche, A., López-Gómez, J., Olaiz, A. y Fernández-Lozano, J. (2009): Oblique strain partitioning and transpression on an inverted rift: The Castilian Branch of the Iberian Chain. *Tectonophysics*, 465: 224-242. doi: 10.1016/j.tecto.2008.11.003

de Vicente, G., Casas-Sainz, A. y Vegas, R. (2019): The Iberian Chain and the Catalan Coastal Ranges. En: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach* (J.J. Álvaro, C. Quesada y J.T. Oliveira, eds.). Regional Geology Reviews v. 3,512-518.

Fernández, C. y Díaz Azpiroz, M. (2009): Triclinic transpression zones with inclined extrusion. *Journal of Structural Geology*, 31: 1255-1269.

Guimerà, J. (2018): Structure of an intraplate fold-and-thrust belt: The Iberian Chain. A synthesis. *Geologica Acta*, 16: 427-438.

Ramos, A. (1979): Estratigrafía y paleogeografía del Pérmico y Triásico al oeste de Molina de Aragón (prov. De Guadalajara). Tesis, Universidad Complutense de Madrid, 313 pp.

Ramsay, J.G. y Huber, M.I. (1987): *The techniques of Modern Structural Geology. Volume 2: Folds and Fractures*. Academic Press, London, 391 p.

Reches, Z., Baer, G. y Hatzor, Y. (1992): Constraints on the strength of the Upper Crust from stress inversion of fault slip data. *Journal of Geophysical Research,* 97: 12.481-12.493.

Van Wees, J.D., Arche, A., Beijdorff, C.G., Lopez-Gomez, J. Y Cloetingh, S. (1998): Temporal and spatial variations in tectonic subsidence in the Iberian Basin (E Spain). *Tectonophysics*, 300: 285–310.

Transpresión no estacionaria

Unsteady transpression

J. Alonso-Henar[1], C. Fernández[1] y M. Díaz-Azpiroz[2]

1 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. c/José Antonio Novais, 12, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid. jahenar@geo.ucm.es; cafern08@geo.ucm.es.
2 Dpto. de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide. Crtra. Utrera, km 1, 41013 Sevilla. mdiaazp@upo.es.

Resumen: La naturaleza suele seguir historias de deformación no estacionarias. Refiriéndonos a una zona de transpresión, es esperable que la vorticidad del flujo varíe no sólo en el espacio, sino también en el tiempo. En este trabajo se presenta un estudio de flujos no estacionarios que considera dos casos extremos ideales: uno en el que la vorticidad se incrementa con el tiempo (*Tipo i*), y otro en el que disminuye (*Tipo d*). En ambas situaciones se simula la evolución de una zona de transpresión monoclínica, vertical, con movimiento lateral izquierdo y extrusión vertical, considerándose además los cuatro tipos básicos de desarrollo de zonas de cizalla según Fossen y Cavalcante (2017). La vorticidad se ha hecho variar en el modelo desde 0 (cizalla pura) hasta 1 (cizalla simple) o viceversa. Los resultados muestran que, en muchos casos, las fábricas resultantes son difícilmente distinguibles de las de un flujo estacionario. Hay situaciones, sin embargo, en las que el patrón de la foliación, la orientación de las lineaciones de estiramiento, o una magnitud anormalmente alta de la no coaxialidad local pueden ser criterios del carácter no estacionario del flujo.

Palabras clave: Transpresión; flujo no estacionario; vorticidad; no coaxialidad; sigmoides de la foliación.

Abstract: *Nature usually follows unsteady deformation histories. Concerning transpression zones, it is expected that the vorticity of the flow will vary not only in space but also in time. In this work, a study of unsteady flows is presented that considers two ideal extreme cases: one in which the vorticity increases with time (*Type i*), and another in which it decreases (*Type d*). In both situations, the evolution of a monoclinic, vertical transpression zone is simulated, with left lateral movement and vertical extrusion, also considering the four basic types of shear zone development according to Fossen and Cavalcante (2017). Vorticity has been varied in the model from 0 (pure shear) to 1 (simple shear) or vice versa. The results show that, in many cases, the resulting fabrics are difficult to distinguish from those of a steady flow. There are situations, however, in which the pattern of foliation, the orientation of stretching lineations, or an abnormally high magnitude of local non-coaxiality may be criteria for the unsteady character of the flow.*

Key words: *Transpression; unsteady flow; vorticity; non-coaxiality; foliation sigmoids.*

INTRODUCCIÓN

La transpresión se conoce como la convergencia oblicua de dos bloques corticales (Harland, 1971), aunque, posteriormente la transpresión cinemática es definida por Sanderson y Marchini (1984) como "cizalla transcurrente acompañada de acortamiento horizontal y estiramiento vertical a lo largo del plano de cizalla". A medida que se amplía el conocimiento sobre la transpresión, se hace énfasis en la relevancia que tiene el estudio de la deformación progresiva para una correcta interpretación de las estructuras geológicas (Fossen et al., 2019). Además, modelos analíticos cada vez más sofisticados y con más grados de libertad son capaces de explicar un rango muy amplio de observaciones en las zonas de cizalla: desde los modelos de Ramsay y Graham (1970) para la cizalla simple, pasando por los de transpresión monoclínica de Sanderson y Marchini (1984) o Fossen y Tikoff (1993), hasta los modelos con simetrías triclínicas de Lin et al. (1998) y Fernández y Díaz-Azpiroz (2009). Todos estos modelos son usados satisfactoriamente para explicar la cinemática de numerosas zonas de cizalla, asumiendo una deformación estacionaria y homogénea. Sin embargo, las variaciones tanto en el tiempo como en el espacio durante el desarrollo de la deformación en las zonas de cizalla producen heterogeneidades que inducen flujos no estacionarios. Revisiones actualizadas sobre el concepto y aplicación de la deformación progresiva enfatizan la importancia de ésta, generalmente no estacionaria, como posible alternativa a la explicación clásica basada en la superposición de distintas fases de deformación (Fossen et al., 2019).

En este estudio abordamos el problema de los flujos no estacionarios desde un punto de vista analítico y proponemos una serie de evidencias que pueden ayudar a entender su naturaleza. Nos centramos en la influencia que tienen variaciones infinitesimales, pero constantes, de los ejes de deformación instantánea en las deformaciones finitas, en la forma y orientación de los elipsoides de deformación finita y en las geometrías y orientaciones de los principales elementos de la fábrica a meso-escala que cabría esperar en zonas de cizalla.

METODOLOGÍA

Se ha considerado un flujo sencillo, monoclínico, asociado a una zona de cizalla vertical y con movimiento horizontal de los bloques implicados (Fig. 1). El flujo dentro de la zona de cizalla es la suma del flujo no coaxial (cizallamiento simple, lateral izquierdo en este caso) y una componente coaxial (cizallamiento puro, con acortamiento perpendicular a los bordes de la zona de cizalla y estiramiento -extrusión- vertical). El procedimiento de cálculo es el establecido en las referencias clásicas del análisis cinemático de zonas de cizalla (p. ej., Fossen y Tikoff, 1993; Fernández y Díaz-Azpiroz, 2009). Para obtener las trayectorias de las deformaciones finitas en régimen no estacionario se han calculado deformaciones infinitesimales para cada uno de los estadios de la deformación, variando sistemáticamente la relación entre las componentes no coaxial y coaxial del flujo, es decir, su vorticidad. Ésta última se caracteriza mediante el número de vorticidad cinemática (W_k), que, para este modelo, varía entre 0 (cizalla pura) y 1 (cizalla simple). La transición entre el flujo dominado por el cizallamiento puro y el dominado por el cizallamiento simple se sitúa en $W_k = 0.81$ (Fossen y Tikoff, 1993). Para cada incremento de la deformación se ha determinado la magnitud y orientación de los ejes principales de la deformación finita ($X \geq Y \geq Z$), así como la disposición de los ejes de la deformación infinitesimal (ISA) y de las apófisis de flujo con respecto a los bordes de la zona de cizalla.

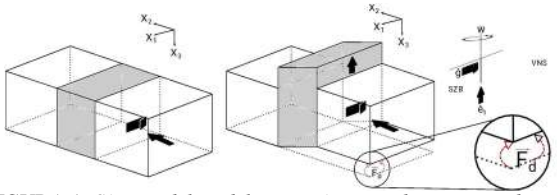


FIGURA 1. *Síntesis del modelo cinemático usado en su estado inicial (izquierda) y deformado (derecha). X_1, X_2 y X_3 son las coordenadas usadas como marco de referencia. VNS es la sección normal al vector vorticidad. $\vec{\omega}$ es el vector vorticidad, $\dot{\gamma}$ es la tasa de la deformación por cizalla. SZB: Borde de la zona de cizalla. $\vec{F}_d$ es el vector de convergencia, nótese que la linea roja, descrita por la variación del vector de convergencia, es curva, lo que impone no estacionalidad en el flujo. Cuando $\vec{F}_d$ tiende hacia el paralelismo con SZB, la vorticidad aumenta con el tiempo (*Tipo i *de flujo). Cuando tiende hacia la perpendicularidad, la vorticidad va disminuyendo (*Tipo d *de flujo).*

Como una primera aproximación al estudio cinemático de los flujos no estacionarios hemos distinguido dos tipos de flujos (Fig. 1): aquellos con vorticidad linealmente creciente (a los que llamaremos *Tipo i*) y otros con vorticidad linealmente decreciente (*Tipo d*). Los resultados se han obtenido en todo el rango de posibles valores de W_k (desde 0 hasta 1 en el *tipo i* y viceversa en el *tipo d*), dividiendo este rango en fracciones iguales. El número de fracciones varía desde 2 hasta 13, de manera que se modelan variaciones rápidas o más progresivas de la vorticidad con el tiempo. Finalmente, se han simulado los cuatro tipos de crecimiento de zonas de cizalla definidos por Fossen y Cavalcante (2017). En el Modelo I, la deformación en la parte central de la zona de cizalla se ralentiza y acaba bloqueándose a medida que la estructura se ensancha. El Modelo II se caracteriza porque la deformación afecta a toda la zona en los primeros estadios, pero rápidamente se localiza en su parte central, a medida que las partes marginales se vuelven inactivas y la parte activa se vuelve cada vez más estrecha. El Modelo III incluye zonas de cizalla con espesor fijo, permaneciendo toda ella activa durante la historia de la deformación. Finalmente, en el Modelo IV el crecimiento es similar al del Modelo I, pero toda la zona de cizalla permanece activa durante la historia de la deformación, de modo que la zona central experimenta la historia completa.

RESULTADOS

De los ocho tipos de combinaciones posibles entre los flujos no estacionarios de *Tipos i* y *d* y los cuatro modelos de crecimiento de zonas de cizalla (I a IV), en este trabajo se revisarán únicamente los resultados obtenidos en las combinaciones II(*i*) y IV(*d*), que consideramos ilustrativos del proceso estudiado. En ambos casos, los resultados difieren notablemente de los esperados a partir de las predicciones de los modelos estacionarios de zonas de cizalla. Este hecho nos servirá para extraer unas conclusiones generales sobre la utilidad y limitaciones de los modelos no estacionarios como el presentado en este trabajo.

La combinación II(*i*), aquella en la que la vorticidad crece con el tiempo, a la vez que la deformación se va concentrando en el interior de la zona de cizalla quedando inactiva el resto de la estructura, muestra cuatro características significativas (Fig. 2). 1) El patrón de la foliación en el plano perpendicular al vector vorticidad (VNS, sección de máxima asimetría) es sigmoidal y contrario al habitualmente descrito en zonas de cizalla estacionarias con deformación heterogénea. En este caso, la foliación se dispone oblicua a las paredes de la cizalla en su interior, donde la deformación es mayor, y sub-paralela a las paredes en sus bordes, donde la magnitud de la deformación es menor. 2) A medida que aumenta la vorticidad del flujo, la traza de la foliación sobre el plano VNS gira en sentido contrario al impuesto por la vorticidad total hasta un valor máximo, que depende del número de fracciones de incremento de vorticidad considerados. Cuanto mayor sea el número de fracciones, menor es este valor máximo. A partir de este punto, con el aumento de la vorticidad, la traza de la foliación comienza a girar en sentido sintético con la vorticidad total. A lo largo del proceso, la no-coaxialidad del flujo se mantiene alta para compensar el espín experimentado por los ISA, que es contrario a la vorticidad total. 3) Las lineaciones de estiramiento tienden a disponerse paralelas a la dirección de extrusión (verticales), incluso en el centro de la zona de cizalla, donde acaba predominando la cizalla simple. 4) La zona de cizalla muestra un registro completo de la historia de la deformación, analizable a partir de sus fábricas y criterios cinemáticos. En la combinación IV(*d*), la zona de cizalla permanece activa en su totalidad según va creciendo en espesor. Al mismo tiempo, se produce un descenso en la vorticidad del flujo. Las principales características de este tipo de transpresión no estacionaria son:

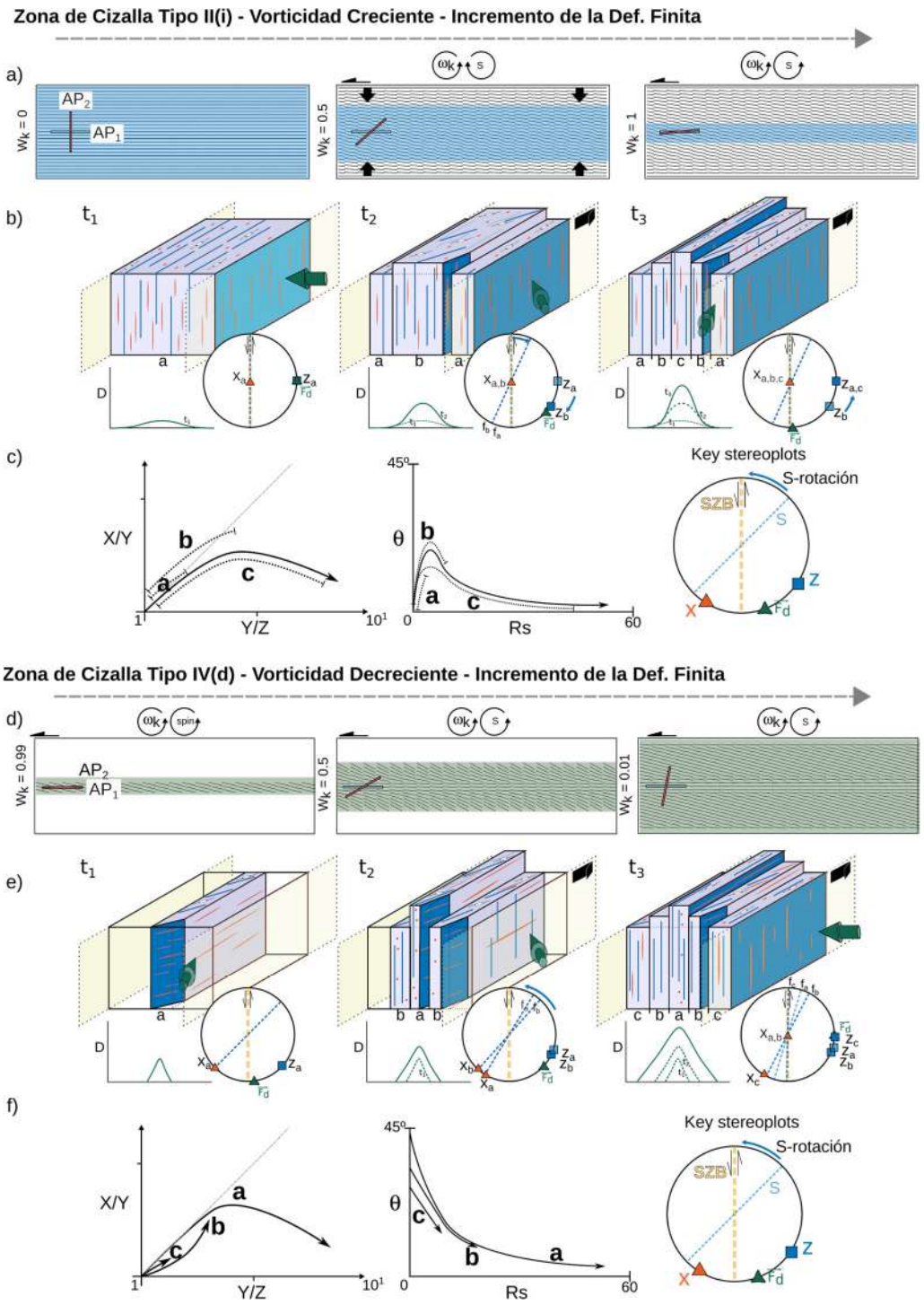


FIGURA 2. *Principales características cinemáticas y de la fábrica para las cizallas con combinaciones II(i) y IV(d). a) y d) Patrones de la orientación de la foliación en tres estados de la historia de la deformación incremental en la sección normal al vector vorticidad (t_1, t_2 y t_3, tiempo). Las líneas AP_1 y AP_2 son las apófisis del flujo para cada instante. Para cada estadio seleccionado se indica el valor del número de vorticidad cinemática (W_k), el sentido de la rotación del vector vorticidad (siempre levógiro) y el de la rotación de la foliación (s). La franja coloreada indica la zona activa. b) y e) Principales elementos de la fábrica tridimensional durante cada paso mostrado. Se muestran con letras (a, b y c) diferentes bandas discretizadas dentro de la zona de cizalla. Proyecciones equiareales indicando la orientación de los ejes principales X y Z de la deformación finita (triángulo rojo y cuadrado azul respectivamente), marcando con un subíndice las diferentes bandas dentro de la zona de cizalla. La flecha verde y $\vec{F}_d$ es el vector de convergencia relativo de los bloques en cada instante (equivalente a AP_2). Las claves de la proyección se encuentran en la esquina inferior derecha. Los diagramas debajo de cada bloque indican la cantidad de deformación en un transecto a la zona de cizalla. c) y f) Diagramas de Flinn y Rs/□ de la historia de la deformación progresiva de cada una de las bandas indicadas en la figura b o d y proyección equiareal de la clave de los principales elementos cinemáticos y de la fábrica.*

1) El patrón de la traza de la foliación en el plano VNS es muy similar al del caso anterior; 2) La rotación de la traza de la foliación en ese plano, sin embargo, es siempre sintética con respecto a la vorticidad total, por lo que no es esperable que se desarrollen estructuras que indiquen no-coaxialidades tan intensas como en la combinación anterior; y 3) Las lineaciones se disponen paralelas a la dirección de extrusión en los bordes de la zona de cizalla (donde la mayor parte de la historia de la deformación se ha producido en condiciones de baja vorticidad),

mientras que encontramos lineaciones horizontales en la zona central. Esta última observación resulta sorprendente, dado que la zona central ha sido sometida a una mayor deformación durante una larga historia de deformación y los modelos de flujo estacionario en tales casos predicen lineaciones según la dirección de extrusión. Son necesarios incrementos todavía mayores bajo el dominio de la cizalla pura o que los primeros estadios de la deformación se produzcan bajo vorticidades más moderadas, aunque sean dentro del dominio de la cizalla simple, para que las lineaciones las encontremos verticales en fases muy avanzadas de la deformación. El patrón estructural resultante podría hacer pensar en una partición de la deformación, cuando es realmente el resultado de un flujo no estacionario.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las dos combinaciones ilustradas en este trabajo podrían corresponder a zonas de cizalla en contextos tectónicos de descenso de la temperatura y concentración de la deformación (*strain hardening*, Modelo II) y de aumento de la temperatura y crecimiento de la zona de cizalla (*strain softening*, Modelo IV). Por su parte, es posible imaginar una enorme variedad de contextos tectónicos en los que es previsible encontrar aumentos (*Tipo i*) o descensos (*Tipo d*) de la vorticidad con el tiempo (en la Fig. 3 se muestran algunos ejemplos destacables).

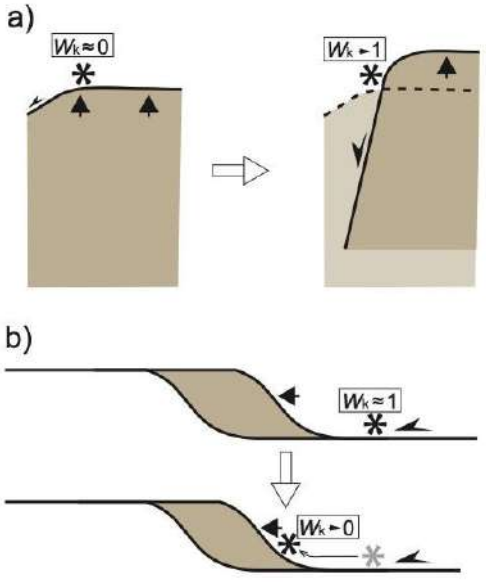


FIGURA 3. *Dos ejemplos de contextos tectónicos en los que es previsible una evolución no estacionaria del flujo. a) Arco cerrándose progresivamente y aumentando su curvatura. El objeto marcado con un asterisco seguirá una evolución de* Tipo i*, con incremento progresivo de la vorticidad. d) Estructura transcurrente con una zona de* restraining bend*. El asterisco sufrirá una evolución de* Tipo d*, con descenso progresivo de la vorticidad.*

Como resumen de los resultados del modelo aplicado en este trabajo se pueden resaltar los siguientes puntos:

1. No es sencillo identificar flujos no estacionarios, dado que las fábricas resultantes son, en muchos casos, similares a las producidas por flujos estacionarios.

2. No obstante, para ciertos tipos cinemáticos -como el II(*i*) o el IV(*d*)- es posible citar evidencias de flujo no estacionario, como un patrón sigmoidal de trazas de foliación en los planos VNS que es inverso (Fig. 2) al esperable en evoluciones estacionarias; zonas con escasa intensidad de deformación que, sin embargo, muestran lineaciones paralelas a la dirección de extrusión; identificación de zonas locales de muy alta no coaxialidad, superior a la impuesta por la vorticidad total; o coexistencia de lineaciones de estiramiento ortogonales sin evidencias de trayectorias de deformación incremental estacionaria que lo justifique.

3. Los resultados de algunos tipos de flujo no estacionario pueden ser confundidos con una partición de la deformación. Estamos trabajando para analizar si es posible ofrecer algún criterio que permita distinguir ambos procesos en casos naturales.

4. Aunque no se ha tratado en detalle en este trabajo, el modelo sugiere que, cuando hay partición temporal de la deformación, las principales evidencias de flujo no estacionario se encontrarían en las bandas donde se acaba concentrando la componente no coaxial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación de los proyectos PGC2018-100914-B-I00, PID2021-124155NB-C31 y PID2021-126347NB-I00.

REFERENCIAS

Fernández, C. y Díaz-Azpiroz, M. (2009): Triclinic transpression zones with inclined extrusion. *Journal of Structural Geology*, 31: 1255-1269.

Fossen, H. y Cavalcante, G.C.H. (2017): Shear zones – A review. *Earth-Science Reviews*, 171: 434-455.

Fossen, H. y Tikoff, B. (1993): The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing, and volume change, and its application to transpressional/transtensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 15: 413-422.

Fossen, H., Cavalcante, G.C.G., Pinheiro, R.V.L., Archanjo, C.J. (2019): Deformation – Progressive or multiphase? *Journal of Structural Geology*, 125: 82-99.

Harland, W.B. (1971): Tectonic transpression in Caledonian Spitzbergen. *Geological Magazine*, 108: 27-42.

Lin, S., Jiang, G. y Williams, P.F. (1998): Transpression (or transtension) zones of triclinic symmetry: Natural example and theoretical modelling. En: *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics* (R.E. Holdsworth, R.A. Strachan y J.F. Dewey, eds.). Geological Society, London, Special Publications, 135, 41-57.

Ramsay, J.G. y Graham, R.H. (1970): Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 7: 786-813.

Sanderson, D.J. y Marchini, W.R.D. (1984): Transpression. *Journal of Structural Geology*, 6: 449-458.

Desarrollo e implementación de una máquina de modelado análogo para el estudio de flujos no estacionarios. Principales características y posibilidades experimentales

Development and implementation of a sandbox machine for the study of unsteady flows. Main features and experimental possibilities

J. Alonso-Henar[1], J. A. López Orozco[2], L. Real[2], M. Velasco[2], J. A. Álvarez Gómez[1], C. Fernández Rodríguez[1], J. L. Granja Bruña[1], J. M. Insua Arévalo[1], M. P. Llanes Estrada[1], J. J. Martínez-Díaz[1], F. J. Martínez Moreno[1], A. Muñoz Martín[1], I. Romeo-Briones[1], J. Ruíz[1], J.L. Sánchez Roldán[1], H. Uzkeda[1] y G. de Vicente[1]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid. jahear@ucm.es, jaalvare@geo.ucm.es, cafern08@ucm.es, jlgranja@geo.ucm.es, insuarev@geo.ucm.es, pllanes@geo.ucm.es, jmdiaz@ucm.es, fjmmoreno@ucm.es, amunoz@geo.ucm.es, iromeobr@geo.ucm.es, jaruiz@geo.ucm.es, jl.sanchez.roldan@ucm.es, huzkeda@ucm.es, gdv@geo.ucm.es
2 Sección Departamental de Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de CC. Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid. jalo@dacya.ucm.es, lreal01@ucm.es, marvel09@ucm.es.

Palabras clave: modelos análogos, tectónica experimental, flujo no estacionario, vorticidad cinemática.

Resumen

El modelado análogo es una técnica bien establecida para investigar la evolución de las estructuras tectónicas en la corteza terrestre y la litosfera. Esta técnica ofrece la oportunidad de determinar la relación entre unas condiciones de contorno impuestas y el desarrollo de las estructuras resultantes, y, por tanto, la comparación de hipótesis sobre el desarrollo de estructuras en la naturaleza. El laboratorio de Tectónica Experimental del área de Geodinámica Interna de la Universidad Complutense de Madrid cuenta con una máquina que permite la simulación de escenarios cinemáticos complejos. El aparato consta de seis motores que cumplen con los requisitos necesarios de precisión en el control de la velocidad y la posición (cada paso se realiza en incrementos discretos, lo que permite un movimiento suave y estable). Los motores son controlados en un modo que permite programar varias fases de deformación o incluso variaciones paulatinas (casi infinitesimales) en las velocidades coordinadas de todos los motores. Por tanto, modelar flujos tanto estacionarios como no estacionarios. La configuración consta de dos superficies basales y dos paredes verticales que simulan todo el abanico de la transpresión y transtension monoclínica; también permite inclinar las paredes con el objetivo de modelar situaciones triclínicas. En este trabajo presentamos las principales características del aparataje y resultados preliminares de experimentos de deformación en situaciones de no estacionalidad cinemática.

Abstract

Analog modeling is a well-established technique for investigating the evolution of tectonic structures in the Earth's crust and lithosphere. This technique offers the opportunity to determine the relationship between imposed boundary conditions and the development of the resulting structures, and, therefore, the comparison of hypotheses about the development of structures in nature. The Experimental Tectonics laboratory of the Geodynamics area of the Complutense University of Madrid counts on a machine that allows the simulation of complex kinematic scenarios. The apparatus consists of six motors that meet the necessary requirements for precision in speed and position control (each step is performed in discrete increments, allowing for smooth and stable movement). The motors are controlled in a way that allows programming several phases of deformation or even gradual (almost infinitesimal) variations in the coordinated speeds of all the motors. Therefore, model both steady and unsteady flows. The configuration consists of two basal surfaces and two vertical walls that simulate the entire range of monoclinic transpression and transtension; It also allows the walls to be tilted to model triclinic situations. In this work we present the main features of the apparatus and preliminary results of deformation unsteady situation experiments.

Modelización numérica del papel de la reología de la sal y los mecanismos gravitacionales en la evolución de márgenes de rift

Numerical modelling of the role of salt rheology and gravitational mechanisms in the evolution of salt-bearing rifted margins

M. Bakhtbidar[1*], P. Santolaria[1], P. Granado[1], J. B. Ruh[2] y O. Gratacós[1]

[1] Institut de Recerca UB-Geomodels, Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona (UB), C/Martí i Franquès s/n 08028 Barcelona, Spain (*bakhtbidar@ub.edu; p.santolaria.otin@ub.edu; pablomartinez_granado@ub.edu; ogratacos@ub.edu)
[2] Institute of Marine Sciences, CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49, 08003, Barcelona, Spain (jruh@icm.csic.es)

Palabras clave: Salt Tectonics; Rifted Margins; Numerical Modeling; Downbuilding; Salt Rheology

Resumen

Debido al comportamiento viscoso de la sal bajo condiciones de presión y temperatura típicas de la corteza superior, su presencia determina la evolución y la arquitectura tectono-estratigráfica de márgenes de rift despegados en sal. En estos escenarios, la sal fluye controlada por dos mecanismos principales: *downbuilding* y *dominant gliding*. Ambos mecanismos pueden actuar a la vez y el balance entre ellos determina la distribución y geometría del sistema sal-sedimento. En este sentido, la reología de la sal es otro de los factores controladores clave. Por tanto, para entender estos sistemas es necesario estudiar tanto el funcionamiento de estos mecanismos gravitacionales como la reología de la sal. Mediante el uso de modelos numéricos 2D, este trabajo pone especial énfasis en el papel del *downbuilding* y *dominant gliding*, y cómo éstos se ven influenciados por la reología de la sal (viscosa lineal o no-newtoniana).

Abstract

Due to the viscous behavior of salt under upper crustal pressure and temperature conditions, its presence determines the evolution and tectono-stratigraphic architecture of salt-bearing rifted margins. In those scenarios, salt flows controlled by two main mechanisms: downbuilding and dominant gliding. Both mechanisms can occur simultaneously and their mutual balance determines the distribution and geometry of the salt-sediment system. In this sense, the rheology of the salt is another key controlling factor. To deepen in these systems, it is necessary to study both the operation of those gravitational mechanisms coupled with the rheology of salt. Using 2D numerical models, this work brings a special emphasis on the role of downbuilding and dominant gliding, and how these are influenced by the rheology of the salt (linear or non-Newtonian viscous)

Análisis exploratorio y correlación de la resistencia de diferentes tipos de roca con ensayos de tracción y compresión simple

Exploratory analysis and correlation of the strength of different types of rock with uniaxial compressive and tensile tests

N. Belandria[1], L. Arlegui[2], R. Úcar[1] y F. Torrijo[3]

1 Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad de Los Andes, La Hechicera, 5101, Mérida, Venezuela. norlyb@gmail.com, robertoucar@gmail.com
2 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. arlegui@unizar.es
3 Departamento of Geotechnical Engineering, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, s/n, Algirós, 46022 València, España fratorec@trr.upv.es

Palabras clave: Análisis exploratorio, univariante, bivariante, multivariante, Programa R.

Resumen

En la presente investigación se realiza un análisis exploratorio de ensayos de compresión simple y tracción de 145 muestras (16 Mármoles, 16 granitos, 54 areniscas, 20 limolitas, 31 carbones, 8 cuarcitas), recopiladas de diferentes investigadores (Sheorey, 1997; Guo et al., 2020; Singh et al, 2011), con el propósito de llevar a cabo el análisis univariante, bivariante de las variables cuantitativas y cualitativas, y multivariante a través de análisis estadísticos. Para ello se utiliza el programa R y el paquete R Commander que permite la interfaz gráfica, ventanas para las órdenes y facilidad en cualquier análisis estadístico. Los resultados obtenidos corresponden con los tipos de rocas y resistencia de la roca más representativos, las correlaciones de resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción del modelo de regresión lineal siendo esta alta y positiva. Finalmente, en el análisis multivariante se observan factores comunes entre las tres variables cuantitativas estudiadas y la clasificación por individuos genera un grupo que valora más la resistencia que la litología.

Abstract

In the present research, an exploratory analysis of uniaxial compressive and tensile strength tests of 145 samples (16 marbles, 16, granites, 54 sandstones, 20 limestones, 31 coals, 8 quartzites) collected from different researchers (Sheorey, 1997; Guo et al., 2020; Singh et al, 2011) is carried out, with univariate, bivariate analysis of quantitative and qualitative variables, and multivariate through statistical analysis. For this, the R program and the R Commander package, which allows for a graphical interface, command windows, and ease of any statistical analysis, are used. The data sets include the most representative types of rocks and common ranges of rock strength; the correlations of compressive and tensile strength of the linear regression model are strong and positive and, finally, in the factor analysis common factors are observed between the three quantitative variables studied and in the cluster analysis the classification by individuals generates a group that highly values resistance over lithology.

Referencias

Guo, B., Wang, L., Li, Y., & Chen, Y. (2020). *Triaxial Strength Criteria in Mohr Stress Space for Intact Rocks. Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-13.

Sheorey, P.R. (1997). *Empirical Rock Failure Criteria. A.A.* Balkema.

Singh M, Raj A, Singh B (2011) *Modified Mohr–Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of intact rocks. Int J Rock Mech Min Sci* 48:546–555.

Evolución y cinemática de la minicuenca secundaria de El Bolón: Perspectivas de los mantos salinos sin-contraccionales de las Béticas Externas, Península Ibérica
Evolution and kinematics of the El Bolón secondary minibasin: Insights from Syn-Contractional Salt Sheets in the External Betics, Iberian Peninsula

D. Canova[1], E. Roca[1], C. Fernandez[1], O. Ferrer[1], J. Afzal[2] y F. Escosa[3]

1– Dpto. Dinàmica de la Terra i de L'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Institut de Recerca Geomodels, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. David.canova@ub.edu, eduardroca@ub.edu, carlesferrandez@ub.edu, joferrer@ub.edu
2– Sedimentix Stratigraphical & Sedimentalogical Services, 13 Trinity Square, Llandudno Conwy, LL30 2RB, United Kingdom. jafzal@sedimentix.co.uk
3– Exploration Geologist, Terractiva Consulting S.L., Rda. de Sant Pere, 16, Eixample, 08010 Barcelona. frede@terractiva.net

Palabras clave: minicuenca, lámina salina, interacción sal-sedimento

Resumen

Este trabajo presenta datos de la minicuenca secundaria de El Bolón (Diapiro de Elda, Alicante) para descifrar su evolución, cinemática y relación con el emplazamiento de la lámina salina sobre la que se sitúa. La minicuenca de El Bolón se caracteriza por una sección basal condensada de margas en capas tabulares de edad Cretácico tardío sobre la que se depositan estratos marinos de edad Paleoceno-Eoceno superior que están afectados por fallas extensionales sinsedimentarias que se hunden en la sal. Estos materiales crearon un *carapace* sobre el diapiro de Elda tras la formación de un *weld* primario. Desde el Oligoceno hasta mediados del Mioceno, el acortamiento tectónico rejuveneció el flujo de la sal, lo que provocó la expansión de la sal alóctona y el desmembramiento del *carapace* del Cretácico tardío-Eoceno superior. Los sedimentos detríticos derivados de la erosión del diapiro depositados en la secuencia del Oligoceno-Mioceno de El Bolón medio indican que la sal quedó expuesta de forma puntual. A lo largo del Mioceno temprano a medio, la minicuenca de El Bolón desarrolló secuencias halocinéticas en gancho y discordancias episódicas con onlaps que registran su rotación progresiva alrededor del eje horizontal, por lo que, a finales del Mioceno medio, la minicuenca estaba encajonada en la sal.

Abstract

Here we present data from El Bolón secondary minibasin (Elda diapir, Alicante) to decipher its evolution, kinematics, and relationship with the emplacement and growth of the Elda salt sheet. El Bolón minibasin is characterized by a condensed section of tabular bedded uppermost Cretaceous marlstones unconformably deposited above Triassic evaporites followed by Paleocene to upper Eocene marine strata that are affected by syn-sedimentary extensional growth faults that sole into the salt. These strata correspond to the base of the carapace developed above the waning diapir. From Oligocene to middle Miocene times, enhanced shortening renewed salt extrusion resulting in the expansion of allochthonous salt dismembering the uppermost Cretaceous-late Oligocene carapace. This is recorded in the minibasin as diapir derived detritus in the Oligocene-middle Miocene sequence and a minibasin wide unconformity truncating the Paleogene sequence. Therefore, salt was exposed while the carapace strata started to subside into the salt sheet. Throughout the early to middle Miocene hook halokinetic sequences and episodic unconformities developed within the El Bolón structure with onlaps recording its progressive horizontal axis rotation towards the north. By the end of the middle Miocene the minibasin was encased in salt and further rotated towards the north to its present overturned position.

Estructura compresiva de una pared salina controlada por la geometría halocinética preexistente, Marruecos

Compressional structure of a salt wall controlled by the pre-existing halokinetic geometry, Morocco

M. Carrión-Jiménez[1], A. Teixell[1], N. Fernandez[2]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universitat Autònoma de Barcelona 08193, Barcelona. maria.carrion@uab.cat
2 GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg 14473, Potsdam. naiara@gfz-potsdam.de

Palabras clave: Rifting, acortamiento, pared salina, minicuenca

Resumen

El estilo del Alto Atlas está en parte controlado por diapiros que se iniciaron durante la etapa de rifting triásico y que crearon una herencia estructural que influyó en la posterior arquitectura orogénica. En este trabajo se documenta la geometría y variación estructural a lo largo y ancho de una cresta de sal (pared salina del Aberdouz) y minicuencas que la rodean, como registro de la evolución de estructuras diapíricas lineales desde la extensión hasta la compresión. Esta pared salina presenta un grado variable de cierre diapírico. El núcleo está cerrado a lo largo de gran parte de la cresta, o parcialmente abierto donde las inclusiones (basaltos Triásicos y carbonatos y gabros Jurásicos) impiden la soldadura salina (*salt welding*). Se han reconocido flancos de la pared salina que contrastan entre sí. Mientras el flanco sur es relativamente homogéneo, espolones diapíricos transversos a la pared salina principal conservan secuencias halocinéticas y una estructura en tortuga *along-strike*, demostrando una menor distorsión de las estructuras durante el acortamiento. El flanco norte muestra una gran variación lateral de las minicuencas, también relacionada con el variable grado de cierre. Tres dominios diferentes se han evidenciado: 1) un *stock* terminal con concentración de inclusiones y una minicuenca de naturaleza clástica y edad Cenozoica subside en el alimentador diapírico, 2) un sinforme soldado contra la pared salina y el *stock* terminal, y 3) unas minicuencas verticalizadas y cabalgantes. Proponemos un modelo evolutivo que invoca las etapas extensivas y compresivas y que explica la variación a lo largo de la pared salina y la acumulación de inclusiones antes del acortamiento.

Abstract

The style of the High Atlas is partly influenced by precursor diapirs that were initiated during preorogenic rifting episodes and created a structural inheritance that influenced the subsequent orogenic architecture. We document the geometry and along- and across-strike structural variation on a particularly well exposed salt ridge (the Aberdouz salt wall) and flanking minibasins, as trackers of the evolution of linear diapiric structures from extension to contraction. This salt wall shows a variable degree of diapir closure. The diapiric core is welded along much of the ridge but is partly open where inclusions (Triassic basalts and Jurassic carbonates or gabbros) prevented welding. A contrasting structure of the salt wall and flanks has been recognized. While the south flank is relatively homogeneous, diapiric spurs transverse to the main salt wall preserve halokinetic sequences and an along-strike turtle structure, attesting to less distortion of these structures during the shortening. However, the north flank shows a marked lateral variation of the minibasin structure also related to variable degree of closure. Three different domains are there evident: 1) a terminal stock with concentration of inclusions and a rare Cenozoic clastic minibasin sinking into a diapir feeder, 2) a synformal depocenter, and 3) a verticalized, upthrust minibasin. We propose an evolutionary model invoking extensional and compressional salt tectonics that explain the variability and the concentrations of inclusions in a stock before shortening-related overprinting.

Variación de la deformación en el extremo occidental de la Falla de Merens; Pirineos centrales

Deformation variation at western end of the Merens fault; central Pyrenees

P. Clariana[1], J. García-Sansegundo[2] y P. Barron[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Unidad de Zaragoza, Campus de Aula Dei, Avda. Montañana, 1005, 50059, Zaragoza. p.clariana@igme.es
2 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005, Oviedo. jgsansegundo@uniovi.es
3 Latitude 66 Cobalt OY, Asemakatu 41, 90100 Oulu, Finland. pelayogeol@gmail.com

Palabras clave: deformación milonítica, bandas de cizalla, estructuras Variscas, Pirineos

Resumen

La falla de Merens es una estructura mayor dentro de la Zona Axial pirenaica de dirección E-O que se prolonga a lo largo de 70 km desde el Sinclinal de Villefranche, al este, hasta el Macizo de la Pallaresa, al oeste. En este trabajo se ha estudiado su extremo occidental, localizado en la zona de transición entre los domos néisicos del Aston y del Hospitalet y el Macizo de la Pallaresa, donde se ponen en contacto rocas de la sucesión pre-Ordovícico Superior afectadas por metamorfismo de alto grado, al norte, con rocas de la misma edad y con un metamorfismo que no supera la zona de la andalucita, al sur. El estudio meso- y microestructural realizado ha permitido diferenciar tres tramos a lo largo de su recorrido: (i) sector oriental, la falla está representada por una sola traza en la que se identifican estructuras propias de una deformación milonítica desarrollada en condiciones metamórficas de grado bajo, (ii) sector central, la falla se divide en dos ramas con un intenso desarrollo de deformación por cizalla entre ambas. En este sector la rama sur marca un cambio en la deformación Varisca con predominio de estructuras subhorizontales en el bloque norte a un predominio de pliegues derechos en el bloque sur y (iii) sector occidental, la deformación asociada a la falla corresponde a una zona de fracturación frágil y potencia métrica, continuación de la rama norte, que marca un cambio en la disposición de la foliación principal Varisca que pasa de estar subhorizontal al norte de la zona de fractura a estar intensamente plegada al sur.

La variación de la deformación observada indica la amortiguación de la falla de Merens hacia el oeste hasta desaparecer en el macizo de la Pallaresa y la relación con las estructuras Variscas identificadas en la zona confirmaría el comienzo de su actividad durante la Orogenia Varisca.

Abstract

The Merens fault is a major E-W structure within the Pyrenean Axial Zone, extending 70 km from the Villefranche Syncline in the east to the Pallaresa Massif in the west. In this work, we have studied its western end, located in the transition zone between the Aston and Hospitalet gneissic domes and the Pallaresa Massif. Here, the rocks of the pre-Upper Ordovician succession affected by high-grade metamorphism, to the north, are in contact with coeval rocks where metamorphism does not exceed the andalusite zone, to the south. The meso- and microstructural study carried out has made possible to distinguish three sections along-strike: (i) the eastern section, the fault is represented by a discrete trace in which mylonitic deformation structures developed under low metamorphic grade; (ii) the central sector, where the fault splits into two branches with strong shear deformation between them. The southern branch highlights a change in Variscan deformation with dominance of subhorizontal structures in the northern block and up-right folds in the southern block; (iii) the western sector, the fault continuation of the northern branch is represented by a metric scale thick zone, characterized by brittle deformation. This marks a change in the disposition of the main Variscan foliation, from subhorizontal to the north of the fracture zone to intensely folded to the south.

The variation of the observed deformation indicates decreasing in the activity of the Merens fault towards the west, until its disappearance into the Pallaresa Massif. The identified relationships with the Variscan structures in this zone evidence that its activity began during the Variscan Orogeny.

Diapirismo salino durante el emplazamiento del sistema de pliegues y cabalgamientos surpirenaico central: El Diapiro de Les Avellanes.

Salt diapirism during the emplacement of the south-central Pyrenean fold-and-thrust belt: The Les Avellanes Diapir.

G. Cofrade[1], Ò. Gratacós[2], I. Cantarero[1], O. Ferrer[2], E. Roca[2], J.A. Muñoz[2], P. Ramirez-Perez[1], y A. Travé[1]

1 Institut de Recerca Geomodels. Dept. de Mineralogia, Petrologia i Geología Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. gcofrade@ub.edu, i_cantarero@ub.edu, pramirezperez@ub.edu, atrave@ub.edu

2 Institut de Recerca Geomodels. Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. ogratacos@ub.edu, joferrer@ub.edu, eduardroca@ub.edu, jamunoz@ub.edu

Palabras clave: Tectónica salina, Pirineos, Diapiro de Les Avellanes, Compresión, Lámina salina

Resumen

El cinturón de pliegues y cabalgamientos surpirenaico central consiste en tres láminas cabalgantes principales despegadas sobre los niveles salinos del Triásico Medio-Superior (facies Muschelkalk y Keuper) que se emplazaron desde el Santoniense superior al Oligoceno inferior. En la lámina más externa del cinturón (lámina de Les Serres Marginals), hay grandes acumulaciones de sal triásica bajo la cobertera conectadas con cuerpos diapíricos aflorantes. La temporalidad del crecimiento de estas estructuras salinas en relación con la tectónica aún es objeto de debate. Este estudio analiza la estructura y deformación alrededor del Diapiro de Les Avellanes (Lleida), para comprender mejor su historia e interrelación con la deformación regional pirenaica. Para ello se han realizado dos secciones principales a través de los bordes oriental y occidental del diapiro, y 4 de detalle. Su restitución permite observar una primera etapa de deformación eocena temprana previa al emplazamiento de la lámina de Les Serres Marginals caracterizada por el desarrollo de anticlinales despegados en la sal; una segunda durante el Eoceno medio-superior, en la que la erosión eliminó la cobertera de las estructuras hinchadas favoreciendo la extrusión de la sal; y una tercera eocena terminal-oligocena en la cual el diapiro se estrangula, provocando la extrusión de la sal en una lámina salina que rellenó las zonas adyacentes topográficamente deprimidas. Esta última etapa fue contemporánea al emplazamiento de la lámina de Les Serres Marginals, y su posterior reactivación mediante cabalgamientos emplazados según una secuencia *break-back*.

Abstract

The South-Central Pyrenean fold and thrust belt consists of three main thrust sheets detached over the Middle-Upper Triassic salt intervals (facies Muschelkalk y Keuper) and emplaced from late Santonian to early Oligocene times. In the most external thrust sheet of the belt (Serres Marginals Thrust Sheet), there are important Triassic salt accumulations connected with outcropping diapiric bodies. The timing of such salt structures relative to tectonics is still a matter of debate. This contribution analyses the structure and deformation around the Les Avellanes Diapir (Lleida) to understand the history of this diapir and its association with the Pyrenean tectonic framework. For this purpose, two main cross-sections have been constructed along the eastern and western boundaries of the diapir, as well as 4 detailed sections. Their restitution allows us to observe a first stage of early Eocene deformation previous to the emplacement of the Les Serres Marginals Thrust Sheet, characterized by the development of salt detached anticlines; a second middle to late Eocene stage, in which erosion eliminated the cover on the salt inflated structures, favoring the extrusion of the salt; and a third late Eocene-Oligocene stage, in which the squeezing of the diapir caused the extrusion of the salt as a salt sheet that filled the adjacent topographic lows. This last stage was contemporaneous to the emplacement of the Serres Marginals Thrust Sheet and its subsequent reactivation by thrusts emplaced in a break-back sequence.

Procesos de deformación en las zonas de cizalla basales de diversos mantos de la Zona Cantábrica

Deformation processes in the basal shear zones of various nappes of the Cantabrian Zone

M.I. de Paz Álvarez[1], S. Llana Fúnez[1] y J.L. Alonso[1]

1 Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, C/Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005, Oviedo. midepaz@outlook.es, llanasergio@uniovi.es, jlalonso@uniovi.es

Palabras clave: Zona Cantábrica, Mantos de cabalgamiento, Rocas de falla, Procesos de deformación.

Resumen

La Zona Cantábrica constituye el cinturón de pliegues y cabalgamientos varisco en el NW del Macizo Ibérico (*e.g.* Pérez-Estaún *et al.*, 1988). Las zonas de cizalla basales (ZCB) de sus mantos registran información relevante para comprender la deformación varisca (de Paz-Álvarez, 2023). Presentan rocas de falla de entre 1 y 50 cm de potencia, y registran elevados valores de deformación por cizalla simple de 10^4-10^5. Las rocas de falla están constituidas por fragmentos de la formación situada en la base de la lámina cabalgante, y en algunos casos, por otros procedentes del bloque inferior. A menudo poseen una fábrica tectónica planar subparalela al contacto definida por superficies de disolución, de deslizamiento y/o delgadas venas de calcita. Los procesos de deformación dominantes han sido cataclasis y disolución por presión. La distribución de tamaños de fragmento de las cataclasitas se ajusta mediante leyes potenciales con coeficientes 3D de entre 1,98 y 3,90, sugiriendo los más elevados una intensa localización de la deformación por cizalla simple en niveles delgados. Aunque escasos, localmente existen indicios de posibles deslizamientos a velocidades sísmicas en las ZCB tales como superficies de deslizamiento muy netas y planares, estructuras fluidales e inyecciones de rocas de falla. Ello parece indicar que debido a su mineralogía, textura y condiciones ambientales, algunas ZCB poseían un comportamiento friccional metaestable, permitiendo la propagación de eventos sísmicos nucleados en sectores más profundos.

Abstract

The Cantabrian Zone conforms the Variscan foreland fold-and-thrust belt located in the NW Iberian Massif (*e.g.* Pérez-Estaún *et al.*, 1988). The basal shear zones (BSZ) of the Cantabrian nappes record relevant information related to Variscan deformation (de Paz-Álvarez, 2023). They display fault rocks with 1-50 cm thickness, with high simple shear strain values of 10^4-10^5. Fault rocks include cataclasites and ultracataclasites with fragments derived from the formation located at the base of the hangingwall, locally with other fragments incorporated from the footwall. They often have a planar tectonic fabric subparallel to the thrust fault defined by dissolution and slip surfaces, and/or thin calcite veins. The main deformation processes were cataclasis and pressure solution. Cataclasite fragment size distributions can be fit with power laws with 3D coefficients between 1.98 and 3.90, the largest ones suggesting an intense simple shear strain localisation in thin intervals. Although scarce, there is local evidence of possible slip at seismic velocities within the BSZ, such as sharp and planar slip surfaces, flow structures and fault rock injections. These suggest that owing to their mineralogy, texture and ambient conditions, some BSZ displayed a frictional metastable behaviour, being able to propagate seismic events nucleated at deeper levels.

Referencias

de Paz-Álvarez, M.I. (2023). *Deformación y rocas de falla en las zonas de cizalla basales de los mantos cantábricos*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 440 p.

Pérez-Estaún, A., Bastida, F., Alonso, J.L., Marquínez, J., Aller, J. *et al.* (1988). *Tectonics*, 7(3), 517-537.

Un megapliegue alpino en el basamento de Iberia central

An Alpine megafold in the basement of central Iberia

R. Díez Fernández[1], G. de Vicente[2], D. Moreno-Martín[3], C. Fernández[2], R. Arenas[3], F. J. Rubio Pascual[4]

1 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Salamanca, España. r.diez@igme.es
2 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. gdv@geo.ucm.es, cafern08@ucm.es
3 Dpto. de Mineralogía y Petrología e Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. diamor03@ucm.es, rarenas@ucm.es
4 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Madrid, España. f.rubio@igme.es

Palabras clave: Tectónica intraplaca; Plegamiento cortical; Deformación de basamento; Orogenia Alpina, Sistema Central Hispano-Portugués.

Resumen

Parece difícil conseguir/observar el plegamiento real de un basamento, especialmente si ocurre a gran escala. Algunos pliegues desarrollados durante la Orogenia Alpina afectan al basamento de la Península Ibérica. Se ha reconocido un megapliegue alpino (Antiforme de Hiendelaencina) en el núcleo del Sistema Central Hispano-Portugués. El pliegue es paralelo a dicha cadena de montañas y afecta tanto a su basamento Paleozoico como a su cobertera sedimentaria. La longitud de onda de este pliegue es igual o mayor al espesor de la corteza que lo contiene (36-41 km). El Moho por debajo del megapliegue está desplazado por una falla alpina, lo que se interpreta como una subducción continental intraplaca incipiente. Los datos geofísicos sugieren una morfología convexa hacia arriba en la topografía del manto, conforme con la estructura del megapliegue. El megapliegue aparece en el bloque de techo de la Falla de Berzosa, que ahora se interpreta como una falla extensional varisca (Paleozoica) con movimiento hacia el SE, posteriormente reactivada como un despegue basal durante la contracción alpina (Cenozoica). El megapliegue queda definido por los estratos de la cobertera, el conjunto de anisotropías planares del basamento (foliación y estratificación), y por los patrones de interferencia con pliegues previos (variscos). Se propone que la formación de este megapliegue fue posible gracias a un cizallamiento heterogéneo (contracción) combinado con un efecto de contrafuerte ejercido por fallas preexistentes, casi verticales, y de escala cortical (Somolinos y Somosierra), que inhibieron el deslizamiento e inversión a favor de un despegue basal pre-existente situado dentro del basamento (Falla de Berzosa).

Abstract

Actual basement folding is elusive, especially if it happens at a large scale. Folds developed during the Alpine Orogeny affect the basement of the Iberian Peninsula. We have recognised an Alpine mega-fold (Hiendelaencina Antiform) at the core of the Spanish-Portuguese Central System. The fold is parallel to this mountain range and bends the basement and its sedimentary cover alike. This fold's wavelength is equal to or greater than the thickness of the crust that contains it (36-41 km). An Alpine fault offsets the Moho beneath this mega-fold, what is interpreted as the onset of intraplate continental subduction. Geophysical data suggest an up-warping of the mantle topography consistent with the mega-fold observed on surface. The mega-fold occurs in the hanging wall of the Berzosa Fault. This fault is interpreted as a SE-dipping Variscan (Paleozoic) extensional fault, reactivated as a basal decollement during Alpine (Cenozoic) contraction. The mega-fold is defined by the structure of the cover strata, by well-oriented planar anisotropies in the basement (foliation and bedding), and by distinctive fold interference patterns with previous (Variscan) folds. The formation of this mega-fold was assisted by heterogeneous shearing (coeval thrusting) as well as by the buttress effect of pre-existing, near-vertical, crustal-scale faults (Somolinos and Somosierra), which diminished slip upsection through a pre-existing, basal decollement located within the basement (Berzosa Fault).

Fractured clasts in conglomerates and sedimentary breccias. Examples from the eastern margins of the Ebro basin

Clastos fracturados en conglomerados y brechas sedimentarias. Ejemplos de los márgenes orientales de la cuenca del Ebro

E. Druguet[1], J. Carreras[2] and O. Oms[1]

1 Dpt. Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona. elena.druguet@uab.cat. oriol.oms@uab.cat
2 Sa Tórtora 8, 17488, Cadaqués, Girona. jordicarreras@me.com

Abstract: Paleogene coarse clastic sedimentary rocks from three localities along the eastern margins of the Ebro basin (the areas of Darnius-Boadella, north of Begur massif and Olesa de Montserrat areas) exhibit clast-restricted fracturing characterized by a striking consistency in type and orientation of fractures within different clasts at each locality. The type of fracture pattern is mainly controlled by the lithological composition of the clasts and the stiffness contrasts between clasts and matrix. Thus, quartz clasts predominantly develop sets of sub-vertical and sub-parallel tension cracks, whereas carbonate clasts seem to accommodate deformation through more complex polymodal fracture patterns. Nevertheless, the performed observations and fracture orientation analyses point to syn- to post-lithification brittle deformation of the clasts embedded in these Paleogene sedimentary units during progressive Alpine shortening.

Key words: breccia, conglomerate, fracture, Alpine orogeny, tectonics-sedimentation relationships.

Resumen: *Las rocas sedimentarias clásticas de edad paleógena de tres localidades correspondientes a los márgenes orientales de la cuenca del Ebro (zonas de Darnius-Boadella, norte del macizo de Begur y Olesa de Montserrat) muestran fracturación restringida a los clastos y caracterizada por una sorprendente consistencia en el tipo y orientación de las fracturas dentro de diferentes clastos en cada localidad. El tipo de patrón de fractura está controlado principalmente por la composición litológica de los clastos y por el contraste de rigidez entre los clastos y la matriz. De este modo, los clastos de cuarzo desarrollan predominantemente familias de grietas de tensión subverticales y subparalelas, mientras que los clastos de carbonato parecen acomodar la deformación mediante patrones de fractura polimodales más complejos. De todos modos, las observaciones realizadas y los análisis de orientación de las fracturas apuntan a una deformación frágil posdeposicional de los clastos incluidos en estas unidades sedimentarias del Paleógeno durante el acortamiento progresivo alpino.*

Palabras clave: *brecha, conglomerado, fractura, orogenia alpina, relaciones tectónica-sedimentación.*

INTRODUCTION

In conglomerates, the presence of clasts with fractures of similar type and orientation within a relatively wide region is a phenomenon that has long being reported from the tectonic point of view (Ramsay, 1964; Eidelman and Reches, 1992).

Many intra-clast fractures described in the literature are tension fractures arranged sub-parallel to each other in single clasts and within outcrops of variable extension, without propagating into the generally softer matrix (Tokarski et al. 2016; Woronko et al., 2018, and references above). In these cases, stress concentration around the clasts contacts and amplification inside stiff clasts are the main driving forces for fracture initiation and propagation, as tested with experimental simulations (Ramsay, 1964; Eidelman and Reches, 1992; Acharyya and Mondal, 2019). Most of these studies concluded that fractured clasts can be good paleostress indicators, especially if their analysis can be complemented with the study of associated structures (e.g. major regional faults and folds).

PRELIMINARY RESULTS FROM THE ANALYSED STRUCTURES

Fractured clasts with features similar to the ones described in the previous section have been explored in breccias and conglomerates of Paleogene age from the eastern margins of the Ebro basin. The studied outcrops are from (1) the Darnius-Boadella area at the southeastern Pyrenean margin; (2) the North Begur massif at the easternmost boundary of the Ebro basin with the Variscan basement of the Catalan Coastal Ranges, and (3) the Olesa de Montserrat area at the margin of the Ebro basin with the central Catalan Coastal Ranges (Fig. 1).

The intra-clasts fracture pattern from the Darnius-Boadella conglomeratic breccias is widespread in quartz cobbles and characterized by a predominant, closely spaced sub-vertical NNE-SSW set of tension fractures and a secondary, nearly perpendicular and lesser developed fracture set (Fig. 1b). In the northern margin of the Begur massif (Fig. 1c) a megabreccia is unconformably deposited on the Variscan basement rocks. The clasts, which may exceed $1m^3$, are almost exclusively composed of Cambrian dolostone and they display complex multimodal but systematically arranged sets of sub-vertical fractures, with trends ranging from NNW-SSE to NE-SW. The so called Cairat breccia formation (Anadón, 1978) is largely exposed at the Olesa de Montserrat area. There, fractures are selectively hosted by angular clasts of Triassic carbonate, being arranged into two main sub-vertical WNW-ESE and NE-SW fracture sets (Fig. 1d).

The observations and fracture orientation analysis performed on the three localities point towards a syn- to post-lithification fracturing of clasts during progressive Alpine bulk N-S directed shortening.

REFERENCES

Acharyya, S.S. and Mondal, T.K. (2019): Stress enhanced tensile fractures in elliptical clast in conglomerate. *Journal of Structural Geology*, 122, 81-88.

Anadón, P. (1978): *El Paleogeno continental anterior a la transgresión Biarritziense (Eoceno medio) entre los ríos Gaià y Ripoll (Provincias de Tarragona y Barcelona)*. Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona, 267 p.

Eidelman, A. and Reches, Z. (1992): Fractured pebbles—A new stress indicator. *Geology*, 20, 307-310.

Ramsay, D.M. (1964): Deformation of Pebbles in Lower Old Red Sandstone Conglomerates Adjacent to the Highland Boundary Fault. *Geological Magazine*, 101, 228-248.

Tokarski, A., Márton, E., Świerczewska, A., Fheed, A., Zasadni, J. and Kukulak, J. (2016): Neotectonic rotations in the Orava–Nowy Targ Intramontane Basin (Western Carpathians): An integrated palaeomagnetic and fractured clasts study. *Tectonophysics*, 685, 35-43.

Woronko, B., Belzyt, S., Bujak, Ł. and Pisarska-Jamroży, M. (2018): Glaciotectonically deformed glaciofluvial sediments with ruptured pebbles (Koczery study site, E Poland). *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 90, 145-159.

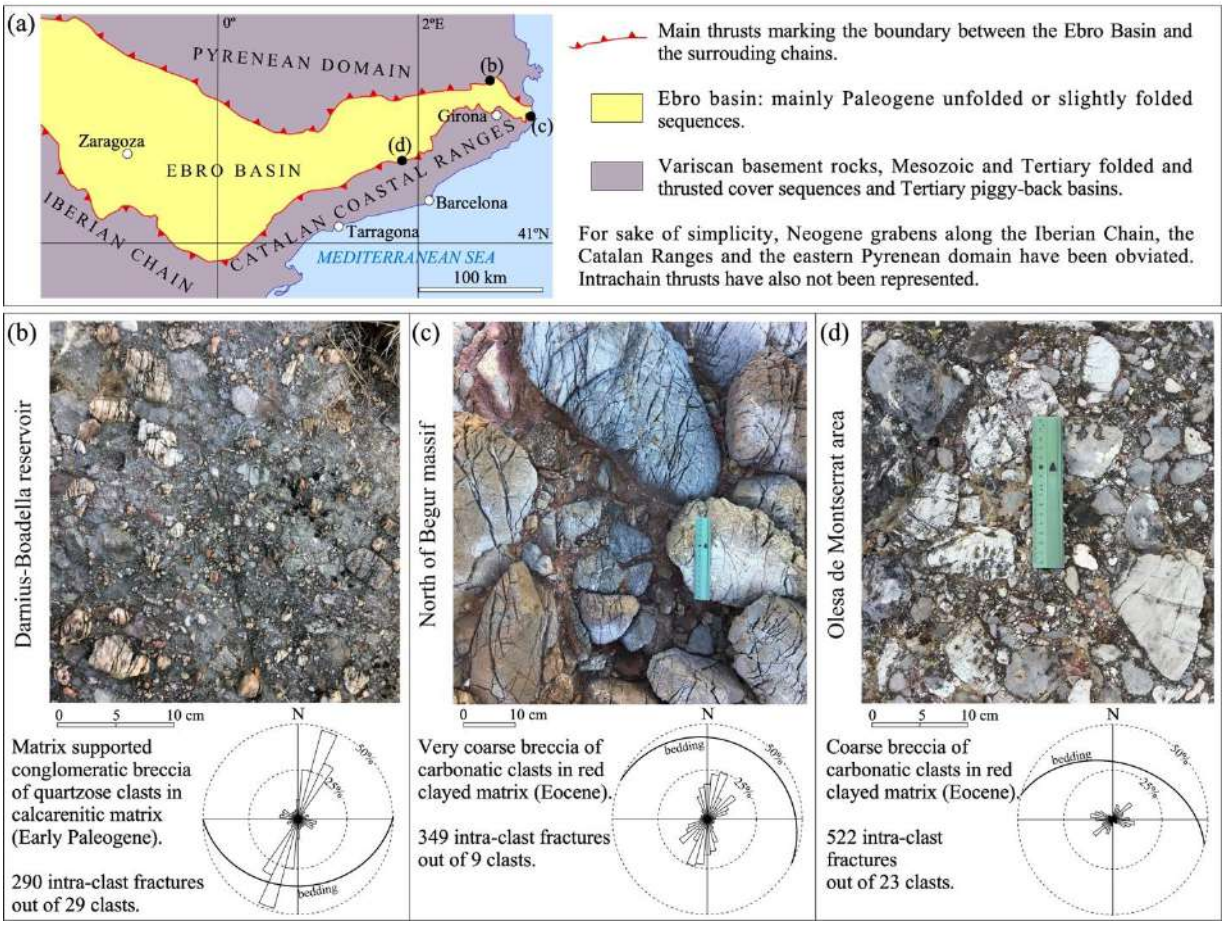


FIGURE 1. *(a) Schematic map of the main geological units of NE Iberia with indication of the studied localities. (b-d) Photographs (sub-horizontal outcrop surfaces) of fractured clasts and rose diagrams of intra-clast fracture azimuths with superposed equal area lower hemisphere projection of mean bedding surface. (b) Darnius-Boadella area. (c) North of Begur massif. (d) Olesa de Montserrat area. Dashed lines are contours of 25% and 50% of total fracture measurements.*

Sismicidad en el sector occidental del margen nor-Ibérico y su relación con la estructura cortical: observaciones preliminares

Seismicity in the Western North Iberian Margin and its relation to crustal structures: preliminary observations

G. Fernández Viejo[1], S. Llana Fúnez[1], C. López Fernández[1], J.M. González Cortina[1], J. Acevedo[1,2], J. Olona[2] y L. Pando[1]

1 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005 Oviedo. fernandezgabriela@uniovi.es, llanasergio@uniovi.es, lopezcarlos@uniovi.es, jmgcortina@uniovi.es, pandoluis@uniovi.es
2 TerraDat España, Avenida del Cristo 113, 33006 Oviedo. javier@terradat.es, jorgeacevedosanchez@outlook.es

Palabras clave: sismicidad, margen nor-Ibérico, fallas alpinas, macizos cristalinos.

Resumen

El margen Ibérico septentrional dejó de ser el límite tectónico activo entre Iberia y Europa en la segunda mitad del Cenozoico, cuando el frente activo se trasladó al margen meridional de la península. Sin embargo, el registro sísmico instrumental muestra una actividad de baja magnitud (predominantemente entre 2 y 3 según el catálogo del IGN), pero persistente con decenas de eventos y una distribución no aleatoria ni homogénea que debe de responder a la existencia de estructuras geológicas tensionadas en la corteza. En este trabajo presentamos una revisión preliminar de la sismicidad regional y de las estructuras geológicas corticales con el potencial de acumular la energía suficiente para explicar la actividad instrumental registrada (Fernández-Viejo et al., 2021). Este análisis preliminar es la base para el diseño de una campaña de registro sísmico que combine una red de estaciones ubicadas en mar y otra integrada por equipos situados en tierra, cuyo primer objetivo es el de precisar la localización en planta y en profundidad de los eventos sísmicos que se producen al borde del margen continental de Iberia frente a las costas occidentales de Asturias y las costas de Lugo y A Coruña.

Abstract

The North Iberian margin ceased being the active plate boundary between Iberia and Europe in the second half of the Cenozoic, when the active front migrated to the south of Iberia. However, the instrumental seismic record shows a low intensity but persistent seismic activity, predominantly between magnitude 2 and 3 according to the IGN catalogue. The tens of earthquakes recorded and their distribution is neither homogeneous nor random, and very likely responds to the presence of crustal geological structures under some stress albeit residual (Fernández-Viejo et al., 2021). Our preliminary analysis constitutes the basis for the proposal of a seismic network that combining records at sea and in land, aims firstly at precise the location in map and at depth of the seismic events nucleated at the edge of the continental margin north of the western coastline of Asturias and the coastlines of Lugo and A Coruña.

Referencias

Fernández-Viejo, G. Llana-Fúnez, S., Acevedo, J. and López-Fernández, C. (2021). *Frontiers in Earth Science*, doi: 10.3389/feart.2021.645061.

Primeros datos sobre la geometría y cinemática de la Falla de la Piedra de La Playa, Complejo Basal de Fuerteventura (Islas Canarias)

First data on the geometry and kinematics of the Piedra de La Playa Fault, Basal Complex of Fuerteventura (Canary Islands)

C. Fernández[1], J. Alonso-Henar[1] y R. Casillas[2]

1 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040-Madrid. jahenar@geo.ucm.es; cafern08@geo.ucm.es
2 Dpto. de Biología Animal, Edafología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de La Laguna, 38200-San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, Islas Canarias. rcasilla@ull.edu.es

Palabras clave: Complejo Basal de Fuerteventura, Falla de la Piedra de la Playa, falla sinestral, falla inversa.

Resumen

Las unidades más antiguas aflorantes en la Isla de Fuerteventura incluyen, por orden de edad, la corteza oceánica emergida con sedimentos de fondo oceánico de edad mesozoica, el Complejo Plutónico Ultra-alcalino de edad oligocena y la Dorsal Volcánica Inicial de edad miocena. Los sedimentos de fondo oceánico afloran extensamente cerca de la costa occidental de la isla, en su sector central, donde se encuentran en posición invertida e intruidos por las rocas del Complejo Plutónico Ultra-alcalino. En el sector más septentrional, cerca de la costa occidental de la isla, la relación entre los sedimentos mesozoicos y el Complejo Ultra-alcalino es incierta. Este contacto aflora, sin embargo, en la costa, cerca de Tindaya, donde es de naturaleza mecánica, formado por una ancha zona de falla que hemos denominado Zona de Falla de la Piedra de La Playa. El núcleo de la zona de falla, con 26 metros de espesor, se orienta en dirección aproximada E-O, buzando >80º hacia el S y muestra estrías con bajos cabeceos (<15º) en ambos sentidos. Incluye brechas de falla y cataclasitas, así como bandas de gran conminución y "gouges" miloníticas. Los criterios cinemáticos indican consistentemente desplazamiento lateral izquierdo. La zona de daño se extiende a lo largo de varias decenas de metros en ambos bloques, aunque de manera asimétrica, con mayor desarrollo en el bloque sur -afectando a los sedimentos, cuya So se dispone en dirección ENE-OSO y sub-vertical-, donde se observan bandas de cizalla anastomosadas, buzando <50º hacia el SE, y con cinemática predominantemente inversa. Los análisis cinemáticos y microtectónicos actualmente en curso pretenden aclarar las relaciones cinemáticas entre todas estas estructuras, así como su edad y su significado tectónico.

Abstract

The oldest units outcropping on the Fuerteventura Island include, in order of age, the emerged oceanic crust with Mesozoic oceanic sediments, the Ultra-Alkaline Plutonic Complex, Oligocene in age, and the Miocene Initial Volcanic Ridge. The oceanic sediments crop out extensively near the western coast of the Island at its central sector, where they are found overturned and crossed in intrusive contact by the rocks of the Ultra-Alkaline Plutonic Complex. In the northernmost sector near the western coast of the Island the relationship between the Mesozoic sediments and the Ultra-Alkaline Complex is uncertain. However, this contact is well exposed at the seaside, close to Tindaya, where it is mechanical and defined by a thick fault zone, which we have called the Piedra de La Playa Fault Zone. The core of the fault zone, 26 meters thick, is oriented in an approximately E-W strike, with a strong dip (>80º) towards the S, and slickenside striations with low pitches (<15º) in both senses. The fault rock includes fault breccias and cataclasites, as well as comminution bands and mylonitic gouges. Kinematic criteria consistently indicate sinistral displacement. The damage zone extends for several tens of meters in both blocks, although, asymmetrically, it is best developed in the southern block (affecting the sediments, whose So is arranged ENE-WSE and sub-vertical). There, anastomosing shear bands are observed, with low dips (<50º) towards the SE, and predominantly reverse kinematics. In progress kinematic and microtectonic analyses aim to clarify the kinematic relationships between all these structures, as well as their age and tectonic significance.

Modelo cinemático para la génesis de tectonitas S bajo transtensión triclínica.

Kinematic model for the origin of S tectonites under triclinic transtension.

C. Fernández[1], M. Díaz Azpiroz[2] y J. Alonso-Henar[1]

1 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. c/ José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid. cafern08@geo.ucm.es; jahenar@geo.ucm.es
2 Dpto. de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide. Crtra. Utrera, km 1, 41013 Sevilla. mdiaazp@upo.es

Resumen: Los modelos cinemáticos clásicos de transtensión tanto monoclínica como triclínica, con cizalla pura como componente coaxial, predicen el desarrollo de elipsoides de deformación finita en el campo de la constricción. En consecuencia, se supone que las fábricas lineares deben ser habituales o incluso predominantes en las zonas de cizalla afectadas por transtensión. Sin embargo, cuando la componente coaxial difiere de la cizalla pura, es posible obtener bajo transtensión elipsoides de deformación finita en el campo del aplastamiento y, por tanto, fábricas planares. Este hecho fue demostrado previamente por otros autores para el caso de la transtensión monoclínica y una componente coaxial oblata. En este trabajo se demuestra que tal situación puede darse también si la transtensión es triclínica y para una componente coaxial de aplastamiento, no necesariamente oblata. Se definen aquí tres tipos de transtensión –C, F(a) y F(b)- en función de la forma y orientación de la componente coaxial. La transtensión F(b) monoclínica o triclínica puede generar fábricas fuertemente planares, especialmente bajo valores de vorticidad bajos o intermedios. Se sugieren distintos tipos de contextos tectónicos en los que esta situación puede ser esperable.

Palabras clave: Transtensión triclínica, tectonitas S, modelo analítico, divergencia oblicua.

Abstract: *Classical kinematic models of both monoclinic and triclinic transtension, with pure shear as a coaxial component, predict the development of finite deformation ellipsoids in the constriction field. Consequently, it is assumed that linear fabrics should be common or even predominant in shear zones affected by transtension. However, when the coaxial component differs from pure shear, it is possible to obtain under transtension ellipsoids of finite deformation in the field of flattening and, therefore, planar fabrics. This fact was previously demonstrated by other authors in the case of monoclinic transtension and an oblate coaxial component. In this work, it is shown that such a situation can also occur for triclinic transtension and a coaxial flattening component, not necessarily oblate. Three types of transtension are defined here –C, F(a), and F(b)- depending on the shape and orientation of the coaxial component. Monoclinic or triclinic F(b) transtension can generate strongly planar fabrics, especially under low or intermediate vorticity values. Different types of tectonic settings are suggested in which this situation can be expected.*

Key words: *Triclinic transtension, S tectonites, analytical model, oblique divergence.*

INTRODUCCIÓN

Los modelos cinemáticos de transtensión monoclínica clásica o extendida predicen mayoritariamente elipsoides de deformación finita situados en el campo de la constricción aparente del diagrama de Flinn (p. ej., Sanderson y Marchini, 1984; Fossen y Tikoff, 1998). Por tanto, es de esperar el desarrollo de tectonitas de tipo L>S o L bajo un régimen cinemático trantensional. Sin embargo, los modelos *A* (especialmente para bajas vorticidades) y *E* (para cualquier vorticidad) de Fossen y Tikoff (1998), que consideran componentes coaxiales de aplastamiento, distintas por tanto de la cizalla pura, son capaces de generar trayectorias de deformación situadas parcial o totalmente en el campo del aplastamiento aparente. En este trabajo se amplían los resultados de Fossen y Tikoff (1998) para el caso de la transtensión triclínica y se sistematizan las situaciones en las que es teóricamente posible encontrar tectonitas de tipo S en dicho contexto cinemático.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO

El tipo cinemático de transtensión triclínica general que se analiza en este trabajo está representado geométricamente en la Figura 1. Se trata de un modelo de flujo homogéneo, isocórico y estacionario. El fundamento cinemático y el desarrollo matemático del modelo fueron presentados por Fernández y Díaz Azpiroz (2009).

Los ejes cartesianos de referencia son X_1 (horizontal y paralelo al borde de la zona de cizalla), X_2 (perpendicular al borde de la zona de cizalla) y X_3 (vertical). Los bloques separados por una zona de cizalla vertical se desplazan alejándose uno de otro de acuerdo con el vector $\overrightarrow{F_d}$ (Fig. 1B).

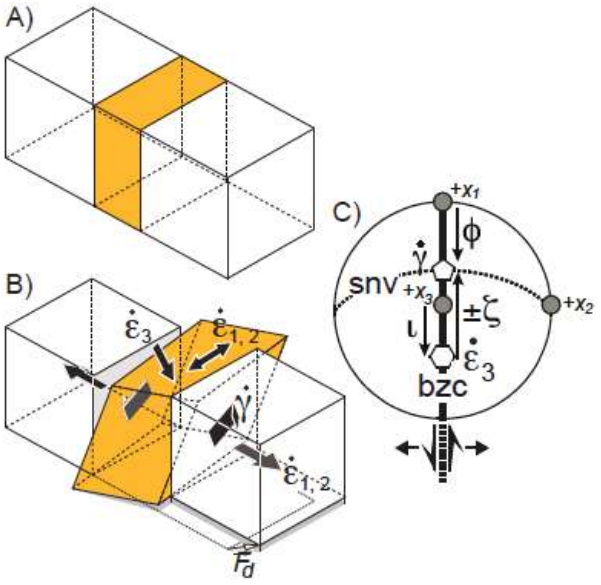


FIGURA 1. *Representación geométrica del tipo cinemático de transtensión triclínica general. A) Estadio previo a la deformación. En color naranja se marca el volumen de roca que será afectado por la deformación. B) Principales elementos cinemáticos de la zona de deformación. De acuerdo con el tipo de transtensión considerado, dos de las tasas de deformación interna de la componente coaxial ($\dot{\varepsilon}_1$, $\dot{\varepsilon}_2$) pueden cambiar su posición o implicar acortamiento o estiramiento (explicación en el texto principal). C) Proyección equiareal, hemisferio inferior, de los elementos cinemáticos para una zona de cizalla vertical (bzc, borde de la zona de cizalla), de dirección N-S y de movimiento lateral izquierdo (snv es la sección normal al vector vorticidad).*

La descomposición de dicho vector produce en el interior de la zona de cizalla un flujo complejo que incluye las siguientes componentes (Fig. 1B, C):

a) Componente no coaxial (cizallamiento simple, $\dot{\gamma}$). La dirección de cizalla simple forma un ángulo φ con respecto al eje X_1. Su posición establece la orientación del vector vorticidad y del plano de máxima asimetría (*snv*, Fig. 1C).

b) Componente coaxial. Viene descrita por las tasas de deformación interna $\dot{\varepsilon}_1$, $\dot{\varepsilon}_2$ y $\dot{\varepsilon}_3$. De ellas, $\dot{\varepsilon}_3$ representa siempre un acortamiento paralelo al borde de la zona de cizalla y forma un ángulo ι con respecto al eje X_3. El ángulo entre las líneas descritas por $\dot{\varepsilon}_3$ y $\dot{\gamma}$ es ζ y mide el carácter triclínico del flujo, que sería monoclínico sólo si $\zeta = 0^\circ$ ó 90°.

De acuerdo con los valores relativos que toman $\dot{\varepsilon}_1$ y $\dot{\varepsilon}_2$ se pueden distinguir tres tipos de flujos:

1) Transtensión de tipo C. La componente coaxial es constrictiva, lo que significa que $\dot{\varepsilon}_1$ (máximo estiramiento) coincide con X_2 mientras que $\dot{\varepsilon}_2$ y $\dot{\varepsilon}_3$ implican acortamiento (mayor para $\dot{\varepsilon}_3$).

2) Transtensión de tipo F(a). Componente coaxial de aplastamiento; $\dot{\varepsilon}_1$ (máximo estiramiento) coincide con X_2 y $\dot{\varepsilon}_3$ conlleva acortamiento, pero ahora $\dot{\varepsilon}_2$ también representa estiramiento.

3) Transtensión de tipo F(b). Componente coaxial de aplastamiento, aunque en este caso es $\dot{\varepsilon}_2$ (estiramiento) quien coincide con X_2, y el máximo estiramiento ($\dot{\varepsilon}_1$) está incluido en el plano de cizalla, igual que el acortamiento $\dot{\varepsilon}_3$.

En la Tabla I se indican los valores de las variables del modelo que se han explorado en este trabajo. Además de los ángulos φ y ι, se han considerado distintos valores del número de vorticidad (W_k, Truesdell, 1953) y del parámetro logarítmico de forma del elipsoide coaxial infinitesimal (K). El caso de transtensión monoclínica o triclínica clásica, en donde la componente coaxial es cizalla pura (es decir, $\dot{\varepsilon}_1$, el máximo estiramiento, coincide con X_2, siendo $\dot{\varepsilon}_2 = 0$ y $\dot{\varepsilon}_1 = -\dot{\varepsilon}_3$), puede simularse con $K = 1$.

	Transtensión C	Transtensión F(a)	Transtensión F(c)
φ	0º, 30º, 60º, 90º		
ι	0º, 30º, 60º, 90º, 120º, 150º		
K	1, 1.73, 3.73, 15	0, 0.27, 0.57, 1	
W_k	0.25, 0.50, 0.70, 0.81, 0.95, 0.99		

TABLA I. *Rango de valores de los parámetros del modelo investigados en este trabajo para los tres tipos de flujo de transtensión triclínica general.*

RESULTADOS

El total de posibles combinaciones de los valores de φ, ι y K de la Tabla I suma 288 casos, por lo que no es posible describir todos en este trabajo. Dado que el objetivo de este estudio es investigar las condiciones bajo las que pueden generarse tectonitas S bajo transtensión, se presentarán aquí principalmente esos resultados en concreto. Se asumirá que sólo elipsoides de deformación finita en el campo del aplastamiento pueden generar tectonitas S. Aunque esta afirmación debe ser muy matizada, se considera que para deformaciones finitas suficientemente grandes puede ser aceptada como aproximadamente válida (Williams, 1976). Hay que tener en cuenta, además, que este trabajo simula historias consistentes en una fase única de deformación. Por su parte, puede demostrarse que el número de vorticidad es independiente de φ y de ι, y el vector vorticidad está contenido en el plano de cizalla y es perpendicular a la dirección de cizalla simple. Las trayectorias de la deformación finita obtenidas dependen principalmente del ángulo ζ, y de los valores de K y de la vorticidad (Fig. 2). Para $K = 0$, los tipos *A* y *E* contemplados por Fossen y Tikoff (1998) se obtienen para $\zeta = 90^\circ$ y $\zeta = 0^\circ$, respectivamente. En esta situación los tipos F(a) y F(b) son indistinguibles. Como predijeron los autores citados, en el tipo *A* se obtienen elipsoides situados siempre en el campo del aplastamiento para valores bajos de vorticidad ($W_k \leq 0.5$), mientras que en el tipo *E* esa situación se consigue para cualquier vorticidad, lo que implica que hay una probabilidad mayor de observar fábricas claramente planares en las condiciones de transtensión del tipo *E* que en las del tipo *A*. En el tipo *E*, además, es posible obtener elipsoides puramente oblatos para un rango amplio de vorticidades ($W_k \leq 0.25$). Este trabajo, sin embargo, permite extender tales resultados a los casos de transtensión triclínica ($\zeta \neq 0^\circ$ ó 90°) y para cualquier valor de K entre 1 y 0.

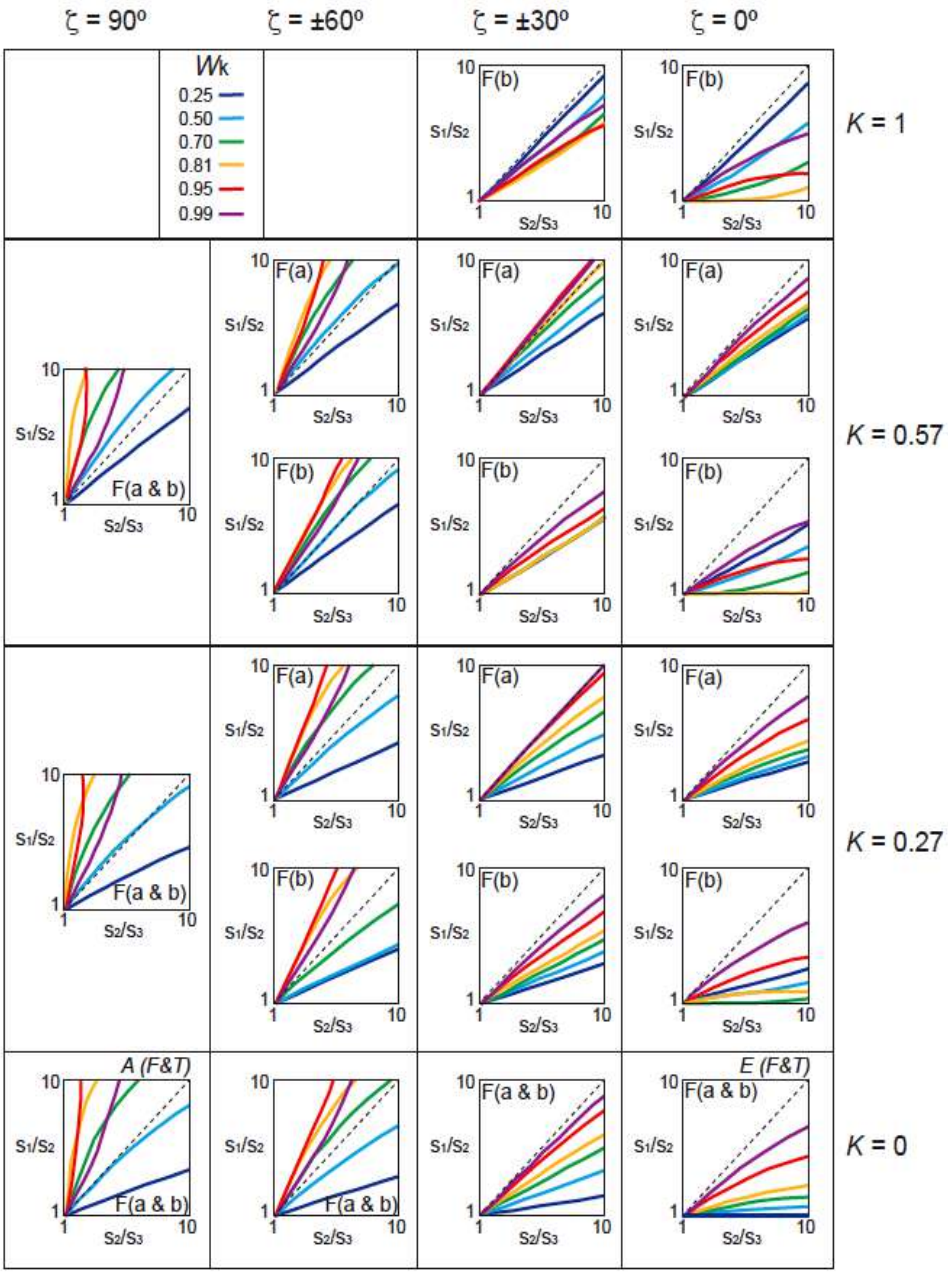


FIGURA 2. *Diagramas logarítmicos de la deformación (*s_1, s_2 *y* s_3 *señalan las deformaciones longitudinales* –stretch- *principales) de los distintos casos en los que el modelo analítico predice trayectorias de deformación en el campo del aplastamiento aparente (real, en este caso, ya que se considera volumen constante). Los tipos cinemáticos* A *y* E *de transtensión monoclínica de Fossen y Tikoff (1998) se señalan junto a su diagrama correspondiente.*

Para flujos triclínicos, cuanto menor sea el valor de ζ (es decir, cuanto más cercanas entre sí se encuentren las direcciones definidas por $\dot{\varepsilon}_3$ y $\dot{\gamma}$), más fácil será obtener trayectorias en el campo del aplastamiento para un rango amplio de vorticidades. Es destacable también la aparición de elipsoides constrictivos cuando ζ se acerca a 90º, incluso para $K = 0$. El efecto del valor de K es más complejo. En primer lugar, los resultados de los tipos F(a) y F(b) difieren para cualquier valor de ζ (excepto 90º) cuando $K \neq 1$ y 0. Sistemáticamente, el tipo F(b) tiende a generar aplastamiento para un rango más amplio de valores de W_k, con mayor cercanía también al eje de los elipsoides oblatos. Por otro lado, en el tipo F(b) y cuando $\zeta = 0º$, para cualquier valor de $K > 0$, la mayor cercanía a los elipsoides oblatos se produce para valores de vorticidad cercanos a la transición entre el flujo dominado por la componente coaxial y el dominado por la componente no coaxial ($W_k \approx 0.81$). Esta situación también se produce cuando $\zeta \neq 0º$ siempre que $K = 1$ (cizalla pura como componente coaxial). La orientación de los ejes principales de la deformación finita varía con cada tipo representado en la Figura 2, pero también dentro de cada valor de ζ, ahora en función del valor concreto que tomen los ángulos φ y ι. En la Figura 3 se muestran algunos ejemplos seleccionados de transtensión F(b). Todos ellos generan fábricas en el campo del aplastamiento. X y Z representan, respectivamente, el eje largo y corto del elipsoide de la deformación finita. La transtensión F(b) monoclínica da lugar a la típica distribución de los ejes X y Z según un círculo mayor coincidente con la sección de máxima vorticidad (Fig. 3A). Las foliaciones resultantes variarán desde perpendiculares a la zona de cizalla, para bajas vorticidades y magnitudes de la deformación finita, hasta el paralelismo con ella. Las situaciones triclínicas

producen una mayor dispersión de los ejes *X* y *Z*, con lineaciones (en el caso de que se desarrollen) que pueden inclinarse en sentidos opuestos (Fig. 3B), o con foliaciones (predominantes) que pueden buzar en sentidos contrarios, especialmente si hay un reparto de la deformación en bandas que absorben distintos valores de vorticidad (Fig. 3C).

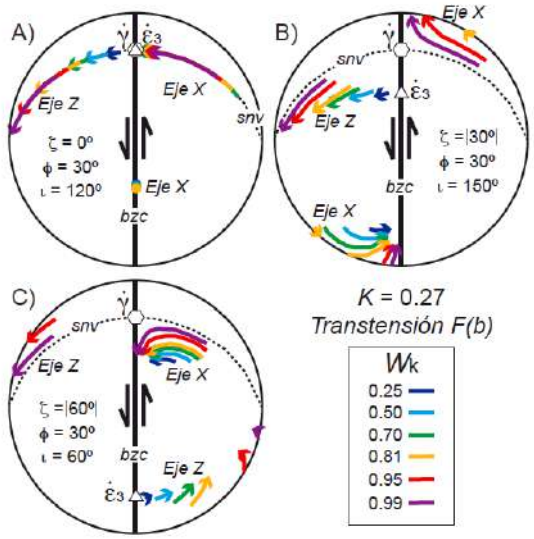


FIGURA 3. *Proyección equiareal, hemisferio inferior, de la orientación de los ejes largo (X) y corto (Z) del elipsoide de la deformación finita predicha para distintos valores de los parámetros del modelo (*W_k*, ángulos* ι *y* ζ*), bajo transtensión de tipo F(b), para* φ *= 20º y* K *= 0.27. A) Ejemplo del caso monoclínico. B) y C) Casos triclínicos con igual valor de* φ *pero distintos valores de* ι.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados del modelo presentado predicen el desarrollo de tectonitas S bajo transtensión. A los casos de transtensión monoclínica de tipo *A* y *E* identificados por Fossen y Tikoff (1998), se suman los de transtensión triclínica descritos en este trabajo. Las situaciones más favorables se dan para la transtensión de tipo F(b) y para bajos valores del ángulo ζ (entre las direcciones de $\dot{\varepsilon}_3$ y $\dot{\gamma}$). Cuando $\zeta = 0^o$ los valores de vorticidad intermedios ($W_k \approx 0.81$) producen elipsoides oblatos (por tanto, fábricas fuertemente planares), mientras que en el resto de los casos la aparición de dichos elipsoides necesita valores bajos de vorticidad (en general, $W_k \leq 0.25$). Las fábricas planares resultantes de estos flujos giran desde la perpendicularidad al paralelismo con el borde de la zona de cizalla, pudiendo observarse buzamientos en sentidos opuestos (o incluso foliaciones alabeadas o aparentemente plegadas) si se produce un reparto de la deformación. Los regímenes tectónicos de transtensión en los que sería esperable la observación de tectonitas S y fuertes fábricas planares, cuando $\varphi \approx 0^o$, serían aquellos de divergencia oblicua en los que pudiese generarse un acortamiento horizontal, según el eje X_1 (y un estiramiento subvertical, con generación de relieve). Por comparación con los casos discutidos por Fossen y Tikoff (1998), en la Figura 4 se ilustran dos situaciones en las que se daría tal condición. Si φ fuera cercano a 90º habría que esperar, por el contrario, estiramiento paralelo a X_1. La revisión de zonas reales en las que pudieran cumplirse estas condiciones cinemáticas podría ser importante para llegar a una mejor comprensión de su evolución y significado tectónicos.

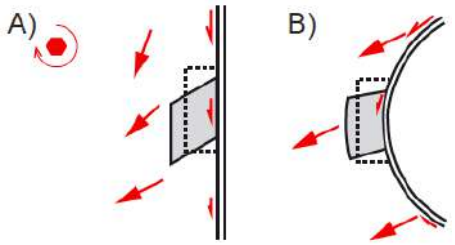


FIGURA 4. *Modelos de situaciones tectónicas de divergencia oblicua (líneas negras paralelas) bajo las cuales es posible obtener tectonitas S en condiciones de transtensión. A) El desplazamiento entre los bloques separados por la zona de divergencia está condicionado por un polo de rotación (hexágono rojo) cercano a la zona, que produce un gradiente de componentes de desplazamiento paralelos al límite y, por tanto, un acortamiento en esa dirección. B) Zona de divergencia curva. Los vectores de desplazamiento relativo se mantienen constantes en dirección. La curvatura produce el gradiente de componentes de desplazamiento que originan el acortamiento paralelo a la zona.*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación de los proyectos PGC2018-100914-B-I00, PID2021-126347NB-I00 y PID2021-124155NB-C31.

REFERENCIAS

Fernández, C. y Díaz Azpiroz, M. (2009): Triclinic transpression zones with inclined extrusion. *Journal of Structural Geology*, 31: 1255-1269.

Fossen, H. y Tikoff, B. (1998): Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings. En: *Transpressional and Transtensional Tectonics* (R.E. Holdsworth, R.A. Strachan y J.E. Dewey, eds.). Geological Society, London, Special Publications, 135, 15-33.

Sanderson, D. y Marchini, R.O. (1984): Transpression. *Journal of Structural Geology*, 6: 449-458.

Truesdell, C.A. (1953): Two measures of vorticity. *Journal of Rational Mechanical Analysis*, 2: 173–217.

Williams, P.F. (1976): Relationships between axial-plane foliations and strain. *Tectonophysics*, 30, 181-196.

Historia de reactivación de las fallas de San Carlos y Liordes (Picos de Europa) a partir del análisis de estructuras y caracterización geoquímica de los minerales asociados

Reactivation history of the San Carlos and Liordes faults (Picos de Europa, NW Spain) based on the analysis of structures and characterisation of related minerals

A. G. Flórez Rodríguez[1], J. García Sansegundo[1], A. Martín Izard[1], D. Pedreira[1], M. Ziegler[2], A. R. Niemeijer[2] y H. J. L. van der Lubbe[3]

1 Dpto. Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005, Oviedo. a.g.florezrodriguez@gmail.com, jgsansegundo@uniovi.es, amizard@uniovi.es, dpedreira@uniovi.es
2 Department of Earth Sciences, Utrecht University (Países Bajos). 3584 CS Utrecht. m.ziegler@uu.nl, a.r.niemeijer@uu.nl
3 Department of Earth Sciences, *Vrije* University Amsterdam (Países Bajos). 1081 HV Amsterdam. h.j.l.vander.lubbe@vu.nl

Palabras clave: Reactivaciones, Picos de Europa, orogenia Alpino, isótopos *clumped*, isótopos de Pb

Resumen

La estructura de los Picos de Europa se caracteriza por un imbricado de cabalgamientos dirigido hacia el sur formado durante la orogenia Varisca. El reconocimiento de la deformación posterior, asociada a diversos contextos tectónicos, se ve obstaculizado por la monotonía litológica de las calizas carboníferas que constituyen el área, y por la similar dirección de acortamiento varisca y alpina. Para determinar la historia de reactivación de fallas de la zona se ha combinado el análisis estructural y técnicas geoquímicas.

Fallas de edad debatida como las de San Carlos y Liordes, de rumbo ONO-ESE y un fuerte buzamiento hacia el NNE, acomodaron un desplazamiento normal durante la extensión del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, contemporáneo de la segunda fase de mineralización descrita para los yacimientos de sulfuros de tipo *Mississippi Valley* de los Picos de Europa (Gómez-Fernández *et al.*, 2000), para la que se han extraído edades modelo de 160-137 Ma (Jurásico Superior - Cretácico Inferior) a partir de la composición isotópica del Pb en la galena. La calcita asociada a fracturas de las zonas de falla registra una temperatura de precipitación de 160-395 °C para esta etapa extensional. Durante el posterior acortamiento alpino, las fallas de San Carlos y Liordes se reactivaron acomodando un desplazamiento dextro con una ligera componente inversa, acompañado de precipitación de calcita a 16-85 °C.

Abstract

The main structure of Picos de Europa (NW Spain) consists of a south-directed thrust imbricate system formed during the Variscan orogeny. It was later deformed by different tectonic stages. To constrain the subsequent Alpine deformation is hindered by the lithological monotony of the Carboniferous limestones of the area and the similarity of Variscan and Alpine shortening directions. The structural analysis combined with geochemical techniques has provided insights into the reactivation history of faults in the area.

Faults like the ones of San Carlos and Liordes, trending WNW-ESE and steeply dipping to the NNE, accommodated a normal displacement during the Late Jurassic-Early Cretaceous extensional event, simultaneous with the second mineralisation phase described for the Mississippi Valley-type ore deposits in Picos de Europa. The isotopic composition of Pb in galena from this phase has provided model ages of 160-137 Ma (Gómez-Fernández *et al.*, 2000). At that time, fault-related calcite precipitated at 160-395 °C. Subsequently, during the Alpine shortening, the San Carlos and Liordes faults reactivated accommodating a dextral displacement with a slight reverse component, coeval with calcite precipitation at 16-85 °C.

Referencias

Gómez-Fernández, F., Both, R., Mangas, J., Arribas-Moreno, A. (2000). *Economic Geology*, 95, 19-40.

Inversión tectónica de la cuenca Vasco-Cantábrica y los Pirineos

Tectonic inversion of the Basque-Cantabrian basin and the Pyrenees

J. García-Senz[1], A. Pedrera[1], B. López-Mir[2]

1 CN IGME_CSIC. Plaza de España, Torre Norte, 41013, Sevilla, jesus.garcia@igme.es, a.pedrera@igme.es
2 Dept. de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Univ. Rey Juan Carlos, ESCET, Madrid, berta.lopez@urjc.es

Palabras clave: Hiperextensión, inversión, tectónica salina, Cuenca Vasco-Cantábrica, Pirineos

Resumen

Los modelos de inversión de cuencas rift hiperextendidas y de tectónica salina han cambiado la comprensión de la cuenca Vasco-Cantábrica y los Pirineos en la última decáda. Sin embargo, tres cuestiones importantes permanecen en discusión: la polaridad de los principales despegues extensionales durante el rifting, el comportamiento resistente del manto exhumado durante la inversión y la cantidad de subducción continental a lo largo de la cadena. El modelo que se presenta, basado en 8 cortes geológicos retrodeformados, describe el estilo estructural y cuantifica la deformación desde la etapa rift a la orogénesis. La configuración de la cuenca Vasco-Cantábrica resulta de la inversión de un rift oblicuo cretácico con importantes espesores de sal triásica movilizada. El principal depocentro es un sinclinal sobre un despegue extensional dirigido hacia el sur que ha favorecido la exhumación del manto bajo el sinclinorio de Vizcaya donde se sitúan el surco flysch, el vulcanismo cretácico y las anomalías grav/mag más prominentes. El acortamiento se consume por *underthrusting* moderado de las cortezas Ibérica y Europea bajo el manto exhumado y por la reactivación del despegue extensional como un cabalgamiento. En los Pirineos, la inversión tectónica estuvo asimismo controlada por la reactivación de las anisotropías heredadas del rift precursor, en especial la longitud de los dominios de *necking* alrededor del manto exhumado. El modelo colisional se sintetiza en tres etapas: (i) aplastamiento de la astenosfera; (ii) indentación del margen norte del rift y (iii) *underthrusting* de la corteza de Iberia. Las restituciones estiman 30-40 km de acortamiento en la C. Vasco-Cantábrica, 90 km en los Pirineos Occidentales, 120-125 km en los P. Centrales, y 40-50 km en los P. Orientales. El modelo incluye novedades en la conexión de los cabalgamientos de basamento-cobertera y en la importancia de la tectónica de gravedad supra-sal en la Zona Surpirenaica Central. Financiado por la AEI (MICINN), PID2020-119651RB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

Abstract

The application of inversion models of hyperextended rift basins and salt tectonics concepts has changed the understanding of the Basque-Cantabrian basin and the Pyrenees in the last decade. However, three issues are still under discussion: the polarity of the main extensional detachments during rifting, the role of the exhumed mantle during inversion, and the amount of continental subduction along the chain. The model presented describes the variations in structural style and quantifies the deformation from rifting to orogeny. The configuration of the Basque-Cantabrian basin results from the inversion of a Cretaceous oblique rift with mobilised Triassic salt. The main depocentre is a supradetachment syncline transported on a southward extensional detachment that favoured exhumation of the mantle in its footwall block where the flysch trough, the Cretaceous basaltic volcanism and the most prominent gravity and magnetic anomalies are located. The shortening is resolved by moderate underthrusting of the Iberian and European crust beneath the mantle dome and reactivation of the extensional detachment as a thrust, resulting in a bivergent orogen. The tectonic inversion in the Pyrenees was also controlled by the reactivation of anisotropies inherited from the precursor rift, in particular the length of the necking domains around the mantle dome. The collision model is synthesised in three stages: (i) squeezing of the asthenosphere, (ii) indentation of the northern rift margin against the southern margin, and (iii) underthrusting of the Iberian crust. The shortening is estimated to be 30-40 km in the Basque-Cantabrian basin, 90 km in the W. Pyrenees, 120-125 km in the C. Pyrenees, and 40-50 km in the E. Pyrenees. In addition, the model includes new features regarding the basement-cover thrust network and the importance of suprasalt gravity tectonics in the South Pyrenean Central Zone.

Una comparación preliminar entre el Golfo de Cádiz y alrededores con el margen de Nueva Escocia.

A preliminary comparison between the Gulf of Cádiz and surroundings with Nova Scotia margin.

C. Giraldo Ceballos [1]

1 U3 Explore, I. Baleares 7, 28691 Madrid, cgiraldoc1958@gmail.com

Resumen: Los márgenes conjugados del océano Atlántico central, actualmente separados por unos 5.000 kilómetros, muestran la transición entre las cortezas continental y la oceánica, acompañada de dos tectono-secuencias mayores (sin-rift y sin-drift). La síntesis geológica aquí presentada permite establecer similitudes, como la presencia de rocas evaporíticas móviles del Triásico Superior - Jurásico Inferior, que han favorecido la deformación de las rocas Mesozoicas y Cenozoicas en ambos márgenes. Asimismo, la interpretación de líneas sísmicas, tanto de reflexión como de refracción, en el Golfo de Cádiz y en la Cuenca del Gharb (Marruecos costa afuera), sugiere la presencia de evaporitas, sobre una corteza continental adelgazada posiblemente hiperextendida, de forma análoga al margen pasivo de Nueva Escocia. De manera esquemática se resumen los principales dominios estructurales para el Golfo de Cádiz y alrededores.

Palabras clave: Márgenes conjugados, evaporitas, corteza oceánica, corteza hiperextendida.

Abstract: *Central Atlantic conjugate margins separated by about 5,000 kilometers, show the transition between continental and oceanic crusts, and two major tectono-sequences (sin-rift, and sin-drift). This geological review allows to establish similarities, such as the presence of mobile evaporites from the Upper Triassic - Lower Jurassic, which have favoured the deformation of Mesozoic and Cenozoic rocks on both margins. Likewise, the interpretation of seismic lines, both reflection and refraction, in the Gulf of Cádiz and Gharb basin (Morocco offshore), suggests the presence of evaporites above a thinned continental crust, possibly hyperextended, analogous to the Nova Scotia passive margin. The main structural domains of Gulf of Cádiz and surrounding areas are schematically summarized.*

Key words: *Conjugate margins, evaporites, oceanic crust, hyperextended crust*

INTRODUCCIÓN

Al observar los rasgos geodinámicos del Atlántico central (Fig. 1), se puede inferir que la plataforma continental de Nueva Escocia sería el margen conjugado del Golfo de Cádiz y la Cuenca del Gharb (fachada nor-occidental marroquí). Dichos márgenes se sitúan al sur del fallamiento transformante de Newfoundland - Las Azores; este elemento tectónico mayor es considerado el límite meridional de los márgenes conjugados del océano Atlántico Norte, que incluyen a Iberia (al este) y a Newfoundland (al oeste). El posible límite entre la corteza oceánica y la corteza continental está indicado en el mapa geológico de la Comisión Geológica Internacional (Fig.1; Bouysse, 2014). Los modelos aquí presentados están basados en datos bibliográficos y en las consideraciones del autor.

Hay discrepancias en cuanto a la evolución geodinámica del Golfo de Cádiz, y también sobre la extensión de la corteza oceánica; se recomienda consultar la síntesis de Decalf y Heyn (2023) para cotejar los diferentes modelos. La evolución geológica de estos dos márgenes tiene una diferencia importante. Esto se debe, a que tanto el sureste de la península ibérica como el noroeste del continente africano (de Marruecos a Túnez), han sido afectados por la colisión entre las placas de Eurasia y de África. Parte del cinturón alpino que aflora al norte y sur del estrecho de Gibraltar (cordilleras Béticas y Rifeña), se continuaría a través de la plataforma continental, al sur de las costas de la ciudad de Cádiz; este cinturón alpino es la extensión más occidental de las deformaciones ocurridas durante los procesos de subducción, obducción y colisión relacionados con la migración al oeste del bloque de Alborán (Maldonado et al.,1999; Somoza et al., 2021).

Druet et al. (2018) han documentado una franja de intensas deformaciones compresivas en el margen continental de Galicia. Se trata de un sistema de cabalgamientos mayores, donde la corteza continental hiperextendida de Iberia cabalga la corteza oceánica del Atlántico norte (inversión tectónica). Estas deformaciones se extienden al este (fachada cantábrica), y se asume que estos cabalgamientos se desarrollan a lo largo del contacto corteza oceánica - corteza continental (zona de debilidad geomecánica).

NUEVA ESCOCIA

La geometría del margen pasivo de Nueva Escocia está documentada por Mousavi et al. (2014). La corteza continental de Norteamérica se adelgaza hacia el sureste,

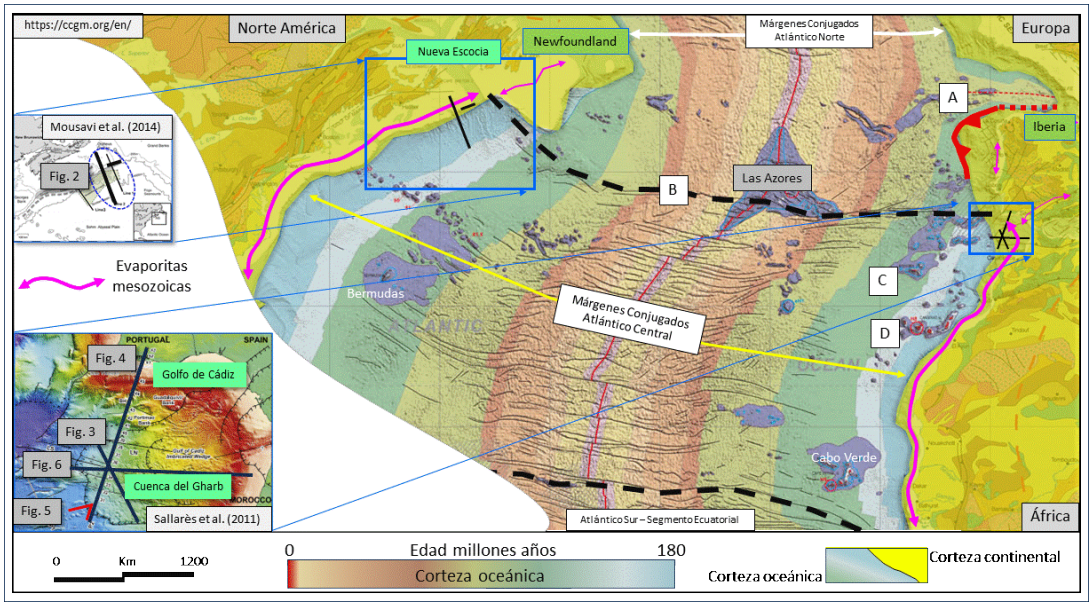


FIGURA 1. *Márgenes conjugados del Atlántico central (Bouysse, 2014); A: Dominio compresivo (Druet et al., 2018); B: Zona de fallas Transformantes Newfoundland - Azores; C y D: Puntos calientes de Madeira e Islas Canarias. Se ubican figuras (2 a 6).*

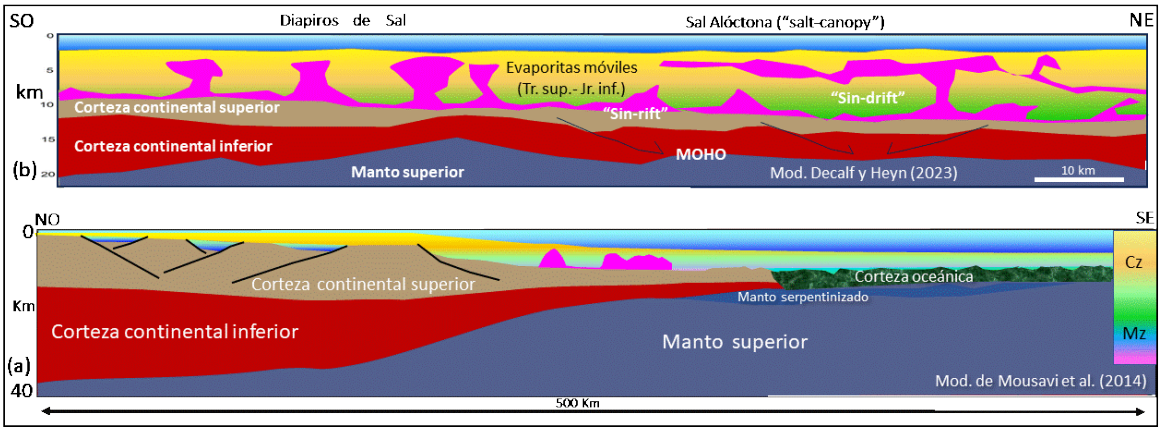


FIGURA 2. *Ejemplo de figura a doble columna (Si el pie de figura es más corto que el ancho de la figura se justificará al centro)*

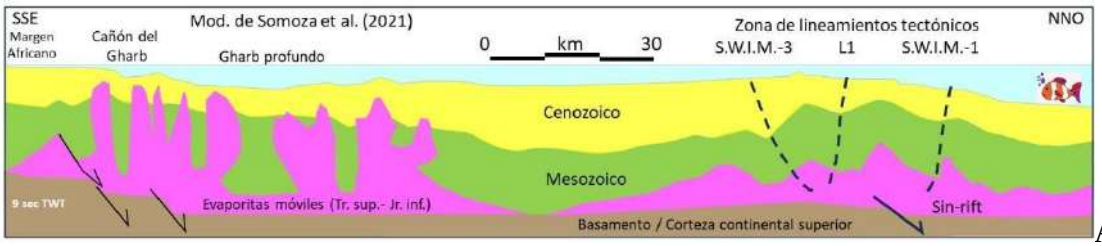


FIGURA 3. *Sección SSE-NNO desde el margen sur ibérico profundo hasta la Cuenca del Gharb (modificado de Somoza et al., 2021). Escala vertical en segundos (tiempo doble). Las evaporitas serían de edad Triásico superior - Jurásico inferior.*

hasta entrar en contacto con la corteza oceánica, pasando por una corteza transicional (Fig. 2). El espesor de la corteza continental adelgazada oscilaría entre unos 7 a 9 kilómetros, y el coeficiente indicador del estiramiento cortical sería alrededor de 4 (factor β). Dos tectono-secuencias mayores han sido definidas. La más antigua o *sin-rift*, comenzó a finales del período Triásico (205 Ma.) y terminó aproximadamente durante el Jurásico inferior (190 Ma.). En esta fase extensional, la corteza sufrió estiramiento cortical y se generaron, entre otras, estructuras tipo *horsts* y *grabens*. La segunda tectono-secuencia (*sin-drift*) comenzó con la expansión de la corteza oceánica del Atlántico central (inicio del margen pasivo) y la edad va del Jurásico inferior-medio hasta el Pleistoceno.

La movilidad de las evaporitas triásico-jurásicas es responsable de las deformaciones estructurales que han ocurrido durante el margen pasivo mesozoico - cenozoico (Fig. 2); no hay evaporitas por encima de la corteza oceánica.

GOLFO DE CÁDIZ

La presencia de las evaporitas triásico-jurásicas (*sin-rift)* se conoce desde las costas meridionales de Portugal,

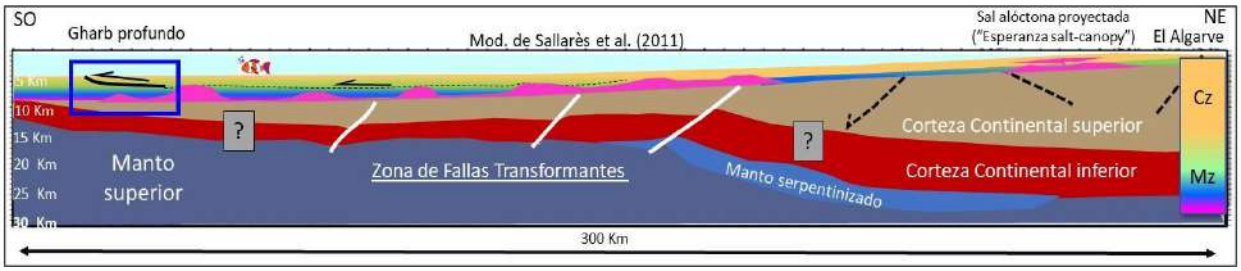


FIGURA 4. *Sección NE-SO (aprox.2:1) entre el Algarve y la Cuenca profunda del Gharb (mod. de Sallarès et al.,2011). Se postula una corteza adelgazada y evaporitas del Triásico superior - Jurásico inferior; el rectángulo azul refiere a la Fig. 5*

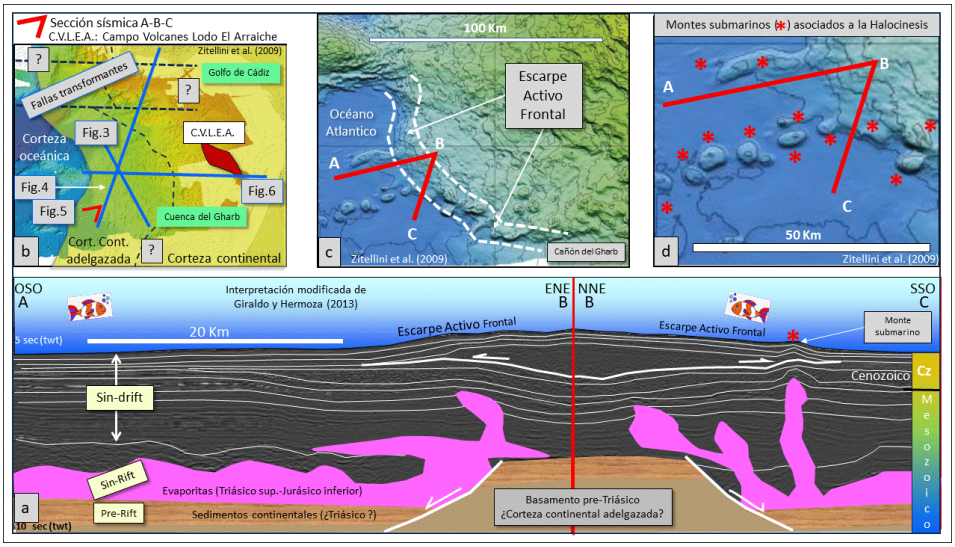


FIGURA 5. (a) *Sección sísmica A-B-C a lo largo del escarpe activo frontal (b) Ubicación regional (ver Fig. 1) ;(c) y (d)) Montes submarinos asociados a evaporitas móviles en profundidad (batimetría de Zitellini et al.,2009).*

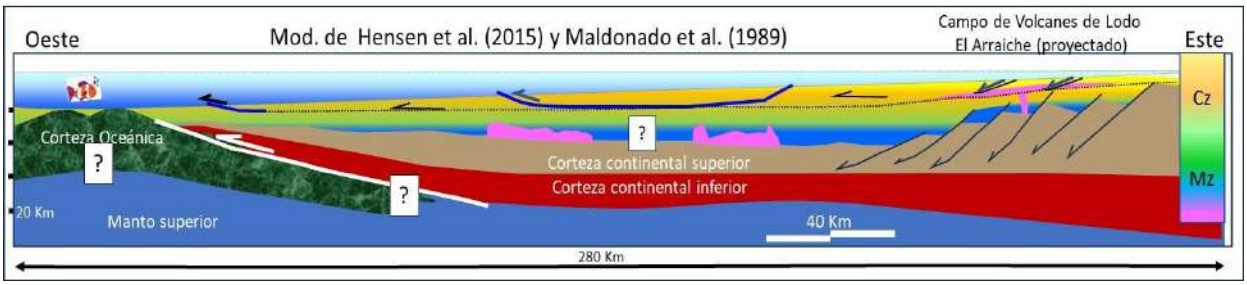


FIGURA 6. *Modelo geológico oeste-este (aprox. 2:1) entre la Cuenca profunda y las costas de Marruecos (modificada de Hensen et al., 2015 y Maldonado et al.,1989). Ver Fig. 5b para la ubicación del campo de volcanes de lodo de El Arraiche (C.V.L.E.A.)*

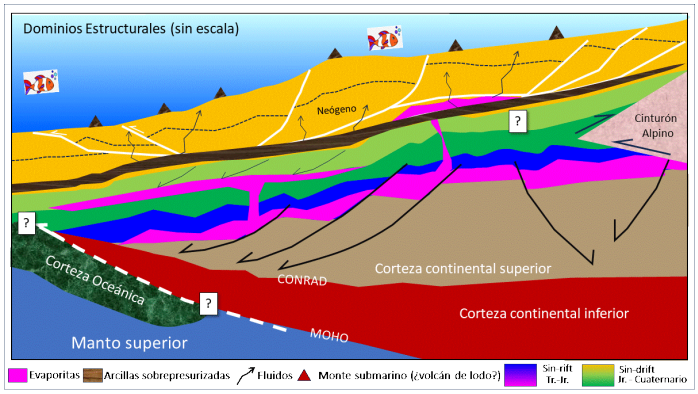


FIGURA 7. *Esquema estructural conceptual para el Golfo de Cádiz y la Cuenca del Gharb.*

hasta las aguas profundas de la Cuenca del Gharb; las mismas continúan por el margen continental africano occidental hacia Cabo Verde (Fig. 1). La interpretación de la sección sísmica SSE-NNO (Fig. 3) sugiere también la presencia de evaporitas móviles (Somoza et al., 2021).

En la sección NE-SO (Fig. 4; modificada de Sallarès et al., 2011) se sugiere la presencia de evaporitas móviles en el prisma sedimentario de la fase *sin-drift* (debido a anomalías de velocidades de las ondas P). A lo largo de la misma, también se interpretan fallas transformantes y una corteza continental adelgazada; hacia el extremo sur, se conocen montes submarinos posiblemente inducidos por halocinesis (Fig. 5).

En otros sectores del Golfo de Cádiz y de la Cuenca del Gharb (Zitellini et al., 2009; Somoza et al., 2021) también existen montes submarinos, volcanes de lodo, escarpes y mini-depresiones asociados a estructuras halocinéticas. En algunos casos, hay volcanes de lodo, vinculados genéticamente a fluidos provenientes de las evaporitas triásico-jurásicas. Tal sería el caso del campo de volcanes de El Arraiche (C.V.L.E.A.) frente a las costas de Marruecos (Pérez - García et al., 2011). Se indica la localización geográfica y ubicación proyectada en la sección geológica (Figs. 5 y 6 respectivamente).

A manera de resumen, se presenta una síntesis de los dominios estructurales mayores (Fig. 7). Se destaca la movilidad de las evaporitas triásico-jurásicas, que han generado mantos de sal alóctonos ("*salt-canopies*") durante el Cretácico y el Neógeno. Las deformaciones gravitacionales en la cobertera terciaria, así como la halocinesis serían procesos activos hoy en día.

CONSIDERACIONES FINALES

De manera preliminar se sugiere la presencia de corteza continental hiperextendida en el Golfo de Cádiz y Cuenca del Gharb. Las evaporitas se ubican por encima de un basamento de afinidad continental.

Es tema de gran interés validar el contacto entre corteza oceánica y continental. Se recomienda la elaboración de secciones geológicas balanceadas para ajustar los diferentes modelos, afinar las fases de deformaciones tectónicas y estimar los factores β correspondientes.

Se sugiere evaluar la posible relación entre la movilidad de las evaporitas con la micro-sismicidad somera (< 8 km) asociada a fallas recientes en el prisma sedimentario mesozoico-cenozoico (fenómeno conocido en el golfo de México).

AGRADECIMIENTOS

A los colegas Wilber Hermoza, Adrià Ramos, Hugo Matías, Joan Flinch y Luis Somoza por sus amenas y didácticas charlas sobre la geología del Golfo de Cádiz.

REFERENCIAS

Bouysse, Ph. (2014): *Geological Map of the World at 1:35 M 3rd edition, revised*, C.G.M.W., Paris.

Decalf, C., y Heyn, T. (2023): Salt geometry in the Central Basin of the Nova Scotia passive margin, offshore Canada based on new seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 149: 106065.

Druet, M., Muñoz-Martín, A., Granja-Bruña, J., Carbó-Gorosabel, A., Acosta, J., Llanes, P. y Ercilla, G. (2018): Crustal structure and continent-ocean boundary along the Galicia continental margin (NW Iberia): Insights from combined gravity and seismic interpretation. *Tectonics*, 37: 1576-1604.

Hensen, C., Scholz, F., Nuzzo, M., Valadares, V., Gracia, E., Terrinha, P., Liebetrau, V., Kaul, N., Silva, S., Martinez - Loriente, S., Bartolome, R., Pinero, E., Magalhaes, V. H., Schmidt, M., Weise, S. M., Cunha, M., Hilario, A., Perea, H., Rovelli, L. y Lackschewitz, K. (2015): Strike-slip faults mediate the rise of crustal-derived fluids and mud volcanism in the deep sea. *Geology*, 43(4): 339-342.

Maldonado, A., Somoza, L. y Pallarés, L. (1999): The Betic orogen and the Iberian – African boundary in the Gulf of Cádiz: geological evolution (central North Atlantic). *Marine Geology*, 155: 9-43.

Mousavi, S. M., Cramer, C. H. y Langston, C. A. (2014): Average QLg, QSn, and observation of Lg blockage in the Continental Margin of Nova Scotia, *Journal. Geophys. Res. Solid Earth*, 119: 7722-7744.

Pérez-García, C., Berndt, Ch., Klaeschen, D., Mienert, J., Haffert, L., Depreiter, D. y Haeckel, M. (2011): Linked halokinesis and mud volcanism at the Mercator mud volcano, Gulf of Cádiz, *J.G.R.,* 116, B05101.

Sallarès, V., Martínez-Loriente, S., Prada, M., Grácia, E., Ranero, C., Gutscher, M., Bartolome, R., Gailler, A., Dañobeitia, J. y Zitellini, N. (2013): Seismic evidence of exhumed mantle rock basement at the Gorringe Bank and the adjacent Horseshoe and Tagus abyssal plains (SW Iberia), *Earth Planetary Science Letters 365, 120-131.*

Somoza, L., Medialdea, T., Terrinha, P., Ramos, A. y Vázquez, J.T. (2021): Submarine Active Faults and Morphotectonics Around the Iberian Margins: Seismic and Tsunamis Hazards. *Frontiers Earth Science* 9: 653639.

Zitellini, N., E. Gràcia, L. Matias, P. Terrinha, M. A. Abreu, G., De Alteriis, J. P., Henriet, J. J., Dañobeitia, D. G., Masson, T., Mulder, R., Ramella, L., Somoza L. y Diez, S. (2009): The quest for the Africa-Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 280: 13-50.

Estudio geológico-estructural de la falla de Manteigas-Vilariça-Bragança (NW Península Ibérica): evolución desde su formación y reactivaciones

Structural-geological study of the Manteigas-Vilariça-Bragança fault (NW Iberian Peninsula): evolution since its formation and reactivations

S. González-Muñoz[1] y F. Martín-González[1]

1 Área de Geología - ESCET, TECVOLRISK Research Group, Universidad Rey Juan Carlos. C/Tulipán s/n, Móstoles, 28933, Madrid, Spain. E-mail address: sandra.gonzalezmu@urjc.es; fidel.martin@urjc.es

Palabras clave: Tardi-varisco, poliorogénico, fallas intraplaca, strike-slip

Resumen

En el NW de la Península Ibérica se encuentra una gran falla de desgarre sinextral que es actualmente activa y que se atribuye al final de la Orogenia Varisca (Ribeiro, 1974): Falla de Manteigas-Vilariça-Bragança (MVB). Su formación, posteriores reactivaciones y su actual papel como falla activa en la Península Ibérica es aún objeto de debate (e.j. Martín-González *et al*., 2012). En este trabajo se estudia la evolución de esta falla, combinando metodologías de la geología estructural y cartografía geológica. Los resultados indican que la historia de la falla es compleja, con múltiples etapas de reactivación durante las Orogenias Varisca y Alpina. Se inicia la actividad bajo un comportamiento dúctil, anterior al final de la Orogenia Varisca (355-340 Ma), en el segmento norte con un desplazamiento máximo de ~10 km. La primera reactivación se situaría después de la intrusión y enfriamiento de los granitos sin-cinemáticos (320-305 Ma; desplazamiento de ~4km), finalizando su actividad antes de la entrada de los granitos post-tectónicos (299–290 Ma). La última reactivación registrada se produce durante la compresión Alpina la cual resulta en un desplazamiento aproximado de 1 km de tipo desgarre sinextral.

Abstract

In the NW of the Iberian Peninsula there is a major sinistral strike-slip fault currently active and attributed to be formed at the end of the Variscan Orogeny (Ribeiro, 1974): the Manteigas-Vilariça-Bragança (MVB) fault. Its formation, reactivation phases and the role as active fault in the Iberian Peninsula are under discussion (e.g. Martín-González *et al.*, 2012). In this study, we focus on the study of the evolution of the MVB fault, combining structural geology and geological mapping techniques. Our results highlight the complex history of this fault, with multiple reactivation phases during the Variscan and Alpine Orogenies. Its activity started with a ductile behavior before the Variscan Orogeny (355-340 Ma) and a maximum displacement of ~10 km in the north segment. The first reactivation was after the intrusion and cooling of syn-tectonic granites (320-305 Ma; ~4 km displacement), ending its activity before the intrusion of post-tectonic granites (299-290 Ma). The last recorded reactivation takes place during the alpine compression with an approximate sinistral strike-slip displacement of 1km.

Referencias

Martín-González, F., Barbero, L., Capote, R., Heredia, N., y Gallastegui, G. (2012). *International Journal of Earth Sciences*, *101*(5), 1331–1342. https://doi.org/10.1007/s00531-011-0712-9

Ribeiro, A. (1974). *Memorias dos Serviços Geológicos de Portugal*. *24*, 1–179.

Estudio de modelos análogos sobre la influencia de la reología en el comportamiento de fallas strike-slip: Resultados preliminares.

Study of analogue models to analyse the influence of rheology on the behavior of strike-slip faults: Preliminary results.

S. González-Muñoz[1], M. Rincón[1] y F. Martín-González[1]

1 Área de Geología - ESCET, TECVOLRISK Research Group, Universidad Rey Juan Carlos. C/Tulipán s/n, Móstoles, 28933, Madrid, Spain. E-mail address: sandra.gonzalezmu@urjc.es; marta.rincon@urjc.es; fidel.martin@urjc.es

Palabras clave: Fallas Strike-slip, cohesión, reología, evolución de fallas

Resumen

En este estudio se emplean modelos análogos a escala para evaluar el papel de los contrastes reológicos verticales, como el cambio litológico, en la geometría de las fallas strike-slip. Los contrastes reológicos de la corteza inciden en el coeficiente de fricción de Coulomb, condicionando así la segmentación, el desplazamiento y la orientación del campo de esfuerzos regional. Cómo se conecten los diferentes segmentos, considerando las variaciones litológicas que atraviesan este tipo de fallas que suelen tener importantes longitudes, influye en la formación y geometría final de las fallas. En nuestros experimentos, el cambio litológico se ha alcanzado modificando los valores de cohesión de los materiales granulares mezclando arena de cuarzo y yeso en diferentes proporciones. Los resultados preliminares muestran que los valores de cohesión pueden afectar al comportamiento de las fallas tipo strike-slip.

Abstract

In this study, scaled analogue models are used to evaluate the role of vertical rheological contrasts, such as lithological changes, in the geometry of strike-slip faults. The rheological contrasts of the crust influence the Coulomb friction coefficient, thus conditioning the segmentation, displacement and orientation of the regional stress field. How the different segments are connected, considering the lithological variations that this type of faults crosscut (they usually have significant lengths), influences the formation and final geometry of the faults. In our experiments, the lithological changes have been achieved by modifying the cohesion values of the granular materials by mixing quartz sand and gypsum in different proportions. The preliminary results show that cohesion values can affect the behavior of strike-slip faults.

Revisión, reinterpretación y reconstrucción 3D de la Falla Norpirenaica.

Review, reinterpretation and 3D Reconstruction of the North Pyrenean Fault.

O. Gratacós[1,2], J.A. Muñoz[1,2] y L. Serra[3]

1 Institut de Recerca UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, UB, 08028 Barcelona, ogratacos@ub.edu, jamunoz@ub.edu
2 Dpt. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona 08028 Barcelona
3 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc, s/n, 08038, Barcelona. Laura.Serra@icgc.cat

Palabras clave: Reconstrucción 3D, Falla Norpirenaica, Margen, Inversión, Hiperextensión.

Resumen

La Falla Norpirenaica (FNP) es una de las estructuras más importantes de los Pirineos. Marca el límite entre la Zona Axial Pirenaica (al Sur), constituida por un apilamiento de unidades estructurales de vergencia Sur que involucra rocas del basamento hercínico, y la Zona Norpirenaica (al Norte), caracterizada por un sistema de pliegues y cabalgamientos principalmente de vergencia Norte que resultaron de la inversión de las cuencas del Cretácico Inferior. Estas cuencas se formaron en el dominio hiperextendido del rift pirenaico y conllevaron un metamorfismo HT-LP y la exhumación de materiales mantélicos. Considerada clásicamente como el límite entre las placas Ibérica y Europea, su magnitud y complejidad evolutiva, así como la escasez de afloramientos, han inducido a diferentes interpretaciones tanto geodinámicas como geométricas. Estudios más actuales, así como los derivados del perfil profundo ECORS, han contribuido a interpretarla como una falla extensiva asociada a la hiperextensión de la corteza y la exhumación del manto y posteriormente incorporada al orógeno. Aun así, la falta de entendimiento en su evolución posterior asociada a la etapa compresiva y, por lo tanto, a su deformación, han hecho que la interpretación final de la FNP siga presentando ciertas incoherencias tanto en su trazado como en su geometría en profundidad. Así, en esta contribución, a partir del análisis de la traza de la FNP, así como de datos publicados, se presenta una revisión y reinterpretación de ciertas zonas o áreas que pueden contener interpretaciones erróneas o incoherentes con las interpretaciones más nuevas y actuales. Esto ha permitido obtener tanto una traza coherente en toda su extensión, como una reconstrucción 3D en profundidad de toda la FNP y estructuras asociadas.

Abstract

The North Pyrenean Fault (NPF) is one of the most important structures in the Pyrenees. It marks the boundary between the Pyrenean Axial Zone (to the South), characterized by a stacking of south-verging structural units involving rocks from the Hercynian basement, and the North Pyrenean Zone (to the North), characterized by a system of mainly north-verging folds and thrusts that inverted Lower Cretaceous basins. These basins formed in the hyperextended domain of the Pyrenean rift and led to HT-LP metamorphism and mantle exhumation. The NPF has been classically considered the boundary between the Iberian and European plates. However, there is not yet an agreement concerning its geometry and evolution, resulting in different interpretations. More recent studies, as well as those derived from the ECORS deep seismic reflection profile, have contributed to interpreting the NPF as an extensional fault associated with crustal hyperextension and mantle exhumation, which has been subsequently incorporated into the orogen. Nevertheless, the lack of understanding of its contractional deformation, has resulted in some uncertainties concerning the map trace of the NPF as well as the interpretation of its geometry at depth. Based on the analysis of the NPF map trace combined with published data, a revision and reinterpretation of certain areas is presented in this contribution. This has allowed for obtaining both a coherent map trace throughout its entire extent and a 3D reconstruction in depth of the entire NPF and its associated structures.

Evolución del margen Ibérico durante la orogenia alpina: indicaciones del macizo de Eaux-Chaudes (Zona Axial pirenaica occidental) derivadas de la geocronología de U-Pb y de la termocronología (U-Th)/He en zircones

Evolution of the Iberian margin during the alpine orogeny: constraints from the Eaux-Chaudes massif (western Pyrenean Axial Zone) after U-Pb geochronology and zircon (U-Th)/He thermochronology

M. Guardia[1], A. Griera[1], A. Teixell[1], R. Chatterjee[2], D. Stockli[2], L. Stockli[2] y N. Caldera[3]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona).
marc.guardiaa@gmail.com; albert.griera@uab.cat; Antonio.teixell@uab.cat; rudra025@gmail.com; stockli@jsg.utexas.edu; lstockli@jsg.utexas.edu; norbert.caldera@icgc.cat
2 Jackson School of Geosciences, University of Texas at Austin, TX 78712-1692 Austin.
3 Institut cartogràfic i Geològic de Catalunya, 08038 Barcelona.

Palabras clave: Tectónica, Pirineos, Zona Axial, geocronología, termocronología

Resumen

El macizo de Eaux-Chaudes (ECM) es una estructura de pliegues y cabalgamientos vergente al sur constituida durante la compresión Alpina, y se encuentra en el sector occidental de la Zona Axial pirenaica (Pirineo Francés). La estructura en el valle de Ossau consiste en un pliegue recumbente de núcleo Paleozoico (basamento), con un largo flanco recumbente afectando a los carbonatos del Cretácico Superior, que muestran deformación dúctil. La paleotermometría Raman indica que durante la deformación se alcanzaron paleotemperaturas de ~350°C en el flanco inverso y en el autóctono, y de ~310°C en el flanco normal de la estructura. En este trabajo se presenta un estudio sistemático de venas de calcita sin- y post-tectónicas, así como la historia de deformación y exhumación del macizo de Eaux-Chaudes acotada mediante geocronología de U-Pb en calcita, termocronología (U-Th)/He en zircones y simulaciones tiempo-temperatura mediante el software QTQt. Las edades obtenidas por geocronología indican que el principal evento de plegamiento y cabalgamiento ocurrió entre 48.87±5.66 Ma y 38.14±5.99 Ma, y a partir de entonces comenzó la exhumación coincidiendo con la acreción de cabalgamientos inferiores tipo thick-skinned que levantaron la Zona Axial del Pirineo. Por otro lado, los resultados de termocronología indican que la exhumación del macizo lugar entre ~40 y ~20 Ma, coincidiendo las edades de emplazamiento durante el Bartoniense y el Mioceno inferior (~38 – 20 Ma) de los cabalgamientos que involucran el basamento de la Zona Axial.

Abstract

The Eaux-Chaudes massif (ECM) is a south-verging fold-and-thrust structure located in the western Axial Zone (French Pyrenees) and was constituted in Alpine times. In the Ossau valley, it consists of a basement-cored recumbent fold nappe with a large recumbent limb in Upper Cretaceous carbonates which display strong ductile deformation. Paleotemperatures by Raman of ~350°C for the autochthonous succession and the overturned limb, and ~310°C for the normal limb of the structure were recorded during the main deformational event. Here, we present a systematic study of syn- and post-tectonic calcite veins as well as the deformation and exhumation history for the Eaux-Chaudes massif, constrained by means of U-Pb geochronology of the veins, low-temperature (U-Th)/He thermochronology in zircons and QTQt software time-temperature simulations. Geochronology results indicate that the main folding and thrusting event occurred between 48.87±5.66 Ma and 38.14±5.99 Ma, after that the exhumation process started coinciding with the onset of thick-skinned basement thrust stacking that raised up the Axial Zone of the Pyrenees. The thermochronology results indicate that the exhumation of the massif occurred between ~40 and 20 Ma, coinciding with the emplacement ages between Bartonian and lower Miocene (~38 – 20 Ma) of the basement-involved thrust sheets of the Axial Zone.

Nueva interpretación estructural y modelización numérica de la cuenca de Cameros (La Rioja)

New structural interpretation and numeric modelling of the Cameros basin (La Rioja)

M. Ibáñez-Belloso[1] A. Teixell[2], M. Guardia[3], A. Griera[4] y E. Saura[5]

[1] Departament de Geología, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain. miguel.ibanez.belloso@uab.cat, antonio.teixell@uab.cat, marc.guardia@uab.cat, albert.griera@uab.cat, eduard.saura@uab.cat

Palabras clave: salt tectonics, inverted basins, halokinetic sequences, numerical modelling, Cameros basin

Resumen

La aplicación de la tectónica salina en la reinterpretación de la evolución de cuencas sedimentarias invertidas ha desempeñado un papel importante recientemente. Aunque ha sido objeto de varios modelos en debate, no existen tales precedentes en la cuenca de Cameros, y el propósito de este estudio es documentar un modelo de extensión e inversión aplicado al margen norte de la cuenca, invocando diapirismo en relación con fallas de zócalo. Tras la actualización de la cartografía geológica de un sector de la cuenca, la construcción de cortes representativos y la restitución secuencial, se propone un nuevo modelo de *drape folding* en una minicuenca subsidente, en el que las evidencias para invocar la tectónica salina son, además de la bien conocida migración de depocentros, el reconocimiento de secuencias halocinéticas en torno al margen norte, la existencia de un *megaflap* en el valle del Cidacos y la truncación de unidades estratigráficas por una exposición de facies Keuper, ahora definida como la *salt-wall* Norcamerana. Así, se interpreta que la deposición de los estratos sin-extensionales del Jurásico superior a Cretácico inferior está controlada por la subsidencia y migración salina hacia el frente Norcamerano. El modelo se ha sometido a la modelización numérica termomecánica usando el código de diferencias finitas LaMEM, apoyada en datos paleotermométricos y termocronológicos publicados (Ducoux et al., 2021).

Abstract

The application of salt tectonics in the reinterpretation of the evolution of inverted sedimentary basins has become relevant. Several models are in debate, but there is no precedent in the Cameros basin. The objective of this study is to document a model of extension and inversion of a salt-related rifted margin that is applicable to the northern Cameros margin. An updated geological map, the construction of representative cross-sections and their sequential restoration before the inversion of the basin lead to a new model of drape folding in a subsiding minibasin associated with a basement fault. The main evidence in the invoking of salt tectonics is, in addition to the well-known depocenter migration reported in the area, the recognition of halokinetic sequences along the northern margin, the recognition of a megaflap in the Cidacos valley, and the truncation of stratigraphic units by a diapiric exposure of Keuper facies, now defined as the northern Cameros salt-wall. Thereby, the syn-extensive deposition of the upper Jurassic to lower Cretaceous strata is controlled by subsidence and salt migration towards the northern Cameros front. The proposed model is tested by thermomechanical numerical modelling (finite-difference LaMEM code) of the basin based on published paleothermometric and thermochronologic data (Ducoux et al., 2021).

Referencias

Ducoux, M., Jolivet, L., Masini, E., Augier, R., Lahfid, A., Bernet, M., y Calassou, S. (2021). Distribution and intensity of High-Temperature Low-Pressure metamorphism across the Pyrenean-Cantabrian belt: Constraints on the thermal record of the pre-orogenic hyperextension rifting. *BSGF - Earth Sciences Bulletin*, *192*. https://doi.org/10.1051/bsgf/2021029

Inversión de las cuencas de Ballongue-Baronnies (Zona Norpirenaica): Aportación de la fábrica magnética y el paleomagnetismo

Tectonic inversion of the Ballongue and Baronnies basins (North Pyrenean Zone): Insights from magnetic fabrics and paleomagnetism

M. Marcén[1,2], P. Calvín[3], E. Izquierdo-Llavall[3] y P. Santolaria[4]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra-Geotransfer, IUCA, Universidad de Zaragoza, Spain. mma@unizar.es
2 Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09006 Burgos, Spain
3 CN IGME-CSIC, Unidad de Zaragoza, 50820, Zaragoza. p.calvin@igme.es; e.izquierdo@igme.es
4 Departament de Dinàmica de la Terra i de L'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Institut de Recerca Geomodels, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, Spain. p.santolaria.otin@ub.edu

Palabras clave: cuencas norpirenaicas, fábricas magnéticas, paleomagnetismo, cortes geológicos.

Resumen

La estructura de la Zona Norpirenaica (ZNP) es resultado de la inversión durante el Cretácico Superior-Cenozoico de las cuencas mesozoicas formadas en un contexto de rifting, adelgazamiento cortical extremo y exhumación mantélica. El presente estudio se centra en dos cuencas de la zona central de la ZNP, Ballonge y Baronnies, en las que se ha realizado un estudio estructural, paleomagnético y de fábricas magnéticas a lo largo de dos cortes geológicos. Los cortes geológicos muestran un desacople significativo entre el basamento y la cobertera a favor de las evaporitas triásicas (facies Keuper), mayor en la cuenca de Baronnies y menor en la parte sur de la cuenca de Ballongue. El estudio de fábricas magnéticas indica que ~70% de las estaciones muestreadas reflejan la compresión Cretácico Superior-Cenozoica, con lineaciones magnéticas paralelas a la dirección de estratificación y/o a las estructuras compresivas. Sin embargo, el 30% de estaciones restantes presentan fábricas consistentes con la extensión N-S a NE-SW, con lineaciones magnéticas contenidas en la estratificación y perpendiculares u oblicuas a la dirección de las capas y estructuras compresivas. Estas direcciones de extensión son también compatibles con las deducidas a partir de venas de extensión, fallas y zonas de cizalla normales reconocidas en campo. El estudio paleomagnético preliminar revela una remagnetización de polaridad normal posterior a parte del plegamiento, que podría ser mesozoico, si bien se identifican otras componentes que parecen ser coetáneas al plegamiento alpino. La integración del conjunto de datos obtenidos permite constreñir la evolución estructural del sector estudiado desde las etapas de rifting hasta las etapas finales de la orogenia alpina.

Abstract

The structure of the North Pyrenean Zone (NPZ) results from the Late Cretaceous-Cenozoic inversion of an earlier Mesozoic rift that culminated in extreme crustal thinning and mantle exhumation. This study focuses on two of the basins that form the central NPZ rift: the Ballongue and Baronnies basins. An integrated structural, paleomagnetic, and magnetic fabrics study was carried out along two regional-scale cross-sections in these basins. The constructed cross-sections show that Triassic evaporites (Keuper fcs.) decouple the basement and cover deformation. The degree of decoupling is stronger in the Baronnies basin and limited in the southern part of the Ballongue basin. The magnetic fabric analysis indicates that ~70% of the sampled sites reflect the Late Cretaceous-Cenozoic compression, as evidenced by magnetic lineations that are parallel to bedding strike and/or compressive structures. However, the remaining 30% of sites are characterized by magnetic lineations that lay in bedding and trend obliquely or perpendicularly to the strike of bedding/compressional structures consistent with N-S to NE-SW extension. The inferred extensional directions from magnetic fabrics agree with the extension direction inferred from structural markers, such as extensional veins, normal faults and shear zones. The preliminary paleomagnetic study shows a normal polarity remagnetization acquired after part of the folding, which could be Mesozoic. However, other remagnetized syn-folding or syn-tilting components that could be related to the basin inversion are also identified. The integrated interpretation of magnetic and structural data will help constrain the structural evolution of the study area from the Mesozoic rifting to the Cenozoic inversion.

Estructura y contexto tectónico de la depresión cenozoica de Maceda en el Orógeno Alpino

Structure and tectonic context of the Maceda Cenozoic depression in the Alpine Orogen

F. Martín-González[1], E. Barrón[2] y A. Martín-Serrano[2]

1 Área de Geología, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, 28933 Madrid, Spain. fidel.martin@urjc.es
2 Instituto Geológico y Minero de España – CSIC, 28760 Ríos Rosas, Madrid. Spain. e.barron@igme.es; a.martinserrano@igme.es

Palabras clave: Galicia, Sedimentación Cenozoica, Orogenia Alpina, Palinología

Resumen

La depresión de Maceda representa los restos de una antigua cuenca cenozoica situada en el noroeste peninsular que forma parte de una serie de depresiones y cuencas sedimentarias detríticas continentales dispersas y desconectadas entre sí (Martín-González *et al.*, 2014). Concretamente, la de Maceda está controlada por fallas de dirección NW-SE (Martín-Serrano et al., 2012) que han tenido una actividad sísmica reciente (Martín-González *et al.*, 2023). Estas direcciones de control son similares a las de otras cuencas gallegas (p.e., As Pontes, Meirama, Laracha, Xanceda, etc.) que tienen edades diferentes y otras características tectónicas y paleoambientales. A diferencia de éstas, las cuencas geográficamente más próximas a la de Maceda (Sarria, El Bierzo, etc.) presentan un control tectónico muy diferente a partir de fallas E-O y NW-SE. De esta forma, Maceda posee unas marcadas características diferenciales que hacen de ella un enlace entre estos diferentes dominios tectónicos. En este estudio, a la vista de nuevos datos estructurales, geofísicos, sismológicos y micropaleontológicos, proponemos un nuevo contexto tectónico para esta cuenca considerando la influencia de la Orogenia Alpina en esta región del Macizo Ibérico.

Abstract

The Maceda depression is the remnant of a Cenozoic basin located in the northwestern Iberian Peninsula, which formed part of a series of scattered and disconnected continental detrital sedimentary basins (Martín-González *et al.*, 2014). The Maceda depression is controlled by NW-SE trending faults (Martín-Serrano *et al.*, 2012) with recent seismic activity (Martín-González *et al.*, 2023). While these controlling directions are similar to those of other basins in Galicia (p. e., As Pontes, Meirama, Laracha, Xanceda, etc.), the paleoenvironmental characteristics, ages and structures of these basins differ significantly. Moreover, geographically neighboring basins (Sarria, El Bierzo, etc.) display a markedly different tectonic control, involving E-W and NW-SE trending faults. Consequently, the Maceda basin exhibits distinctive features, serving as a link between different tectonic domains. Based on new structural, geophysical, seismological and micropalaeontological data, this study proposes the tectonic context for the Maceda basin within the Alpine Orogen of this region in the Iberian Massif.

Referencias

Martín-González, F., Crespo-Martín, C., Cesca, S., González-Muñoz, S., 2023. *Global and Planetary Change* 227. 104177. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104177

Martín-González, F., Freudenthal, M., Heredia, N., Martín-Suárez, E., Rodríguez-Fernández, L.R., 2014. *Geological Journal*.49, 15–27. https://doi.org/10.1002/gj.2484

Martín-Serrano, A., Barrón, E., Bellido, E., Casas-Gallego, M., Martín-González, F., Rodríguez Fernández, L.R., y González Cuadra, P. 2012. *Geotemas* 13: 1718-1721

Control de una falla activa en sistemas de venas de yeso Plio-Cuaternarios (la falla de Galera, S Spain)

Active fault controlling the Plio-Quaternary gypsum veins systems (the Galera Fault, S Spain)

I. Medina-Cascales[1], A. Carrazana[2], E. Gómez-Rivas[2], P. Alfaro[1], F.J. García-Tortosa[3] y I. Martín-Rojas[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03080, Alicante, Spain; ivan.medina@ua.es, pedro.alfaro@ua.es, ivan.martin@ua.es
2 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. C/Martí i Franquès s/n, Barcelona, 08028, Spain; e.gomez-rivas@ub.edu, ariana.carrazana@ub.edu
3 Departamento de Geología, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071, Jaén, Spain; gtortosa@ujaen.es

Palabras clave: tectonic veins, structural geology, active tectonics, vein growth, fractures

Resumen

Durante el Plioceno y el Pleistoceno, se formaron venas de yeso en la zona de daño de la falla sinextral activa de Galera (Cordillera Bética central, S de España). Nuestro análisis estructural evidencia que la distribución y geometría de las venas están controladas por la tectónica. Las venas crecieron en una banda alrededor de la falla, cuyo ancho varía según la complejidad de ésta. Se observa un aumento en el tamaño de las venas cerca de las ramas de falla principales. También existe relación entre la orientación de las venas y la disposición, cinemática e interacciones de las ramas de la zona de falla. La orientación de las venas se corresponde con la de fracturas que acomodan transtensión dentro del campo de deformación de la falla. Sin embargo, la orientación de las venas es sensible a pequeñas variaciones en el campo de deformación debido a la presencia de estructuras tectónicas locales. La rotación de algunas familias de venas indica que el crecimiento de éstas se inició poco después de la sedimentación de los materiales encajantes plio-pleistocenos, simultáneamente a la actividad de la falla. Las primeras familias de venas se formaron perpendiculares a la estratificación a muy poca profundidad, condicionando el crecimiento de futuras venas con diferentes orientaciones.

Abstract

Gypsum veins were formed during the Pliocene and Pleistocene within the damage zone of the active, left-lateral Galera Fault (central Betic Cordillera, S Spain). Structural analysis reveals that vein distribution and geometry are controlled by fault activity. Veins grew in a band around the fault, which width varies according to the complexity of the fault array. Vein size increases near main fault strands. There is a close relationship between vein orientation and the arrangement, kinematics, and interactions of the faults conforming the fault zone. Veins are aligned with fractures accommodating transtensional deformation within the strain field of the fault. However, vein orientation is highly sensitive to small strain field variations due to the presence of local structures resulted from fault displacement. Rotation of some vein sets indicates that vein growth initiated shortly after the deposition of the Plio-Pleistocene host rocks, simultaneously to fault activity. Early vein sets formed perpendicular to bedding under shallow burial conditions, conditioning the growth of future veins with different orientations.

Implicaciones paleogeográficas de la deformación del Devónico Inferior en el Dominio de Obejo-Valsequillo (SW del Macizo Ibérico)

Paleogeographic implications of Early Devonian deformation in the Obejo-Valsequillo Domain (SW Iberian Massif)

D. Moreno-Martín[1], R. Díez Fernández[2] y R. Arenas[1]

1 Departamento de Mineralogía y Petrología, Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, Madrid, Spain. diamor03@ucm.es rarenas@geo.ucm.es
2 Departamento de Geología y Subsuelo, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Salamanca, Spain. r.diez@igme.es

Palabras clave: Variscan Orogeny; Ossa Morena Zone; Central Iberian Zone; Geotectonic zones; Crustal thickening.

Resumen

El Macizo Ibérico se ha subdividido en 5 zonas geotectónicas. El límite entre la Zona Centroibérica (ZCI) y la Zona de Ossa-Morena (ZOM) ha sido objeto de un largo debate. Este límite se ha establecido o bien dando más peso a las asociaciones litoestratigráficas (e.g., Grupo Serie Negra vs. Complejo Esquisto-Grauváquico), o bien otorgando un papel preponderante a las estructuras (e.g., Unidad Central, Despegue de Puente de Genave - Castelo de Vide, etc.). La primera fase de deformación Varisca es diferente en la ZOM (pliegues vergentes al SO, Devónico Inferior) que en la ZCI (pliegues vergentes al NE, Carbonífero Inferior). El Dominio del Obejo-Valsequillo (DOV), situado entre la ZCI y la ZOM, presenta un basamento Precámbrico con estratigrafía y evolución tectonotermal análogos a la ZOM *s.s.* (al SO de la Unidad Central), y series paleozoicas correlacionables con las de la ZCI. En el Macizo de La Serena, dentro del DOV, las unidades sedimentarias del Devónico Inferior aparecen discordantes sobre las unidades previas (i.e., Ordovícico). El análisis y restitución de las estructuras previas a los sedimentos devónicos revelan un acortamiento perpendicular a la cadena varisca post-Ordovícico. Una posible edad Devónico Inferior, sugiere que el comienzo de la deformación Varisca en el DOV es coetáneo con el de la ZOM (Devónico Inferior), y decenas de Ma anterior al comienzo del acortamiento Varisco en la ZCI (Devónico–Carbonífero). Estos datos permiten situar a las secciones del DOV que contienen series sedimentarias devónicas en una posición paleogeográfica más próxima a la ZOM en el escenario pre-colisional varisco.

Abstract

The Iberian Massif has been subdivided into 5 geotectonic zones. The boundary between the Central Iberian Zone (CIZ) and the Ossa-Morena Zone (OMZ) has been the subject of lengthy debate. This boundary has been established either by giving more weight to lithostratigraphic associations (e.g., Serie Negra Group vs. Schist-Greywacke Complex) or by emphasizing structures (e.g., Central Unit, Puente de Genave - Castelo de Vide detachment, etc.). The initial phase of Variscan deformation differs between the OMZ (southwest-verging folds, Lower Devonian) and the CIZ (northeast-verging folds, Lower Carboniferous). The Obejo-Valsequillo Domain (OVD), situated between the CIZ and the ZOM, features a Precambrian basement with lithostratigraphy and tectonothermal evolution analogous to the OMZ proper (southwest of the Central Unit) and Paleozoic sequences correlatable with those of the CIZ. In the La Serena Massif, within the OVD, Lower Devonian sedimentary units appear unconformably overlying the previous units (i.e., Ordovician). Analysis and restoration of structures prior to the Devonian sediments reveal post-Ordovician shortening perpendicular to the Variscan chain. A possible Lower Devonian age suggests that the onset of Variscan deformation in the OVD is contemporaneous with that in the OMZ (Early Devonian) and tens of Ma earlier than the onset of Variscan shortening in the CIZ (Devonian–Carboniferous). These data position sections of the OVD containing Devonian sedimentary sequences in a paleogeographic location closer to the OMZ in the pre-Variscan collisional scenario.

Geometría y modelado numérico de los cabalgamientos Alpinos y de los pliegues de propagación de falla asociados en el macizo de Honrubia-Sepúlveda (Sistema Central)

Geometry and numeric modelling of the Alpine thrusts and associated fault propagation folds in the Honrubia-Sepúlveda massif (Central System)

A. Muñoz-Cemillán[1], A. Muñoz-Martín[1,2], G. de Vicente[1,2], A.J. Olaiz[3]

1 Dpto. GEODESPAL, Fac. de CC Geológicas, Universidad Complutense. C/ José Antonio Novais, 2, 28040 Madrid. alfomu01@ucm.es, amunoz@ucm.es; gvicente@ucm.es.
2 Instituto de Geociencias, IGEO, CSIC-UCM, Madrid – 28040.
3 Repsol Exploración. Dir. de Bajas Emisiones en Carbono. C/ Méndez Álvaro 44, 28045, Madrid antoniojose.olaiz@repsol.com

Resumen: El sector de Honrubia-Sepúlveda (Norte del Sistema Central) se caracteriza por presentar una serie de cabalgamientos imbricados con basamento implicado y vergencia hacia el norte. Estos cabalgamientos desarrollan pliegues de propagación de falla en la cobertera mesozoica con flancos largos de bajo buzamiento hacia el sur (entre 2 y 5º). Dada la ausencia de datos en profundidad, y debido a su estilo "de piel fina con basamento implicado", algunos autores interpretan la presencia de un nivel de despegue relativamente somero en profundidad. Para discutir esta estructura se han analizado y modelizado con el método de *trishear* uno de estos pliegues que presentan mejor desarrollo (Allmendinger, 1998). Los resultados de la modelización sugieren desechar la presencia de geometrías rampa-rellano, y la ausencia de un nivel de despegue común superficial para los cabalgamientos. Los resultados obtenidos también descartan otras geometrías de la rampa, como son las de un aumento del buzamiento de los cabalgamientos en profundidad, o rampas con geometrías lístricas. Los modelos que mejor explican la geometría del pliegue de propagación se generan mediante fallas inversas de buzamiento constante (entre 40 y 50º), valores de p/s entre 1.5 y 1.8 y ángulos de *trishear* estrechos (de unos 60º).

Palabras clave: Sistema Central Español, pliegue de propagación de falla, *trishear*, cabalgamiento.

Abstract: *The Honrubia-Sepúlveda sector (North of the Central System) is characterized by several imbricated thrusts with involved basement and vergence towards the north. These thrusts develop fault propagation folds in the Mesozoic cover with long limbs slightly dipping towards the south (between 2 and 5º). The absence of depth data and it's the "thin-skinned with involved basement" style, some authors interpret the presence of a relatively shallow detachment level at depth. To discuss this structure, one of these folds has been analyzed and modeled with the trishear method (Allmendinger, 1998). The results of the modeling allow us to discard the presence of flat-ramp geometries, and the absence of a common surface detachment level for the thrusts. The results obtained also rule out other ramp geometries, such as those of an increase in the dip of the thrusts at depth, or ramps with listric geometries. The models that better explain the geometry of the propagation fold are generated by reverse faults with constant dip (between 40 and 50º), p/s values between 1.5 and 1.8 and narrow trishear angles (about 60º).*

Key words: *Spanish Central System, fault-propagation fold, trishear, thrust.*

Introducción y marco geológico

La zona de estudio se encuentra situada en el borde noreste del Sistema Central (Fig. 1), que es una cadena de deformación intraplaca generada fundamentalmente durante el Cenozoico. Desde un punto de vista tectónico el SC consiste en una *pop-up* cortical asimétrica de doble vergencia, en la que el basamento, constituido por rocas ígneas y metamórficas generadas durante la orogenia Varisca, aparece implicado en la deformación Cenozoica. Tanto el borde N como el S constituyen grandes cabalgamientos con miles de metros de salto vertical que ponen en contacto el basamento sobre los sedimentos de las cuencas cenozoicas del Duero y de Madrid (de Vicente et al., 2018). Sobre las rocas de basamento se dispone discordante una delgada cobertera (Cretácico superior-Eoceno) que se adelgaza hacia el O, desapareciendo el Cretácico al oeste de Segovia (Alonso, 1981). Tanto la cobertera como el basamento ígneo y metamórfico se deforman durante el acortamiento



FIGURA 1: *Localización de la Zona de Estudio en el borde Norte del Sistema Central (modificado de Vicente et al., 2018).*

Alpino. En la parte española del Sistema Central de Vicente et al. (2007) distinguen dos sectores (Oriental y Occidental) por sus características estructurales y naturaleza del basamento: el primero con numerosos granitoides, y el segundo con un basamento fundamentalmente metamórfico.

En concreto la zona de estudio se localiza en el sector de Honrubia-Sepúlveda, dentro del Sector Oriental del Sistema Central y próxima al cabalgamiento del borde Norte que limita con la Cuenca del Duero (cabalgamiento de Honrubia de la Cuesta). Este Sector se caracteriza porque en la mayor parte de la superficie afloran formaciones de edad Cretácico Superior, depositadas en la última etapa del *rifting* mesozoico. Asociados a estos cabalgamientos se desarrollan una serie de pliegues marcadamente asimétricos con flancos largos de bajo buzamiento hacia el sur (entre 2 y 5º) y pares anticlinales-sinclinales de orientación E-O a ENE-OSO con vergencia hacia el norte. Los pliegues presentan flancos cortos de alto buzamiento, verticales, e incluso invertidos. Los pliegues son de tipo paralelo, cilíndrico, con charnelas curvas y suaves inmersiones (Fig. 2). Trabajos previos en el Sistema Central (de Vicente et al., 2018) han interpretado estos pliegues como pliegues de propagación asociados a cabalgamientos y fallas inversas, asumiendo un nivel de despegue en profundidad relativamente somero y con buzamiento bajo hacia el sur.

Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo consiste en el análisis de estos pliegues de propagación de falla, para definir la estructura en profundidad de las fallas que los generan. De esta forma, se han planteado una serie de objetivos parciales que han incluido: a) Cartografía de detalle de la zona de estudio y realización de cortes geológicos (escala 1 5:000); b) Medida de la estratificación para el cálculo de los ejes, ángulo interflancos y planos axiales de los pliegues c) Modelación y análisis cinemático del pliegue meridional mediante el software *trishear* (Allmendinger, 1998) con el objetivo de discutir sus parámetros geométricos: buzamiento de la rampa, desplazamiento en la falla, y relación p/s.

Los pliegues de propagación se consideran el resultado de la flexión de la cobertera simultáneamente al movimiento del cabalgamiento (Mitra, 1990). Para explicarlos se han utilizado modelos de tipo *kink-band* en los que los cabalgamientos no tienen una distribución de desplazamiento uniforme, ya que éste se amortigua hacia la terminación de la falla (*tip-point*). Erslev (1991) propuso un enfoque alternativo para pliegues de propagación de fallas en 2-D con geometrías curvas, muy comunes en la naturaleza, que incluye el concepto de *trishear* como una zona de cizalla triangular distribuida por delante de la falla (Fig. 3). Posteriormente Hardy y Ford (1997) agregaron al modelo de *trishear* el concepto de relaciones de deslizamiento (relaciones p/s), cuyo valor determina cómo de rápido se propaga el *tip-point* en relación con el deslizamiento de la falla, y permite que el *tip-point* se propague. Las relaciones p/s altas conducen al plegado del techo y a un pliegue más abierto (curvo, en lugar de tipo kink), mientras que las relaciones p/s bajas conducen a un plegamiento mucho más apretado dentro de la zona de *trishear*.

Resultados

Se ha seleccionado para el análisis una zona situada al O de Sepúlveda, que incluye dos pliegues principales uno al norte, con mayor amplitud y longitud de onda, y otro al sur. Estas dos estructuras se han medido a lo largo de los dos valles que los cortan transversalmente (sectores denominados A, B, C y D, Fig. 4). Los dos pliegues analizados presentan una geometría cilíndrica, tal y como sugiere la proyección de los polos de las superficies de estratificación (S_0), lo que permite calcular la orientación del eje del pliegue (Fig. 4). El pliegue situado más al norte (Sectores A y B, Fig. 4) presenta una amplitud mucho menor, con un eje prácticamente horizontal. Los planos axiales calculados en los dos sectores de este pliegue buzan más que el pliegue situado más al sur (entre 53 y 63º, Fig. 4). El ángulo interflancos también es mayor que en el pliegue sur, aumentando desde el este hacia el oeste (de 103º a 125º). El pliegue situado más al sur (Sectores C y D, Fig. 4) presenta un mayor salto vertical, una suave inmersión hacia el O-SO (2-3º hacia los 245-255º) rotando su eje en sentido antihorario unos 10º hacia el E. En ambos casos el plano axial buza hacia el SE (46-48º), con una suave rotación

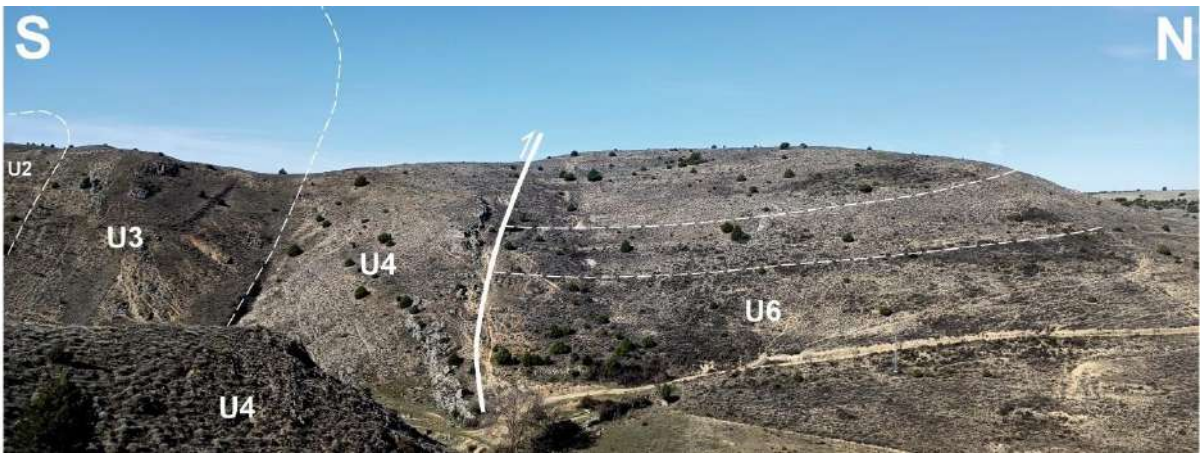


FIGURA 2: *Esquema tectónico realizado en el cabalgamiento sur de la zona de Estudio (U2 - Dolomías tableadas de Caballar; U3 - Intercalación de dolomías y margas; U4 – Dolomías masivas de Castrojimeno; U6 - Dolomías y margas de Valle de Tabladillo.*

antihoraria de su dirección (sentido de buzamiento de 168º hacia los 157º) hacia el E. Respecto al ángulo interflancos, éste se mantiene próximo a los 80º (76º-79º), siendo claramente menor que en el pliegue más septentrional.

Para realizar el modelado se ha elegido el pliegue de propagación situado más al sur, por ser el que presenta unos mejores afloramientos y donde se han podido medir más estratificaciones. Para este pliegue se ha realizado un corte de detalle (a escala 1:5.000) que ha permitido controlar su geometría (Fig. 4 y 5). Finalmente, se ha digitalizado e importado al *software* de modelado (*Faultfold*, Allmendinger, 2020) para comparar los resultados de la modelización con la geometría observada. Los parámetros analizados en el modelado han sido: a) La geometría del cabalgamiento en profundidad, (incluyendo el buzamiento de la rampa); b) el deslizamiento en la falla, c) el ángulo de *trishear* y d) la relación p/s. Otros aspectos que permite dilucidar el modelado es si se trata de fallas de basamento aisladas, si presentan geometrías de rampa-rellano, o si tienen un nivel de despegue en profundidad. Combinando estas cuatro variables se han realizado decenas de modelos, incluyendo geometrías de rampa-rellano, de variaciones de buzamiento progresivo en las rampas, de valores de p/s entre 1.0 y 2.0, y de buzamiento constante (entre 20 y 70º). La figura 5 muestra un resumen de los resultados obtenidos con la modelización.

Conclusiones

Los resultados de la modelización sugieren descartar las geometrías rampa-rellano superficiales, así como la presencia de un nivel de despegue común poco profundo

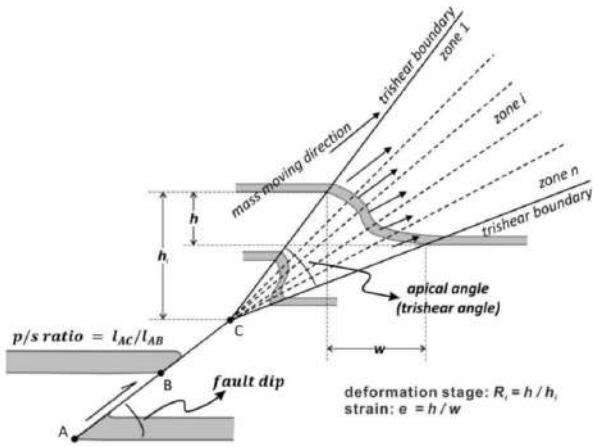


FIGURA 3: *Modelo conceptual del algoritmo de trishear, basado en Hardy y Ford (1997) en Zehnder y Allmendinger (2000).*

para los cabalgamientos en la zona de estudio. Por tanto, si existe un nivel de despegue, debe ser más profundo que el modelizado (más de 2 km desde la superficie). Aunque no es posible descartar la presencia de un nivel de acomodamiento en profundidad de los cabalgamientos, éste se debe situar a una profundidad suficiente como para que no se desarrollen sinclinales en el bloque de techo. Los resultados de los modelos sugieren descartar otras geometrías de la rampa, como son un aumento del buzamiento de las fallas en profundidad, o rampas con geometrías lístricas muy marcadas.

Los modelos que mejor explican la geometría del pliegue de propagación se generan mediante cabalgamientos de buzamiento constante (entre 40 y 50º), valores de p/s entre 1.5 y 1.8 y ángulos de *trishear*

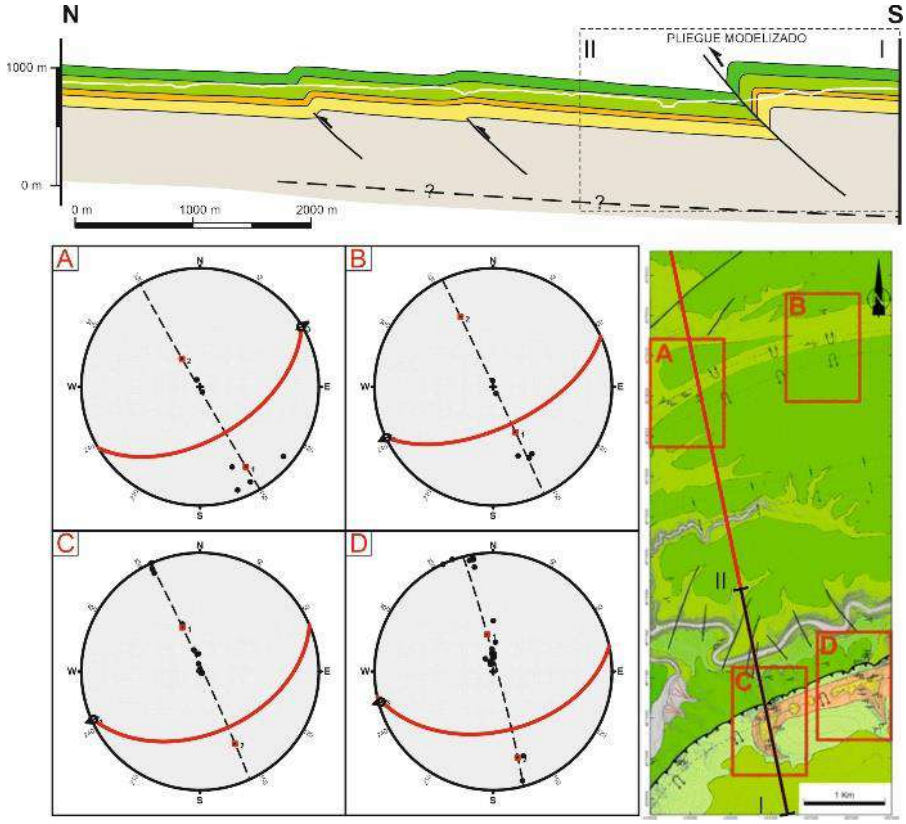


FIGURA 4: *Cartografía de la zona de estudio con los datos estructurales de los cuatro sectores de los dos pliegues analizados. En la parte superior se muestra un corte N-S (marcado en rojo en el mapa) y el sector I-II marca el pliegue de propagación modelado.*

bastante estrechos (de unos 60º). Los desplazamientos estimados para los modelos que mejor ajustan implican valores de entre 360 y 420 m.

Los datos obtenidos a partir de la modelación son congruentes con la geometría que se observa en afloramiento y en la cartografía. Para contrastar estos resultados, sería necesario constreñirlos en profundidad, mediante datos directos (sondeos) o geofísicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se corresponde con la parte específica del Trabajo Fin de Grado en la Universidad Complutense de Madrid del primer autor.

REFERENCIAS

Allmendinger, R.W. (1998). Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, vol. 17, no 4, p. 640-656.

Alonso, A. (1981). *El Cretácico de la provincia de Segovia (borde norte del Sistema Central)* (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid.

de Vicente, G., Vegas, R., Martín, A. M., Silva, P. G., Andriessen, P., Cloetingh, S. A. P. L., ... & Olaiz, A. (2007). Cenozoic thick-skinned deformation and topography evolution of the Spanish Central System. *Global and Planetary Change*, 58(1-4), 335-381.

de Vicente, G., Cunha, P. P., Muñoz-Martín, A., Cloetingh, S. A. P. L., Olaiz, A., & Vegas, R. (2018). The Spanish-Portuguese Central System: An example of intense intraplate deformation and strain partitioning. *Tectonics*, 37 (12), 4444-4469.

Erslev, E. A. (1991). Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19(6), 617-620.

Hardy, S. & Ford, M. (1997). Numerical modeling of trishear fault propagation folding. *Tectonics*, 16 (5), 841-854.

Mitra, S. (1990). Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *AAPG bulletin*, 74 (6), 921-945.

Suppe, J., & Medwedeff, D. A. (1990). Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 83 (3), 409-454.

Zehnder, A. T. & Allmendinger, R. W. (2000). Velocity field for the trishear model. *Journal of Structural Geology*, 22 (8), 1009-101.

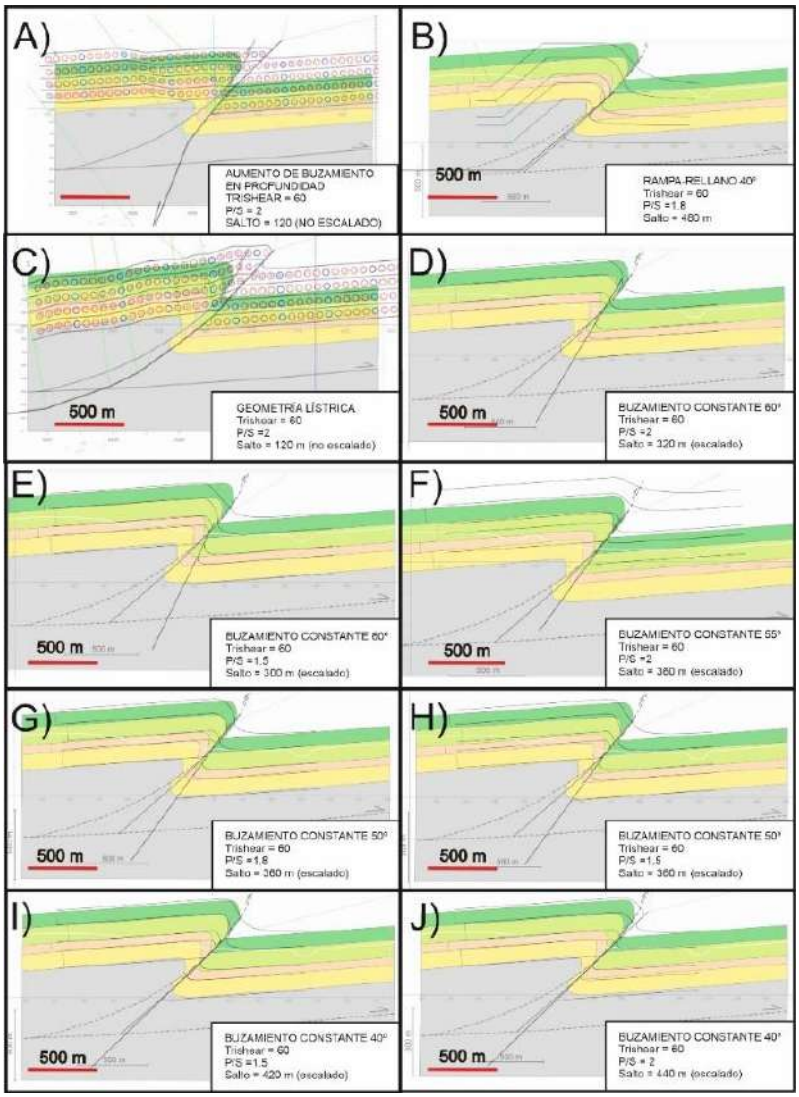


FIGURA 5: *Algunos de los resultados de la modelación del pliegue de propagación con el software FaultFold (Allmendinger, 2020, https://rickallmendinger.net). El mejor ajuste a la geometría del pliegue se corresponde con rampas de buzamiento constante (entre 40 y 50º), valores de p/s entre 1.5 y 1.8, y ángulos de trishear de 60º.*

Reconocimiento de distintas unidades estratigráficas en el Triásico de Cambil (Jaén): implicaciones tectónicas

Recognition of different stratigraphic units in the Triassic of Cambil (Jaén): tectonic implications

A. Pérez-López[1,2], P. Perrone[3], M. Sánchez-Gómez[4] y F. Pérez-Valera[5]

1 Dpto. Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18002 Granada. aperezl@ugr.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-Universidad de Granada), 18100 Armilla, Granada.
3 Minas de Alquife, Barriada de Minas del Marquesado, s/n, 18518 Alquife, Granada. pabloluciano.perrone@yahoo.co.uk
4 Dpto. Geología, CEACTEMA, Universidad de Jaén, 23071 Jaén. msgomez@ujaen.es
5 Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03690 S.Vicente del Raspeig, Alicante. fperez@ua.es

Palabras clave: Cordillera Bética, facies Muschelkalk, facies Keuper, mélange tectónica.

Resumen

Los materiales arcillo-evaporíticos del Triásico han desempeñado un papel importante en el despegue de las unidades tectónicas en la estructuración de la Cordillera Bética. En el sector de Cambil (Jaén) afloran materiales del Triásico, que fueron interpretados por Fontboté y García-Dueñas (1968) como un manto de corrimiento (Manto de Cambil). El gran desarrollo de brechas con matriz arcillo-yesífera en estos materiales se ha relacionado con una unidad olistostrómica del Oligoceno-Aquitaniense (Roldán García *et al*., 1991). No obstante, este redepósito de materiales triásicos en la Zona Subbética, durante la estructuración miocena de la cordillera, resulta controvertido. La cartografía realizada en el presente estudio pone de manifiesto la complejidad tectónica de la zona, pues, grandes bloques de distinta naturaleza y edad afloran en todo el sector, con desarrollo de estructuras tectónicas de ámbito frágil-dúctil localizadas en los materiales arcillo-yesíferos triásicos de aspecto brechoide, sugiriendo un origen tectónico de estas unidades controvertidas. La identificación de unidades litoestratigráficas de distinta procedencia paleogeográfica, basada en la estratigrafía del Triásico (Pérez-López y Pérez-Valera, 2007), ha permitido interpretar estructuras con grandes desplazamientos que llegan a incorporar el nivel de despegue triásico de las unidades tectónicas.

Abstract

The Triassic clayey-evaporitic materials had an important role in the detachment of the tectonic units in the formation of the Betic Cordillera. In the Cambil sector (Jaén), there are Triassic outcrops, which were interpreted by Fontboté and García-Dueñas (1968) as a nappe (Cambil nappe). The great development of breccias with clayey-gypsiferous matrix within these materials has been related to an olistostromic unit of Oligocene-Aquitanian (Roldán García *et al*., 1991). However, this redeposition of Triassic materials in the Subbetic Zone during the Miocene is controversial. The geological mapping carried out in this study shows the tectonic complexity of the area; large blocks of different nature and age outcropping throughout the sector, with the development of tectonic structures of brittle-ductile range located in the brecciated clayey-gypsiferous materials, suggesting the tectonic nature of these controversial units. The identification of lithostratigraphic units with different paleogeographic origin, based on the Triassic stratigraphy (Pérez-López and Pérez-Valera, 2007), has allowed the interpretation of structures with large displacements that incorporate the Triassic detachment level of the Betic tectonic units.

Referencias

Fontboté, J.M. y García Dueñas, V. (1968). *Comptes Rendus Académie Sciences* 266, 186-189.

Pérez-López, A. y Pérez-Valera, F. (2007). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 254, 606-626.

Roldán García, F.J., Lupiani Moreno, E., Villalobos Megía, M. y Jerez Mir, L. (1991). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 947 (Jaén) y memoria*. ITGE. 66 p.

Evolución de la exhumación Cenozoica en los Pirineos Orientales: de la compresión a la extensión a partir de termocronología de (U-Th)/He

Cenozoic exhumation evolution in the Eastern Pyrenees: from compression to extension, insights from (U-Th)/He thermochronology

S. Peris Cabré [1], A. Griera [1], D. Gómez-Gras [1] y A. Teixell [1]

1 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain
sabi.peris@uab.cat; albert.griera@uab.cat; antonio.teixell@uab.cat; david.gomez@uab.cat

Palabras clave: Pirineos Orientales, compresión-extensión, termocronología, helio

Resumen

Los Pirineos Orientales constituyen un excelente laboratorio natural para estudiar la evolución desde la compresión relacionada con la orogenia Alpina hasta el colapso extensional debido a la apertura del Mediterráneo occidental. Para definir esta transición mediante los principales eventos de exhumación, combinamos la termocronología de baja temperatura (U-Th)/He, la modelización térmica (software QTQt, Gallagher, 2012) y la evolución de procedencia en el registro sedimentario en las cuencas adyacentes (Empordà y Roselló). Se han recogido muestras de diferentes bloques tectónicos a lo largo de tres perfiles verticales y muestras individuales dispersas que han proporcionado edades centrales de enfriamiento e historias térmicas. Para definir los diferentes bloques tectónicos, utilizamos la variación de edad central entre apatito y circón (U-Th/He), que da una velocidad aproximada de exhumación. La cronología de la extensión neógena puede deducirse a partir del registro sedimentario y de las edades de U-Th/He. Nuestros resultados definen tres periodos de exhumación principales, y apoyan un evento regional muy rápido de exhumación alrededor de 30-35 Ma, que seguimos vinculando con las últimas estructuras compresivas alpinas. Por otro lado, la extensión se focaliza alrededor de los 25-20 Ma y los 15-10 Ma, con la reactivación de fallas normales y la apertura de nuevas cuencas sedimentarias. Así pues, la combinación de todas estas herramientas nos proporciona nuevos datos sobre un nuevo modelo estructural, además de una cronología más precisa del tránsito entre la compresión y extensión en esta región del Mediterráneo occidental.

Abstract

The Eastern Pyrenees are an excellent natural laboratory to study the transition in a mountain belt from compression (during the Alpine orogeny) to extensional collapse (due to the opening of the western Mediterranean). To define the timing of this transition we characterise the main exhumation events, combining low-temperature thermochronology, thermal history modelling (QTQt software, Gallagher, 2012), and the Cenozoic sedimentary provenance record in adjacent basins (Empordà and Roselló). We collected samples from different tectonic blocks along three vertical profiles and scattered individual samples, which have provided central cooling ages and information on thermal history. To define the different tectonic blocks, we used the intrasample central age variation between apatite and zircon U-Th/He, which gives an approximation of the exhumation velocity. The chronology of the Neogene extension was inferred from the sedimentary record and the (U-Th)/He thermochronology. Our results define three main exhumation periods and support a regional and rapid exhumation event around 30-35 Ma, which we still link with the last Alpine contractional deformation. On the other hand, the extension is focused around 25-20 Ma and 10-15 Ma, with the reactivation of normal faults and the opening of new sedimentary basins. Thus, the combination of all these tools provides new insights for a new structural model, and a more accurate timing of compression and extension in this region of the western Mediterranean realm.

Referencias

Gallagher, K. (2012). *Journal of Geophysical Research,* doi: 10.1029/2011JB008825

Caracterización de la deformación en el Sinclinorio de Bizkaia (Cuenca Vasco-Cantábrica)

Deformation characterization in the Biscay Sinclinorium (Basque Cantabrian-Basin)

L. Rodríguez-Méndez, N. Vegas y A. Aranguren

Departamento de Geología, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Univertsitatea UPV/EHU, Bº Sarriena SN, 48940 Leioa, España. lidia.rodriguez@ehu.eus, nestor.vegas@ehu.eus, aitor.aranguren@ehu.eus

Palabras clave: Geología Estructural, Fábrica Magnética, Sinclinorio de Bizkaia, Cuenca Vasco-Cantábrica.

Resumen

El Sinclinorio de Bizkaia es una de las estructuras de entidad regional que definen el Arco Vasco, la zona con mayor complejidad estructural de la Cuenca Vasco-Cantábrica (Calvo-Rathert *et al.*, 2007). Este sector se caracteriza por presentar una abundante cobertera vegetal y afloramientos escasos e inconexos. En este trabajo se ha combinado trabajo clásico de campo con la aplicación del análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) para mejorar la caracterización de la deformación en este sector. Para ello, se han tomado medidas de S_0, S_1 y de ejes de pliegues y se ha realizado un estudio de la fábrica magnética en 21 estaciones localizadas en el flanco NE y en el núcleo del Sinclinorio de Bizkaia. Los materiales analizados corresponden a secuencias de tipo flyschoide, en las que alternan lutitas, margas, margocalizas y areniscas, con edades que van desde el Albiense Superior-Cenomaniense Inferior, en el flanco del Sinclinorio, hasta el Maastrichtiense Medio, en el nucleo. El análisis de la mineralogía magnética se ha realizado a través de difracción de rayos X y de curvas de variación de la susceptibilidad magnética con respecto a la temperatura. Se ha identificado que los principales portadores de la fábrica magnética son minerales del grupo de la clorita.

El estudio de la ASM combinado con los datos de campo ha puesto en evidencia que los dos sectores estudiados registran fábricas magnéticas diferentes: una fábrica mixta (sedimentaria con una impronta tectónica) en la zona de núcleo del Sinclinorio de Bizkaia y una fábrica principalmente tectónica en su flanco NE.

Abstract

The Biscay Synclinorium is one of the regional structures that define the Basque Arc, the area with the most complex structural features in the Basque-Cantabrian Basin (Calvo-Rathert *et al.*, 2007). This sector shows an abundant vegetal cover and scarce and disconnected outcrops. In this work, classical fieldwork has been combined with the application of the analysis of the Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) to enhance the characterization of deformation in this sector. For this purpose, measurements of S_0, S_1 and fold axes have been taken, and a study of magnetic fabric has been carried out at 21 stations located on the NE limb and in the core of the Biscay Synclinorium. Fysch-type sequences of siltstones, marlstones, marly limestones and sandstones are studied; they exhibit ages ranging from Upper Albian-Lower Cenomanian, on the limb, to Middle Maastrichtian, in the core of the Synclinorium. The analysis of magnetic mineralogy has been performed through X-ray diffraction and temperature-dependent magnetic susceptibility curves. The main carriers of the magnetic fabric are minerals from the chlorite group.

The combined study of AMS with field data has revealed that the two studied sectors exhibit different magnetic fabrics: a mixed fabric (sedimentary with a tectonic imprint) in the core area and a predominantly tectonic fabric in the NE limb.

Referencias

Calvo-Rathert, M., Cuevas, J., Tubía, J.M., Bógalo, M.F. y Gogichaishvili, A. (2007). Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch) 96: 1163. doi:10.1007/s00531-006-0149-8.

Crustal fluid flow evolution from Mesozoic rifting to Alpine compression in the Greater Caucasus and Adjara-Trialeti fold-and-thrust belts, SW Georgia

Evolución del flujo de fluidos desde la extensión Mesozoica hasta la compresión alpina en los cinturones de pliegues y cabalgamientos del Gran Cáucaso y Adjara-Trialeti, SW de Georgia

J.B. Ruh[1], D. Cruset[2], O. Enukidze[3], V. Alania[3], A. Mohammadi[4] y A. Giorgadze[3]

1 Instituto de Ciéncias del Mar, CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona. jruh@icm.csic.es
2 Group of Dynamics of the Lithosphere, Geociències Barcelona, CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. dcruset@geo3bcn.csic.es
3 Institute of Geophysics, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University. onise.enukidze@tsu.ge, victor.alania@tsu.ge, anzor.giorgadze2014@ens.tsu.edu.ge
4 Eurasia Institute of Earth Science, Istanbul Technical University. mohammadi.a79@gmail.com

Palabras clave: U-Pb calcite dating, clumped isotopes, orogenesis, Arabia-Eurasia collision

Resumen

La historia tectónica de la región del Cáucaso desde el Mesozoico hasta la actualidad incluye la apertura de una serie de cuencas extensivas de retroarco e intracontinentales a lo largo del margen sur de la Placa Euroasiática como respuesta a la subducción hacia el norte del Neo-Tetis debajo de Eurasia. Posteriormente, la colisión Arabia-Eurasia se tradujo en la inversión tectónica de estas cuencas de rift.

La cuenca del Gran Cáucaso se desarrolló desde el Triásico como una cuenca extensiva marina profunda, flanqueada por la Plataforma Escita al norte y el macizo de Dzirula al sur. A partir del Cretácico, se formó una segunda cuenca marina profunda al sur del macizo de Dzirula, la cuenca Adjara-Trialeti. La inversión tectónica durante Cenozoico tardío de estas cuencas dio como resultado el levantamiento de los cinturones de pliegues y cabalgamientos del Gran Cáucaso y de Adjara-Trialeti, que actualmente se sitúan en el norte y el sur de Georgia, respectivamente.

En este trabajo, presentamos datos preliminares del sistema de fluidos de estos dos cinturones compresivos para mejorar nuestra comprensión sobre las condiciones en que se formaron y determinar la edad absoluta de la actividad tectónica. Presentamos datos estructurales de fracturas, de termometría de *Clumped Isotopes* y de geocronología U-Pb de cementos de calcita precipitados en fracturas. Los resultados de este estudio de interdisciplinar indican el origen de los fluidos, cambios en la interacción fluido-roca y la edad de la deformación tectónica.

Abstract

The complex Mesozoic-to-present tectonic history of the Caucasus region includes the opening of several intracontinental back-arc extensional basins along the southern edge of the Eurasian continental plate as a response to the northward subduction of the Neo-Tethys beneath Eurasia, followed by the Arabia-Eurasia collision and the tectonic inversion of these intracontinental extensional basins. The Greater Caucasus Basin developed as a deep-marine extensional basin since the Triassic, flanked by the Scythian Platform to the north and the Dzirula Massif to the south. Since the Cretaceous, a second deep-marine basin formed south of the Dzirula Massif, the Adjara-Trialeti Basin. Late Cenozoic tectonic inversion of these basins resulted in the uplift of the Greater Caucasus and Adjara-Trialeti fold-and-thrust belts, situated in today northern and southern Georgia, respectively.

In this work, we undertake an extensive investigation of the fluid system in both the Greater Caucasus and Adjara-Trialeti fold-and-thrust belts to improve our understanding of the conditions and the timing of tectonic activity. We present structural field data, clumped isotope thermometry results, and U-Pb calcite ages from carbonate veins of both fold-and-thrust belts. Preliminary results of this multi-proxy study reveal the source and temperature of fluids, variations in the fluid-rock interaction, and the timing of tectonic deformation.

Paleomagnetismo y rotaciones de eje vertical en la Zona Oblicua del Segre (Unidad Surpirenaica Central)

Palaeomagnetism and vertical axis rotations in the Segre oblique zone (South Pyrenean Central Unit)

F. Saiz[1], P. Juvany[1,2], M. Garcés[1,2], E. Beamud[2,3], M. López-Blanco[1,2]

[1] Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028-Barcelona, francinasaiz44@gmail.com, pjuvany@ub.edu, mgarces@ub.edu, m.lopezblanco@ub.edu
[2] Institut de Recerca Geomodels, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad de Barcelona, C/Martí i Franqués s /n – 08028 Barcelona
[3] Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB-Geo3BCN CSIC, C/ Solé i Sabarís s/n – 08028 Barcelona, betbeamud@ub.edu

Resumen

La curvatura de las direcciones estructurales en el extremo oriental de la Unidad Surpirenaica Central sugiere la existencia de rotaciones de eje vertical. Los datos paleomagnéticos en la zona de rampas oblicuas del Segre son escasos, y este trabajo pretende contribuir a la cuestión, cuantificando la rotación que afecta a las distintas unidades de pliegues y cabalgamientos de esta zona. El muestreo se ha centrado especialmente en facies de lutitas rojas continentales Garumnienses del Paleoceno y, en menor medida, en las facies marinas del Cretácico Superior y del Eoceno Inferior (margas y calizas). Las componentes características de la magnetización han sido obtenidas mediante el análisis de la desmagnetización progresiva de la magnetización remanente natural, y las direcciones paleomagnéticas medias de cada estación se ha obtenido a partir del estudio de un mínimo de 10 muestras por estación. El *test* del pliegue aplicado en un conjunto de estaciones ha dado resultado positivo, indicando una edad de la magnetización anterior a la inclinación de las capas. No obstante, también se han encontrado evidencias de magnetizaciones secundarias adquiridas en diferentes estadios del plegamiento. Posteriormente se han calculado las direcciones medias de estaciones agrupadas por unidades estructurales. Los resultados de este estudio indican una rotación antihoraria significativa en las láminas estudiadas.

Palabras clave: Pirineos, Paleoceno, Paleomagnetismo, rotaciones tectónicas,

Abstract

The curved structural trends at the eastern end of the Central South Pyrenean Unit suggests the occurrence of vertical axis rotations. Palaeomagnetic data from Palaeocene units in the Segre oblique zone are scarce, and this work aims to contribute to this question by quantifying the rotation of the fold and thrust units in the region. Sampling has focused especially on continental Palaeocene Garumnian facies (red mudstones) and to a lesser extent, Upper Cretaceous and Lower Eocene marine facies (marls and limestones). The characteristic magnetization components have been obtained from the analysis of progressive demagnetization diagrams of the natural remanent magnetization of the samples, and the site mean directions were calculated from the analysis of a minimum of 10 samples per site. The fold test applied to a set of sites has given positive results, indicating an age of the magnetization prior to the tilting of bedding. However, sites with evidence of synfolding secondary magnetization have also been found. The results of this study indicate a significant counterclockwise rotation in the studied thrusts sheets.

Key words: *Pyrenees, Palaeocene, Paleomagnetism, tectonic rotations.*

INTRODUCCIÓN

Las geometrías observadas en el extremo oriental de la Unidad Surpirenaica Central han recibido diferentes interpretaciones desde la década de los 70. En un inicio, la alineación del Segre se describió relacionada con una falla de zócalo y no fue hasta la realización de los sondeos de Comiols e Isona cuando se interpretaron las estructuras de esta alineación como rampas laterales, y más tarde, como rampas oblicuas.

La zona en cuestión muestra una orientación NE-SO de los pliegues y cabalgamientos, oblicua a la dirección de transporte tectónico, y posiblemente relacionada con un gradiente de acortamiento E-W (Dinarès et al., 1992). La dirección de transporte en regiones donde se dan rotaciones de eje vertical no se puede describir

completamente en una sección 2D (Sussman et al., 2004). Para ayudar a reducir estas incertidumbres, los datos de paleomagnetismo permiten cuantificar las rotaciones de eje vertical, y así contribuir a reconocer la geometría inicial de las estructuras y restaurar las unidades alóctonas a su posición original.

En la zona de estudio, los trabajos previos de paleomagnetismo se centraron en materiales jurásicos y cretácicos de las unidades alóctonas (Dinarès, 1992), o en sedimentos siliciclásticos eocenos y oligocenos en la cuenca de antepaís del Ebro (Burbank et al., 1992; Sussman et al., 2004). Este trabajo pretende estudiar las formaciones de Paleoceno y Eoceno inferior, haciendo énfasis en las facies Garumnienses. Se pretende caracterizar la magnetización registrada en estas facies y su utilidad para la determinación de rotaciones asociadas al emplazamiento de láminas de cabalgamiento, y así contribuir a la reconstrucción paleogeográfica de la cuenca de antepaís.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La cordillera de los Pirineos es una cuña orogénica asimétrica de doble vergencia formada por la inversión de las cuencas de rift mesozoico, fruto de la colisión de la placa Ibérica con la Euroasiática (e.g. Muñoz et al., 2018) desde el Cretácico Superior al Mioceno. La geometría de las cuencas preexistentes y la distribución de niveles de evaporitas triásicas son dos de los factores principales que definen su estilo estructural.

En la Zona Surpirenaica destaca un saliente conocido como la Unidad Surpirenaica Central (USC), caracterizado por tener una geometría trapezoidal invertida en profundidad. Se subdivide, de N-S, en los mantos de Bóixols, Montsec y Serres Marginals e involucra materiales mesozoicos y paleógenos. El extremo oriental de la USC viene delimitado por la Zona Oblicua del Segre, objeto de este trabajo. Los mantos equivalentes en el lado este del río Segre corresponden respectivamente a las láminas superior, media e inferior del Pedraforca, Cadí y Port del Comte (e.g. Muñoz et al., 2018).

METODOLOGÍA

Los afloramientos objetivo del muestreo se seleccionaron atendiendo a criterios de simplicidad estructural y litológicos, centrándose en formaciones paleocenas de lutitas rojas, margas y carbonatos micríticos, tanto de facies marinas como continentales. El muestreo consistió en la perforación de las muestras con una broca diamantada fijada en un taladro eléctrico, y la dirección de perforación se obtuvo con una brújula magnética fijada a un inclinómetro. Se muestrearon un total de 18 estaciones, y por cada estación se muestrearon una media de 10 muestras en diferentes niveles espaciados en un intervalo de entre 5 y 10 metros.

La medida de la magnetización se llevó a cabo en el laboratorio de paleomagnetismo CCiTUB-CSIC, utilizando un magnetómetro superconductor 2G SRM755R, con una sensibilidad de 10^{-9} A/m. Para la desmagnetización térmica se usó un horno desmagnetizador TD48EU de dos cámaras. Cada espécimen se sometió a ciclos de medida y desmagnetización térmica progresiva con incrementos de 20-30ºC en cada paso, hasta alcanzar la desmagnetización completa. Cada ciclo de desmagnetización fue seguido de la medida de la susceptibilidad magnética en el susceptibilímetro magnético Kappabridge KLY-2, para monitorizar cambios de la mineralogía magnética. Aparte, un grupo reducido de muestras se trataron con un desmagnetizador de campos alternos D-Tech 2000, con una intensidad máxima alcanzada de 120mT e intervalos de desmagnetización progresiva de entre 5 y 20 mT.

El vector de la magnetización a cada paso se proyectó en diagramas de Zijderveld utilizando el software Paldir (Universidad de Utrecht). La inspección visual de los diagramas permitió la identificación de las distintas componentes, y el cálculo de las direcciones de la componente característica se realizó utilizando Análisis de Componentes Principales. Para el análisis de las direcciones se utilizaron aplicaciones basadas en el módulo de Python Pmagpy. Las direcciones paleomagnéticas características de cada estación se visualizaron sobre una proyección estereográfica, se filtró el conjunto de la presencia de direcciones anormales y se calculó la dirección media de cada estación antes y después de la corrección tectónica. La prueba del pliegue se efectuó para determinar la edad relativa de la magnetización.

Las direcciones medias de las estaciones se agruparon según el marco estructural y coordenadas geográficas. La media de cada grupo de estaciones representa una dirección media para esa unidad estructural. Las direcciones medias de 15 estaciones se proyectaron sobre un mapa estructural (Fig.1) y se compararon las rotaciones estimadas con las orientaciones estructurales. Seguidamente se analizó la evolución conjunta del emplazamiento de las láminas y las rotaciones.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- El comportamiento magnético de las muestras analizadas resultó muy variable, mostrando rangos de estabilidad diversos para cada estación, tanto en los sedimentos marinos como en los continentales. Los mejores resultados se obtuvieron en las facies de lutitas rojas Garumnienses (continentales).
- El *test* del pliegue aplicado es positivo, conllevando así, que la magnetización en la mayor parte se adquirió antes del plegamiento.
- Diversas estaciones muestran evidencias de magnetización sincrónica al plegamiento, aunque la gran dispersión y la escasez de datos impiden concretar más sobre la extensión y la naturaleza de los procesos de remagnetización en esta zona.Del cálculo de las direcciones medias se evidencian rotaciones antihorarias medias de 15º en la terminación oriental del manto de Montsec, 35º en la lámina de Port de

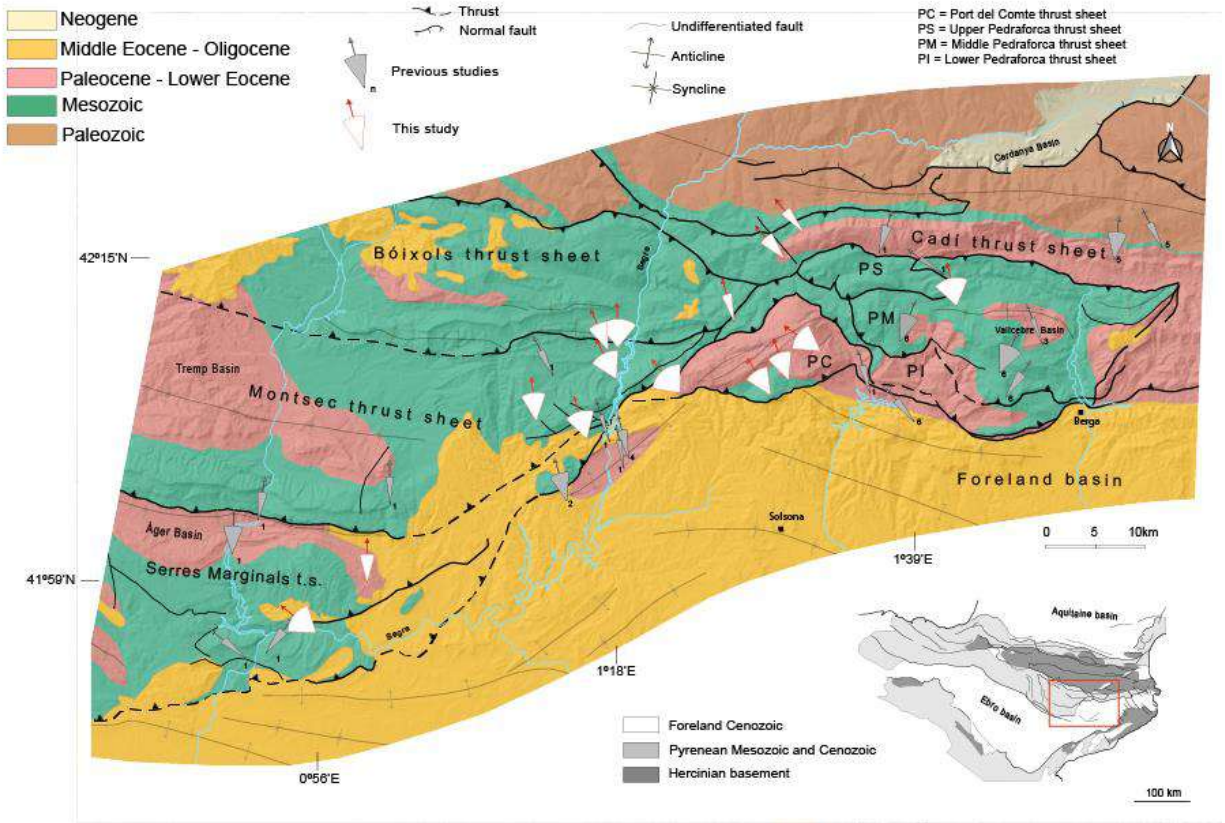


FIGURA 1. Mapa de paleodeclinaciones obtenidas. Modificado de Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC, 2017). En gris, rotaciones calculadas de autores previos, siendo 1: Dinarès (1992); 2: Burbank, Vergés et al. (1992); 3: Oms et al. (2007); 4: Sussman et al. 2004; 5: Pueyo et al. (2016); and 6: Keller et al. (1994).

Comte y 40º en el extremo occidental del Cadí, resultando ser coherentes con una curvatura secundaria de las estructuras a pesar de los valores obtenidos de error en algunos datos.(errores¿?¿? en la tabla algunos son altos). Esto indica que la dirección de las estructuras de la zona del Segre, durante su emplazamiento inicial, tuvo una dirección más próxima a la orientación Este-Oeste del orógeno, y que el gradiente de acortamiento entre la zona Central y Oriental propició el giro de las estructuras en sentido antihorario.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Network (H2020-MSCA-ITN-2019) *Signal Propagation In Source To Sink For The Future Of Earth Resources And Energies (S2s-Future)*, la Agencia Española de Investigación, PID2019-106440GB-C21/AEI/10.13039/501100011033, y la Generalitat de Catalunya GGAC 2021 SGR00076 (AGAUR).

REFERENCIAS

Burbank, D. W., Vergés, J., Muñoz, J. A. y Bentham, P. (1992). Coeval hindward-and forward-imbricating thrusting in the south-central Pyrenees, Spain: Timing and rates of shortening and deposition. *Geological Society of America Bulletin*, 104(1): 3-17.

Dinarès, J., McClelland, E. y Santanach, P. (1992). Contrasting rotations within thrust sheets and kinematics of thrust tectonics as derived from palaeomagnetic data: an example from the Southern Pyrenees. *Thrust tectonics*, 265-275.

Dinarès, T. J. (1992). Paleomagnetisme a les unitats sudpirinenques superiors. Implicacions estructurals. Tesis Doctoral, University of Barcelona, 461p.

ICGC (2017). *Mapa de les unitats estructurals majors de Catalunya 1:1.000.000*

Keller, P., Lowrie, W., y Gehring, A. (1994). Palaeomagnetic evidence for post-thrusting tectonic rotation in the Southeast Pyrenees, Spain. *Tectonophysics*, 239(1), 29–42. https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90105-8

Muñoz, J. A., Mencos, J., Roca, E., Carrera, N., Gratacós, O., Ferrer, O. y Fernández, O. (2018). The structure of the South-Central-Pyrenean fold and thrust belt as constrained by subsurface data. *Geol. Acta*, 16: 439–460.

Oms, O., Dinarès, J., Vicens, E., Estrada, R., Vila, B., Galobart, À., y Bravo, A. M. (2007). Integrated stratigraphy from the Vallcebre Basin (southeastern Pyrenees, Spain): New insights on the continental Cretaceous−Tertiary transition in southwest Europe. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 255(1), 35–47. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.039

Pueyo, E.L., Beamud, E., Muñoz, J. A., Rodríguez-Pintó, A., y San Miguel, G. (2016). Remagnetización

alpina en la Serra del Cadí (Pirineo Oriental). IX Congreso Geológico de España.

Sussman, A. J., Butler, R. F., Dinarès-Turell, J. y Vergés, J. (2004). Vertical-axis rotation of a foreland fold and implications for orogenic curvature: an example from the Southern Pyrenees, Spain. *Earth and Planetary Science Letters*, 218(3-4): 435-449.

Taberner, C., Dinarès, J., Giménez, J., & Docherty, C. (1999). Basin infill architecture and evolution from magnetostratigraphic cross-basin correlations in the southeastern Pyrenean foreland basin. *Geological Society of America Bulletin*, 111(8): 1155–1174. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)1112.3.CO;2

Caracterización estructural de las láminas de Frankenfels-Lunz en los Alpes Calcáreos del Norte

Structural characterisation of the Frankenfels-Lunz nappes in the Northern Calcareous Alps

F. Saiz[1], M. Snidero[1], J.A. Muñoz[1], P. Granado[1], P. Santolaria[1]

[1]Departament de Dinàmica de la Terra i de L'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Institut de Recerca Geomodels, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, Spain. francinasaiz44@gmail.com , marcosnidero@gmail.com , jamunoz@ub.edu , pablomartinez_granado@ub.edu , pablo.santolaria.otin@gmail.com

Palabras clave: Alpes Calcáreos; Austria; Pliegues y Cabalgamientos; Evaporitas

Resumen

En este trabajo se presentan una serie de cortes geológicos a través del frente de cabalgamiento y las unidades estructurales más externas de los Alpes Calcáreos del Norte de Austria. Las unidades más internas estudiadas se caracterizan por una secuencia de láminas cabalgantes que involucran una potente serie carbonatada de más de 4 km de potencia despegada en evaporitas del Pérmico-Triásico. Por otro lado, las unidades frontales exhiben una configuración más apretada, estando constituidas por pliegues despegados en evaporitas del Triásico superior que involucran una serie estratigráfica de menos 1 km de potencia. El contacto cabalgante entre ambas unidades está caracterizado por estructuras volcadas hacia el antepaís y localmente invertidas. Se presenta una restitución estructural para determinar la geometría del margen pasivo Triásico del NeoTetis y mostrar la evolución cinemática de las estructuras cabalgantes.

Abstract

In this work, a series of geological cross-sections across the Northern Calcareous Alps fold-and-thrust belt are presented. The most internal units studied are characterized by a sequence of thrust sheets that involve a series of more than 4km of Triassic carbonates detached in Permian-Triassic evaporites. Conversely, the frontal units exhibit a tighter configuration, being constituted by folds detached along Upper Triassic evaporites and involving a stratigraphic package less than 1 km thick. The thrust contact between both units is characterized by overturned strata. A structural restoration is presented to determine the geometry of the NeoTethys passive margin during the Triassic and to show the kinematic evolution of the studied thrust structures.

Restitución, tiempo a tiempo, del corte geológico de la Noguera Pallaresa, Pirineos Centrales

Stepwise restoration of the Noguera-Pallaresa cross-section, South Central Pyrenees

P. Santolaria y J.A. Muñoz

Geomodels Research Institute, Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain.
p.santolaria.otin@ub.edu, jamunoz@ub.edu

Palabras clave: Restitución de cortes, Pirineos Centrales, Cinturones de pliegues y cabalgamientos.

Resumen

La elaboración de un corte geológico está sujeta a numerosas incertidumbres. Algunas de ellas pueden minimizarse restituyendo el corte. La restitución de cortes representa una herramienta de validación que garantiza la plausibilidad de la geometría representada en un corte geológico. En este trabajo exploramos la potencialidad de las restituciones tiempo a tiempo utilizando el corte de la Noguera-Pallaresa, uno de los más representativos del Pirineo centro-meridional.

Antes de restituir, el corte geológico original (Muñoz, 1992) se ha revisado y se ha validado mediante técnicas geofísicas. La restitución tiempo a tiempo incluye más de 10 restituciones parciales, en las que en cada paso se muestra la geometría para diferentes eventos que incluyen desde el Triásico, el *rifting* Mesozoico (Cretácico inferior), el periodo *post-rift* (Cenomaniense-Santoniense inferior) hasta los últimos estadios de la formación de los Pirineos (Santoniense superior-Oligoceno). Gracias a la utilización de datos estratigráficos, sedimentológicos y de paleotemperaturas (e.g., Curry *et al.*, 2019), esta restitución tiempo a tiempo permite validar estructuralmente el corte. Además, arroja información sobre la evolución tectono-sedimentaria, en particular del espacio de acomodación durante las distintas etapas tectónicas, la flexión de la corteza, la paleotopografía o el papel que juega la tectónica salina durante la extensión Mesozoica y la orogenia.

Abstract

Construction of geological cross-sections is inherently subjected to uncertainties, some of which can be minimized through cross-section restoration. This is a validating tool that guarantees the geometrical plausibility of a cross-section. In this work, we explore the potential of stepwise restorations using the Noguera-Pallaresa section, one of the most representative sections in the South-Central Pyrenees.

Prior to restoration, the original cross-section (Muñoz, 1992) was revisited and geophysically constrained. The stepwise restoration involves over 10 restoration time steps, encompassing from the Triassic, the Mesozoic rifting (Lower Cretaceous), the post-rift stage (Cenomanian-Lower Santonian) to the latest stages of the growth of the Pyrenees (Upper Santonian-Oligocene)-. Through the utilization of stratigraphy and sedimentology constrains, as well as thermochronological data (e.g., Curry *et al.*, 2019), these stepwise restorations not only aid in constraining the structural validity of a cross-section but also provides insights of the tectono-sedimentary processes. This includes the evolution of accommodation space, flexure of the crust, paleotopography and the role of salt tectonics during the Mesozoic extension and the orogeny.

Referencias

Curry, M.E., van der Beek, P., Huismans, R. S., Wolf, S.G., Muñoz, J.A. (2019). *Earth and Planetary Science Letters*, 515, 26-37.

Muñoz, J. A., 1992. En *Thrust tectonics* (K. R. McClay, Ed.) London, Chapman & Hall, 235–246.

Caracterización estructural de la zona de Laspaúles-Castanesa (Zona centro-meridional de la Zona Axial Pirenaica)

Characterization of the structural architecture of the Laspaúles-Castanesa sector (South-Central Axial Zone, Pyrenees)

P. Santolaria, J.A. Muñoz, M. Snidero, M. De Matteis, P. Granado, E. Carola, M. Liesa y F. Sàbat

Geomodels Research Institute, Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain.
p.santolaria.otin@ub.edu, jamunoz@ub.edu, msnidero@ub.edu, marcodematteis@ub.edu, pablomartinez_granado@ub.edu, e.carola@ub.edu, sabat@ub.edu

Palabras clave: Zona Axial, Cuencas Permotriásicas, Pirineos.

Resumen

El sector Laspaúles-Castanesa representa la zona centromeridional de la Zona Axial de los Pirineos y queda limitada, al norte, por el batolito de La Maladeta y, por el sur, por el sistema de cabalgamientos basculados de la Zona de la Nogueras. Este sector se caracteriza por una secuencia Devónica despegada a favor de las pelitas del Silúrico, cubierta discordantemente por rocas clásticas y volcanoclásticas del Pérmico, areniscas y conglomerados del Triásico Inferior (facies Buntsandstein) y evaporitas, lutitas y carbonatos del Triásico Medio y Superior. La secuencia del Silúrico-Devónico registra deformación Varisca, a la cual se superpone la extensión Mesozoica y la compresión asociada a la orogenia Alpina.

En este trabajo presentamos un corte geológico (c. 20 km), NNE-SSO, representativo de área de estudio con el fin de discriminar la deformación Varisca frente a la deformación Mesozoica y reconstruir la estructura post-Varisca y pre-contractiva de este sector de la Zona Axial. Para ello, se han llevado a cabo una serie de campañas de campo donde se han adquirido más de 2900 datos estructurales (estratificación, lineaciones, esquistosidad, étc...) y se han realizado varios vuelos de dron a partir de los cuales se ha construido un modelo fotogramétrico de alta resolución utilizado para realizar una cartografía de detalle de la zona y su interpretación estructural.

Abstract

Laspaúles-Castanesa sector represents the south-central part of the Axial Zone in the Pyrenees, and it is limited to the north by the La Maladeta batholite and to the south by the Nogueras downfacing set of thrusts. This sector is characterized by a deformed Devonian sequence detached from the Silurian black pelites and topped unconformably by Permian volcanoclastic and clastic rocks, Lower Triassic sandstones and conglomerates (Buntsandstein facies) and Middle to Upper Triassic limestones and greywackes. The Silurian to Devonian sequence registers Variscan deformation, which is overprinted by Mesozoic extension and the compression associated with the the Alpine orogeny.

In this work, we present a representative, NNE-SSW cross-section (c. 20 km) of the area to discriminate Variscan versus Alpine deformation which may allow us to reconstruct the post-Variscan and pre-Alpine orogeny architecture of the area. To do so, we carried out several field campaigns where we collected more than 2900 structural data (dips, faults, lineations, cleavage, etc...) and performed some drone flights. Drone imagery permitted to construct a 3D, high resolution photogrammetry model used to map the area and interpret its structural geometry.

Herencia estructural en la cuenca del Ebro (margen SE “Ibérico”)

Structural inheritance within the Ebro basin (SE “Iberian” margin)

R. Soto[1], P. Clariana[1], J. García-Crespo[2], J. Mediato[2], C. Ayala[3], F. Rubio[2], C. Rey-Moral[2], B. Benjumea[2] y P. Canteli[2]

[1] Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Zaragoza. r.soto@igme.es, p.clariana@igme.es
[2] Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Ríos Rosas, 23. Madrid. garcia.crespo@igme.es, jf.mediato@igme.es, fm.rubio@igme.es, c.rey@igme.es, b.benjumea@igme.es, paula.canteli@igme.es
[3] Geosciences Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. cayala@geo3bcn.csic.es

Palabras clave: cuenca del Ebro, anomalía de Bouguer residual, fallas en subsuelo, rifting

Resumen

Muchas cuencas de antepaís muestran una evolución tectónica compleja caracterizada por presentar varias etapas pre-orogénicas que han podido influir en su patrón de deformación, evolución de subsidencia y/o historia térmica. Este es el caso de la cuenca del Ebro, que se formó sobre un rift Mesozoico preexistente caracterizado por dos etapas de rifting e influenciado también por estructuras Variscas anteriores. El área de estudio se sitúa dentro de la cuenca del antepaís del Ebro, próxima a su margen sur y a la Cordillera Ibérica en su porción centro-oriental. Datos sísmicos y de pozos revelan la existencia de importantes estructuras en el subsuelo que afectan a las rocas Paleozoicas y Mesozoicas debajo de los depósitos Cenozoicos subhorizontales. En este trabajo integramos la interpretación de nueve líneas sísmicas adquiridas en los 70 con datos gravimétricos previos para inferir la evolución tectónica del área de estudio. La anomalía residual de Bouguer, obtenida restando un campo regional lineal de la anomalía de Bouguer, se ha utilizado para constreñir mejor la geometría interpretada en los cortes geológicas realizados a partir del análisis de las líneas sísmicas. Los resultados han permitido inferir desacoplamientos de la deformación en las evaporitas Triásicas y reactivaciones parciales de estructuras en sectores cercanos a la Cordillera Ibérica. Este trabajo destaca los beneficios de combinar diferentes técnicas para definir mejor las geometrías en profundidad en cuencas del antepaís. El área de estudio constituye el área española seleccionada en el marco del proyecto europeo pilotSTRATEGY (2021-2026).

Abstract

Many foreland basins show a complex tectonic evolution characterized by several pre-orogenic stages that can influence on their deformation pattern, subsidence evolution and/or thermal history. This is the case of the Ebro basin, which was formed on a pre-existing Mesozoic rift characterized by two rifting stages and influenced by previous Variscan structures. The study area is located within the foreland Ebro basin, close to its southern margin and the central-eastern portion of the Iberian Chain. Legacy seismic and borehole data reveal the existence of major subsurface structures affecting Paleozoic and Mesozoic rocks below the subhorizontal Cenozoic deposits. In this work, we integrate the interpretation of nine seismic lines acquired in the 1970’s with previous gravimetric data to infer the tectonic evolution of the study area. The residual Bouguer anomaly, obtained by subtracting a linear regional field from the Bouguer anomaly, has been used to better constrain geological cross-sections based on the analysis of seismic lines. The results have allowed inferring decoupling of deformation in the Triassic evaporites and partial reactivations of structures in sectors close to the Iberian Chain. This work highlights the benefits of combining different techniques to better define foreland basin geometries at depth. The study area constitutes the Spanish selected area on the frame of the European project pilotSTRATEGY (2021-2026).

Reconstrucción palinspástica 3D: El sinclinal de Anemzi en el Alto Atlas Central (Marruecos), un estudio paleomagnético y estructural.

3D palinspastic reconstruction: Anemzi syncline in the Central High Atlas (Morocco), a paleomagnetic and structural study.

L. Yenes[1], P. Santolaria[2], P. Calvín[3], J.J. Villalaín[1], M. Marcén[4]

1 Dpto. Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09006 Burgos, Spain. lyenes@ubu.es, villa@ubu.es
2 Institut de Recerca Geomodels, Departament de Ciències de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona, 08028, Barcelona, Spain. p.santolaria.otin@ub.edu
3 Instituto Geológico y Minero de España, Oficina de Zaragoza, 50006 Zaragoza, Spain. calvinballester@gmail.com
4 Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain. mma@unizar.es

Palabras clave: Atlas, remagnetización, círculos menores, paleomagnetismo, modelo 3D

Resumen

La cordillera del Atlas, donde se ubica el Alto Atlas Central, constituye la mayor cadena montañosa intraplaca del norte de África. La evolución mesozoica del Alto Atlas está relacionada con la tectónica extensional, la actividad magmática y la tectónica salina. Se compone principalmente de cuencas triásicas y jurásicas que sufrieron una inversión tectónica durante el Cenozoico.

Investigaciones paleomagnéticas previas (p. ej. Calvín *et al.*, 2023) han revelado que las rocas sedimentarias jurásicas del Alto Atlas Central están afectadas por una remagnetización regional cretácica, datada en 100 Ma. Esta remagnetización se produjo después de la fase sinsedimentaria extensional pero antes de la inversión cenozoica de la cuenca. Es posible calcular el paleobuzamiento de cada estación en el momento de la remagnetización, permitiendo así la restitución de la estructura a 100 Ma. El estudio aborda un análisis paleomagnético en el sinclinal de Anemzi, con 91 estaciones distribuidas en 35 km^2. Hemos obtenido 91 paleobuzamientos correspondientes con el buzamiento que presentaban las capas en el momento de la remagnetización, previo a la inversión tectónica. Los datos se usarons para generar cortes y modelos geológicos 3D con el programa MOVE, mostrando estructuras actuales y restituidas a su estado (100 Ma). Comparar los modelos 3D actuales y palinspásticos permite obtener una visión más amplia de la evolución del Alto Atlas Central. Este análisis es importante para entender la relevancia de las estructuras extensionales heredadas en el contexto de las estructuras compresionales.

Abstract

The Atlas Mountains, where the Central High Atlas is located, constitute the largest intraplate mountain range in North Africa. The Mesozoic evolution of the High Atlas is related to extensional tectonics, magmatic activity and salt tectonics. It is mainly composed of Triassic and Jurassic basins that underwent tectonic inversion during the Cenozoic.

Previous paleomagnetic investigations (e.g. Calvín *et al.,* 2023) have revealed that the Jurassic sedimentary rocks of the Central High Atlas are affected by a regional Cretaceous remagnetization, dated at 100 Ma. This remagnetization occurred after the extensional synsedimentary phase but before the Cenozoic inversion of the basin. It is possible to calculate the paleo-dip of each station at the time of remagnetization, thus allowing the restitution of the structure at 100 Ma. The study deals with a paleomagnetic analysis in the Anemzi syncline, with 91 stations distributed over 35 km^2. We have obtained 91 paleodips corresponding to the dip of the layers at the time of remagnetization, prior to tectonic inversion. The data were used to generate cross-sections and 3D geological models with MOVE program, showing current and remagnetized structures. Comparing the present-day and palinspastic 3D models allows to obtain a broader view of the evolution of the Central High Atlas. This analysis is important to understand the relevance of the inherited extensional structures in the context of compressional structures.

Referencias

Calvín P., Casas-Sainz, A. M., Román-Berdiel, T. y Villalaín, J. J., (2023). *Springer Geology*.

Red de Ingenieras de Minas del Ecuador

Network of Mining Engineers of Ecuador

F.D. Andrade Mantilla[1], C.A. Rojas Villacis[2] y A.Á. Arias Villamarin [3]

1 Red de Ingenieras de Minas del Ecuador, Miembro Fundador, Quito-Ecuador, Sangolquí- Selva Alegre, da1983036@gmail.com
2 Red de Ingenieras de Minas del Ecuador, Miembro Fundador, Quito-Ecuador, Sangolquí- San Sebastián, cynthiarojasvillacis@gmail.com
3 Red de Ingenieras de Minas del Ecuador, Presidenta, Quito- Ecuador, calles José María Guerrón OE 245 y Lema Damián-Conocoto, aaav20102016@gmail.com

Palabras clave: organización, vinculación, incorporación de mujeres, industria minera

Resumen

La Red de Ingenieras de Minas del Ecuador (RIME), es una organización sin ánimo de lucro, independiente de cualquier órgano gubernamental, que no tiene ninguna afiliación política. Tiene personalidad jurídica propia y está sometida a las leyes y tribunales de la República del Ecuador. RIME, se conforma el 22 de agosto de 2023, en una reunión autoconvocada y constituida por 68 mujeres profesionales, todas con un nivel de educación superior en las ramas de las ciencias de la tierra (geología, minas, química, metalúrgicas, geógrafas, ambientales y áreas afines), para proponer y generar un espacio institucional que responda a objetivos encaminados a actividades de carácter técnico relacionado con el sector Minero. En este trabajo, se presentan los principales objetivos de la Organización RIME, que son: promover la diversidad en equipos de trabajo, fomentando la incorporación de mujeres en operaciones y cargos ejecutivos en la industria minera a nivel nacional; resaltar la labor y promover la participación de la mujer profesional en el sector minero, incentivando su formación integral, el intercambio de experiencias, inspirando a otras mujeres para su desarrollo laboral y profesional; promover el reconocimiento de la mujer que se desempeña en el ámbito minero, a través de la participación y vinculación de la mujer empresaria, directiva, profesional, técnica, operativa o estudiante y quienes cuenten con el interés en incursionar en el mismo. RIME también busca promover programas o actividades que consoliden el reconocimiento de la mujer en las áreas de las ciencias de la tierra como aporte efectivo en la industria minera, fomentando con ello su participación en el desarrollo de la economía en el Ecuador. (RIME, 2023)

Abstract

The Network of Engineers of Ecuador (RIME) is a non-profit organization, independent of any government body, it has no political affiliation, with its own legal personality, and subject to the laws and courts of the Republic of Ecuador. RIME, was formed on August 22, 2023, in a self-convened meeting made up of 68 professional women, all with a higher level of education in the branches of earth sciences (geology, mining, chemistry, metallurgical, geographers, environmental and areas for purposes), to propose and generate an institutional space that responds to objectives aimed at activities of a technical nature related to the Mining sector. In this work, we present the principal aims of the RIME Organization, that are: to promote diversity in work teams, encouraging the incorporation of women in operations and executive positions in the mining industry at the national level, highlighting the work and promoting the participation of professional women in the mining sector, encouraging their comprehensive training, the exchange of experiences, inspiring other women for their work and professional development; to promote the recognition of women who work in the mining field, through the participation and involvement of business, managerial, professional, technical, operational or student women and those who are interested in entering it. RIME also seeks to promote programs or activities that consolidate the recognition of women in the areas of earth sciences as an effective contribution to the mining industry, thereby promoting their participation in the development of the economy in Ecuador.

Referencias

Red de Ingenieras de Minas del Ecuador, Acta de conformación (pág. 1 y 7) y estatuto (pág. 1) agosto 2023, Quito- Ecuador. Los archivos son documentos internos.

¿Cómo están representadas las personas que se dedican a la geología en los libros de texto de secundaria españoles?

How are geologists represented in Spanish secondary education textbooks?

G. Calvo[1]

1 Dpto. Didácticas Específicas, Facultad de Educación, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza. gcalvose@unizar.es

Resumen: La presencia de personas que se dedican a la ciencia en los manuales empleados a lo largo de la educación secundaria presentan un claro sesgo de género, predominando hombres frente a mujeres. En este trabajo se ha analizado concretamente la presencia de personajes en los libros de texto de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato de las asignaturas en las que se imparten contenidos de geología, para determinar si también en este caso se aprecia esa diferencia. Para ello, se han revisado 19 manuales y se ha registrado el número de apariciones y el tipo de aparición en las unidades relacionadas específicamente con la geología. Se ha visto que, del total de veces que aparecen personas mencionadas, tan solo en el 21% de los casos corresponden a mujeres y que, en la gran mayoría de los casos, estas apariciones son poco relevantes y están descontextualizadas.

Palabras clave: Educación Secundaria Obligatoria, Bachillerato, libros de texto, geología, perspectiva de género.

Abstract: *The presence of scientists in secondary education textbooks presents a clear gender bias, with men predominating over women. In this work, the presence scientists in Secondary Education and High School textbooks that include geology-related content has been analyzed, to determine if this difference is also present in this context. To this end, 19 manuals have been reviewed and the number of occurrences and type of occurrence have been recorded in the units specifically related to geology. It has been seen that, of the total number of times that people are mentioned, only in 21% of the cases these mentions correspond to women. Also, in most of the cases, these appearances are of little relevance and are decontextualized.*

Key words: *Compulsory Secondary Education, High School, textbook, geology, gender perspective.*

INTRODUCCIÓN

Los libros de texto sirven como base de contenidos y saberes para el alumnado, para que comprendan cómo se construye el conocimiento y la forma en que nos acercamos a él (Vaíllo Rodríguez, 2013). Existen numerosas guías en las que se incluyen pautas para incorporar la perspectiva de género en estos manuales, que hacen hincapié en aspectos como en los contenidos, las imágenes y el lenguaje que se emplea (Brugeilles y Cromer, 2009; Vaíllo Rodríguez, 2013). Sin embargo, tal y como han puesto en evidencia distintos estudios, la presencia de las mujeres en los libros de texto dista mucho de ser igualitaria o equilibrada, perpetuando así la idea de que preferentemente los hombres son los que se han dedicado a hacer avanzar el conocimiento científico. Este androcentrismo presenta diversos problemas. Además de proporcionar una visión sesgada de la realidad, poco diversa y que puede influir en las futuras vocaciones científicas de las mujeres, al carecer de referentes femeninos suficientes (Manassero y Vázquez, 2003; López-Navajas, 2014).

A pesar de haberse llevado a cabo distintos estudios sobre los contenidos de los libros de texto desde una perspectiva de género, apenas se han visto cambios en las últimas décadas (Vaíllo Rodríguez, 2016). Análisis recientes de los libros de texto de asignaturas de ciencias empleados en la etapa de Educación Secundaria Obligatoria han determinado que el porcentaje medio de presencias de mujeres era tan solo del 12% y el de apariciones apenas del 8%, estando muy lejos de otros ámbitos como los libros de texto de inglés o francés cuyas cifras se sitúan entre el 20 y el 30% (López-Navajas, 2015). Existen múltiples proyectos que están documentando cuál ha sido el papel de las mujeres en distintas disciplinas, destacando sus principales contribuciones o sus obras más relevantes (como el proyecto "Women's Legacy" o la página web "Mujeres con ciencia"), aun así, raras veces este tipo de información queda reflejada en los libros de texto.

En este sentido, analizar cuál es la visión que transmiten los libros de texto actuales no solo sobre el papel de la mujer en la ciencia, sino en concreto en la geología, puede ayudar a determinar cómo se puede mejorar para tratar de fomentar el interés por la geología y las vocaciones científicas entre el alumnado.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Siguiendo las tendencias de estudios anteriores centrados en determinar la presencia y representación de la mujer en los libros de texto, en este estudio se ha analizado de forma más concreta el papel de la mujer en la geología y la manera en la que está representada en los manuales que se emplean en las aulas.

Para ello, se han revisado los libros de texto de Educación Secundaria Obligatoria (ESO) y Bachillerato de las asignaturas en las que se puede esperar que aparezcan contenidos relacionados con la geología. Es necesario tener en cuenta que en 2º de Bachillerato tan solo hay una asignatura en la que se incluyan contenidos de geología (Geología y ciencias ambientales) y que no es obligatorio cursarla, lo que implica que no existen tantos manuales como en otras asignaturas.

En total, se han revisado 19 libros de hasta cinco editoriales diferentes (Tabla I). Todos ellos publicados entre 2022 y 2023, reflejando en su interior los cambios producidos tras la implantación de la nueva legislación educativa (Orden EFP/754/2022, de 28 de julio y Orden EFP/755/2022, de 31 de julio). En cada libro, se han analizado las apariciones solamente en los temas o unidades que están directamente relacionados con la geología, no contemplándose en este estudio aquellos centrados en el medioambiente o el desarrollo sostenible.

Curso	Asignatura	Editoriales
1º ESO	Biología y geología	Anaya, Edelvives, McGraw Hill, Santillana (versión para Aragón), SM
3º ESO	Biología y geología	Anaya, Edelvives, McGraw Hill, Santillana (versión para Aragón), SM
4º ESO	Biología y geología	Anaya, Edelvives, McGraw Hill, Santillana
1º Bachillerato	Biología y geología	Anaya, McGraw Hill, Santillana
2º Bachillerato	Geología y ciencias ambientales	Anaya, Edelvives

TABLA I. *Libros de texto analizados en este estudio.*

A la hora de registrar las apariciones de las distintas personas, se han tomado como referencia las categorías establecidas en López-Navajas (2015): 1) el número de personajes, que informa del número de personas distintas que aparecen, 2) el número de apariciones de cada personaje, que informa de la recurrencia, es decir, de la repercusión que tienen. En este segundo caso, se pueden registrar distintos aspectos en función del lugar del texto en el que aparecen (cuerpo principal, actividades y anexos, incluyendo en este último caso no solo apartados situados al final del libro sino el texto que se puede encontrar en los márgenes del cuerpo principal) y el modo como aparecen (reseñado, cuando la mención es relevante y está contextualizada, tenga la extensión que tenga; citado, cuando solo aparece el nombre sin información adicional de ningún tipo; obra original, si aparece un fragmento de dicha obra, sea un texto o una ilustración realizada por esa persona). Dadas las incorporaciones de algunas editoriales de secciones específicas al inicio de cada unidad en las que se incluyen biografías de personas que se dedican a la ciencia, en la subcategoría de lugar en el que aparecen se ha añadido como nueva categoría la portada del tema o unidad.

Así mismo, se ha tomado la decisión de contar solamente una entrada de aparición por personaje en cada apartado, al igual que hace López-Navajas (2015), para evitar desajustes en los resultados. Si en una sección de tema se está hablando de las propiedades de los minerales y aparece la escala de Mohs mencionada en el cuerpo en varias frases o incluso páginas seguidas dentro de esa misma sección, solo se contabiliza una aparición. Sin embargo, si aparece junto a ese texto una ilustración o una figura con la escala de Mohs, se contabiliza de forma independiente. Por otro lado, las fotografías que sirven de acompañamiento al texto solo se han podido contabilizar si se podían asociar a una persona en concreto como, por ejemplo, si aparecía un pie de figura con el nombre de dicha persona; por tanto, aquellas en las que aparecen personas, sean hombres o mujeres, de las que no se conocen sus nombres, no se han tenido en cuenta en este análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los 19 libros de texto de biología y/o geología analizados, se han contabilizado un total de 472 apariciones de personajes, correspondiendo un 21% a mujeres y un 79% a hombres. En los libros de 2º de Bachillerato es donde más apariciones se contabilizan (n=201), seguido de 4º ESO (n=120) y de 1º Bachillerato (n=119) (Fig. 1).

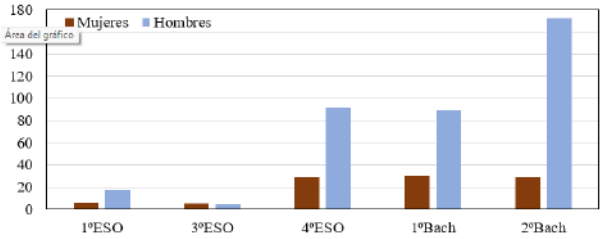


FIGURA 1. *Número de apariciones de personajes por género que aparecen en cada nivel educativo en los libros de texto analizados.*

Estas apariciones corresponden a 163 personas distintas (132 hombres frente a 31 mujeres). Hay que considerar que algunas de las que personas se mencionan, a pesar de que las unidades analizadas se centran en contenidos relacionados casi exclusivamente con la geología, no son geólogas; ejemplos son Pierre y Marie Curie, Benjamin Franklin o Immanuel Kant.

Aquellas personas que aparecen con mayor frecuencia, sea cual sea el lugar o el modo en que son mencionadas, son: Alfred Wegener (n=48), Friedrich Mohs (n=22), Inge Lehmann (n=21), Charles Lyell (n=20) y James Hutton (n=20). En este caso, el modo de mención sí es un factor relevante dado que, en la mayor parte de los casos, cuando se habla de Alfred Wegener es en relación con la teoría de la deriva continental, incluyéndose datos relacionados con su vida y sus

hallazgos, pero cuando aparece Friedrich Mohs es, casi siempre, al hablar de la escala de dureza de los minerales, pero sin dar más detalles sobre su persona. En el caso de la única mujer de esta lista, Inge Lehmann, figura cinco veces como reseñada, que sería el modo más relevante, pero ninguna de estas es en el cuerpo principal del libro, sino en los anexos (n=4) y en la portada (n=1), en este último caso en uno de los libros de 1ºBachillerato. Hay además 89 personas que solo aparecen una única vez (78 hombres y 11 mujeres).

En el primer ciclo de la ESO la presencia de personajes es mucho más baja en comparación con el segundo ciclo de la ESO y 1º Bachillerato, produciéndose luego un gran salto entre 1º y 2º de Bachillerato en lo que respecta a los hombres. En el caso de los libros de 2º Bachillerato, a diferencia del resto, su contenido es exclusivamente sobre geología y ciencias ambientales, por lo que se han podido analizar casi todas las unidades.

En lo que respecta a las apariciones de mujeres, en los cursos de transición entre etapas (4º ESO y 1º Bachillerato), las cifras son muy similares, siendo también parecidas a las de 2º Bachillerato. Esta situación contrasta con otros resultados en los que se ha visto que, según aumenta el nivel educativo, la presencia de mujeres disminuye (López-Navajas, 2014), algo que sí podría tener un impacto en cómo evolucionan las vocaciones científicas a lo largo del sistema educativo. Aun así, llama la atención la gran diferencia entre la presencia de mujeres y de hombres en 2º Bachillerato, que se puede explicar por la presencia en uno de los libros analizados de varias líneas de tiempo con hitos históricos de la geología en los que se incluyen nombres casi exclusivamente de hombres.

Resulta destacable que en los libros de 3º ESO apenas aparecen personajes. Esto se puede deber a que, a nivel nacional, la legislación establece unos saberes básicos para ambos cursos en su conjunto que cada Comunidad Autónoma puede elegir si separar o no. En el caso de Aragón, los contenidos relacionados con la estructura y materiales de la Tierra se imparten preferentemente en 1º ESO y aquellos relacionados con los procesos geológicos internos y externos en 3º ESO (Orden ECD/1172/2022). Esto parece implicar que hay una menor presencia de personajes cuando se tratan contenidos relacionados con las interacciones entre la atmósfera, hidrosfera y geosfera o el modelado del relieve.

Analizando el lugar en el que aparecen los personajes en los libros de 1º ESO a 1º Bachillerato, su presencia en las portadas de las unidades sí parece más equilibrada entre géneros, pero en el resto de los casos se aprecia una gran diferencia (Fig. 2). Muchas editoriales incluyen biografías al inicio de cada unidad, por lo que resulta más sencillo seleccionar a personajes clave relacionados con los contenidos a trabajar e irlos alternando. Por ejemplo, la editorial Anaya incluye una ilustración y un texto narrado en primera persona al inicio de cada unidad. En el libro de 1ºESO, en la unidad que versa sobre minerales y rocas, aparece una biografía de Georgius Agricola y en el caso de 4ºESO, en el tema de la Tierra y su dinámica, es Marie Tharp la protagonista.

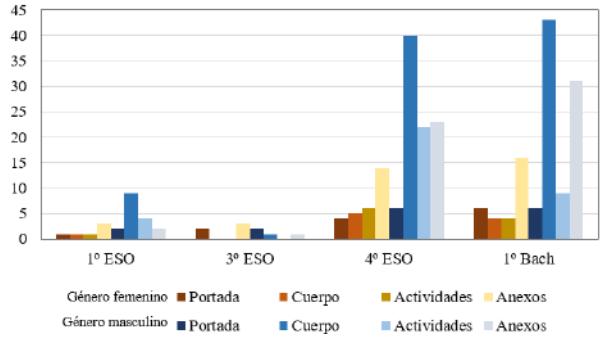


FIGURA 2. *Apariciones de personajes en función del lugar.*

En cambio, si se analiza la presencia en el cuerpo principal, las mujeres apenas representan un 10% del total. Estas menciones son mucho más relevantes, dado que suelen ser apartados de obligada lectura y pueden tener mayor repercusión que otras secciones (López-Navajas, 2015). En el caso de las menciones en las actividades, lo más habitual suele ser que consistan en realizar una búsqueda de información sobre sus biografías y sus hallazgos, y exponerlo en forma de infografía o póster, quedando como algo marginal en lo que al contenido científico del tema se refiere.

En cuanto al modo en el que aparecen, se aprecia una gran diferencia tanto entre géneros como entre ciclos (Fig. 3).

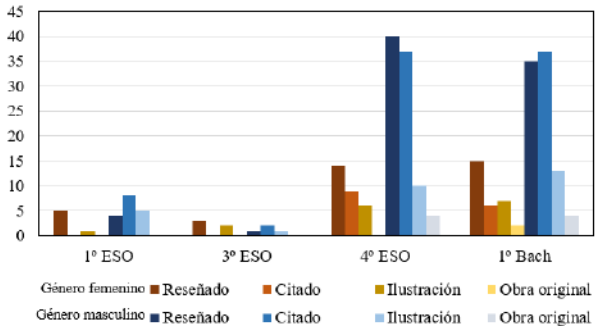


FIGURA 3. *Apariciones de personajes en función del modo.*

Por sus características, los resultados de los libros de texto de 2º Bachillerato se presentan en la Figura 4.



FIGURA 4. *Resultados en función del lugar y el modo en el que aparecen en los libros de 2º Bachillerato.*

Tanto en el lugar como en el modo de aparición de los personajes en los libros de 2º Bachillerato predominan

claramente los hombres. Al tratarse de un curso en el que las personas interesadas en seguir con su formación deben elegir qué estudiar, que la presencia femenina sea tan baja puede conllevar una disminución en la selección de grados o ciclos relacionados con esta rama de la ciencia entre las mujeres.

De estos resultados se puede establecer que existe un claro margen para mejorar la presencia de las geólogas en todos los libros de texto. Para tratar de paliar este problema, se indican a continuación una serie de recomendaciones, siendo la primera aumentar el número de referencias relevantes de geólogas para normalizar su presencia y que no resulte algo anecdótico o excepcional. Esto se puede hacer incluyendo algunas de sus principales aportaciones en el cuerpo principal o incorporando fragmentos de obras originales. En lo que respecta a las mujeres que se han dedicado a la geología en el pasado, se podrían incluir ilustraciones realizadas por mujeres, como las de cuevas y cortes geológicos de Orra White Hitchcock (1796-1863), las de deslizamientos de Mary Buckland (1797-1856) o de los restos fósiles que aparecen en las cartas de Mary Anning (1799-1847). Otra posibilidad sería emplear fragmentos de obras, como la descripción del terremoto de Chile de 1822 de Maria Graham (1785-1842). Permitió conocer sus devastadores efectos y qué consecuencias tuvo en lo que respecta a cambios en la elevación del terreno, apareciendo mencionada incluso en los debates entre neptunistas y plutonistas. Esto haría posible trabajar otro aspecto crucial, la contextualización histórica y/o social de las creaciones. En este sentido, al igual que se suelen mencionar a Katia Kraft o a Marie Curie junto a sus parejas, se podría destacar en los libros de texto que algunos de los geólogos de los siglos XVIII y XIX contaban frecuentemente con la ayuda de familiares, esposas y/o hijas, como es el caso de la pareja formada por Charles Lyell y Mary Horner Lyell (Virgili, 2003). En todos los temas relacionados con la geología se pueden incluir referencias de personajes femeninos, como aquellas mujeres que estuvieron al mando de explotaciones mineras, como Barbara Uthmann (1514-1575) o Mary Teresa Herbert (1686-1775), que tuvo un papel relevante en la explotación de las minas de Riotinto.

Incluir más mujeres que se dediquen a la geología en la actualidad ayudaría a acercar esta rama de la ciencia a los más jóvenes, ayudando a fomentar las vocaciones científicas especialmente entre las chicas en cada curso y en las transiciones entre etapas, cuando deben elegir qué asignaturas cursar. Aunque en casi todos los libros de texto analizados aparece mencionada la reciente erupción de La Palma de 2021, en escasas ocasiones se habla de las científicas concretas que estuvieron allí involucradas. De forma complementaria, se podrían crear actividades que consistieran no tanto en buscar información sobre mujeres de forma descontextualizada y con un mero fin expositivo, sino que permitiesen trabajar activamente los contenidos conceptuales y fomentar las distintas competencias establecidas en la legislación educativa.

CONCLUSIONES

Con este estudio se ha analizado la presencia de personajes que aparecen en los libros de texto en los que se incluyen contenidos relacionados con la geología. Se ha visto que la presencia de las mujeres es muy escasa y que, en muchos de los casos, sus apariciones están relegadas a los anexos. Si se quiere fomentar las vocaciones científicas entre las personas más jóvenes, y especialmente entre las mujeres, es importante transmitir una visión de la geología, y también de otras ciencias, en la que la diversidad de nuestra sociedad, tanto pasada como presente, quede correctamente reflejada.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto PID2021-1236150A-I0 del MIMECO y Grupo Beagle. Investigación en Didáctica de las Ciencias Experimentales (S27_23R), financiado por el Gobierno de Aragón.

REFERENCIAS

Brugeilles, C. y Cromer, S. (2009): *Promoting gender equality through textbooks: a methodological guide.* UNESCO, ED.2009/WS/39, 98 p.

López-Navajas, A. (2014): Análisis de la ausencia de las mujeres en los manuales de la ESO: una genealogía del conocimiento ocultada. *Revista de Educación*, 363: 282-308.

López-Navajas, A. (2015): *Las mujeres que nos faltan. Análisis de la ausencia de las mujeres en los manuales escolares.* Tesis doctoral, Universitat de València, 334 p.

Manassero, M.A. y Vázquez, A. (2003): Las mujeres científicas: un grupo invisible en los libros de texto. *Investigación en la escuela*, 50: 31-45.

Orden EFP/754/2022, de 28 de julio, por la que se establece el currículo y se regula la ordenación de la Educación Secundaria Obligatoria en el ámbito de gestión del Ministerio de Educación y Formación Profesional.

Orden EFP/755/2022, de 31 de julio, por la que se establece el currículo y se regula la ordenación del Bachillerato en el ámbito de gestión del Ministerio de Educación y Formación Profesional.

Orden ECD/1172/2022, de 2 de agosto, por la que se aprueban el currículo y las características de la evaluación de la Educación Secundaria Obligatoria y se autoriza su aplicación en los centros docentes de la Comunidad Autónoma de Aragón.

Vaíllo Rodríguez, M. (2013): *Recomendaciones para introducir la igualdad e innovar en los libros de texto.* Instituto de la Mujer, Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 184 p.

Vaíllo Rodríguez, M. (2016): La investigación sobre libros de texto desde la perspectiva de género: ¿hacia la renovación de los materiales didácticos? *Tendencias pedagógicas*, 27: 97-124.

Virgili, C. (2003): *El fin de los mitos geológicos. Lyell.* Ed. Nívola, Madrid., 318 p.

"Geociencias Arcoíris", una iniciativa pionera en España para conocer la situación de las personas con diversidad afectivo sexual y de género que trabajan en Geociencias

"Geociencias Arcoíris", a pioneering initiative in Spain to find out about the situation of people with affective, sexual and gender diversity who work in Geosciences

J. Carmona[1], L. Gil[2], J. Pey[3], C. Jiménez de Cisneros[4], B. Martínez[5], B. Valero Garcés[3], D. Ponce de León[6], I. Blasco[7], E. Díaz-Losada[8]

1 Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), c/ Dr. Severo Ochoa, 7, 28040 Madrid. j.carmona@csic.es
2 Social Media en Investigación. lydiagil@socialmediaeninvestigacion.com
3 Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC). Av. Montaña, 1005, 50059, Zaragoza. jorge.pey@ipe.csic.es blas@ipe.csic.es
4 Instituto Andaluz de CC. de la Tierra (CSIC-UGR). Av. de las Palmeras 4, 18100, Armilla, Granada. concepcion.cisneros@csic.es
5 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
6 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. d.poncedeleon@igme.es
7 Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG). C/ Raquel Meyer 7, 28027, Madrid. iblasco@icog.es
8 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. elisabeth.diaz@igme.es

Palabras clave: diversidad afectivo sexual, LGTBIQA+, discriminación, geociencias

Resumen

En España, la situación de las personas con diversidad afectivo sexual y de género en ciencia es escasamente conocida. #GeocienciasArcoíris es una propuesta pionera por parte de varios centros del CSIC, universidades y colegios profesionales que surge ante la necesidad de conocer la situación de este colectivo en los centros de trabajo de Geociencias. Los resultados del estudio muestran que las personas LGTBIQA+ se sienten discriminadas tanto en la sociedad en general, como en el ámbito laboral, y más aún en el caso de las mujeres con diversidad afectivo sexual y de género. Aunque los centros de trabajo son considerados seguros, gran parte de las personas LGTBIQA+ encuestadas no se sienten cómodas a la hora de hablar de su vida personal con colegas, invisibilizando una realidad de la sociedad de la que formamos parte. Esto es especialmente patente en el caso de las mujeres, que sufren una mayor invisibilización al hablar menos de su vida privada. Destaca también el hecho de que nadie ha denunciado la discriminación por su condición/orientación sexual en su entorno laboral cuando la ha sufrido y que, en general, hay un desconocimiento de los protocolos existentes frente a este tipo de hechos. #GeocienciasArcoíris sigue abierto a la participación con el objetivo de visibilizar al colectivo y asociarse con iniciativas internacionales similares.

Abstract

In Spain, the situation of people with affective, sexual and gender diversity in science is little known. #GeoscienciasArcoíris is a pioneering proposal by several CSIC centres, universities and professional associations, which arose from the need to know the situation of this group in Geosciences workplaces. The results of the study show that LGTBIQA+ people feel discriminated both in society, in general, and in workplace, particularly women with affective, sexual and gender diversity. Although workplaces are considered safe, many of the LGTBIQA+ people surveyed do not feel comfortable talking about their personal lives with colleagues, making invisible a reality of the society of which we are a part. This is especially evident in the case of women, who suffer greater invisibilisation as they talk less about their private lives. It also highlights the fact that no one has reported discrimination based on their sexual condition/orientation in their workplace when they have suffered it and that, in general, there is a lack of knowledge of the existing protocols in this type of cases. #GeocienciasArcoíris is still open to participation with the aim of making the collective more visible and partnering with similar international initiatives.

Percepciones y contribuciones de las paleontólogas en el congreso de la Asociación Europea de Paleontología de Vertebrados del 2023

Perceptions and Contributions of Female Paleontologists at the European Association of Vertebrate Palaeontology Congress 2023

P.M. Carro-Rodríguez[1], I. Menéndez[1,2], A. Oliver[1,3], A.R. Gómez Cano[1,4], S. Gamboa[1,2,5], P. López-Guerrero[1] y D. Sanz-Pérez[1,6]

1 Asociación Mujeres con los pies en la Tierra. C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid. patcarro@ucm.es, iris.menendez@mfn.berlin, adriana.oliver@uvigo.es, argomezcano@gmail.com, saragamb@ucm.es, palomalopez1981@gmail.com, dasanz01@ucm.es
2 Museum für Naturkunde, Leibniz Institute for Evolution and Biodiversity Science 43, 10115 Berlin, Alemania.
3 MAPAS Lab; Centro de Investigación Mariña, Universidade de Vigo, 36310, Vigo.
4 Transmitting Science, Carrer Gardenia 2, 08784 Piera, Barcelona.
5 Universidad Complutense de Madrid, Av. Complutense, s/n, 28040 Madrid.
6 Departamento GEODESPAL, Facultad de CC Geológicas, UCM, C/ José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid.

Palabras clave: mujer y ciencia, equidad, diversidad, análisis cuantitativo, representación.

Resumen

La equidad en la representación de géneros en congresos científicos no está siempre garantizada. Abordar esta problemática implica examinar las causas que contribuyen a la escasa presencia de mujeres y otros géneros no normativos en estos eventos académicos. Para ello, se realizó una encuesta motivacional a los/las asistentes al congreso anual, en Sabadell, de la Asociación Europea de Paleontología de Vertebrados (EAVP). Con un enfoque en la diversidad de contribuciones y participantes, la encuesta recopila, a través de 21 preguntas, datos sobre la posición actual, la nacionalidad, el género y el tipo de contribución presentada. Hasta la fecha, se han obtenido 52 respuestas. Los resultados revelan una representación equitativa entre hombres y mujeres en las presentaciones de pósteres. En cuanto a las charlas, existe una mayor proporción masculina. Al tratarse de un congreso internacional participan multitud de nacionalidades, siendo la europea la mejor representada. La encuesta también explora la distribución de roles, revelando una variedad de posiciones que van desde alumnado de postgrado hasta personas con cargos permanentes lo que contribuye a un ambiente enriquecedor donde la experiencia se comparte desde diversas perspectivas. En resumen, la encuesta proporciona una visión integral de la participación en el congreso de la EAVP de 2023, destacando la diversidad en la presentación de contribuciones y la representación internacional, así como la amplia gama de posiciones que enriquecen la dinámica del evento.

Abstract

Gender equity in the representation at scientific conferences is not always guaranteed. Addressing this issue involves examining the causes contributing to the limited presence of women and other non-normative genders in these academic events. To do so, a motivational survey was conducted among attendees at the annual congress of the European Association of Vertebrate Paleontology (EAVP) in Sabadell. With a focus on the diversity of contributions and participants, the survey gathers data, through 21 questions, on current position, nationality, gender, and type of contribution presented. To date, 52 responses have been obtained. The results reveal equitable representation between men and women in poster presentations. However, there is a higher proportion of male speakers in talks. Given that this is an international congress, participants come from a multitude of nationalities, with European representation being the strongest. The survey also explores the distribution of roles, revealing a variety of positions ranging from graduate students to individuals with permanent positions, contributing to an enriching environment where experiences are shared from diverse perspectives. In summary, the survey provides a comprehensive view of participation in the 2023 EAVP congress, highlighting diversity in contribution presentation and international representation, as well as the wide range of positions that enrich the event's dynamics.

Geólogas en Red

Women Geologists Network

M. Chamizo Borreguero[1], D. Sanz Pérez[1,2,3], I. Pérez Cáceres[4], C. Fernández Leyva[1,5], A. Ruíz Constán[1,5], B. Martínez García[1,6] y M.C. Feria[1]

1 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. dasanz01@ucm.es
3 Dpto. Geología Sedimentaria y Cambio Ambiental, Instituto de Geociencias (IGEO-UCM), 28040 Madrid.
4 Cámara Oficial Mineira de Galicia. Rua Juana Capdevielle, 2 (Edificio Expocoruña), 15008 A Coruña. irepcaceres@gmail.com
5 Instituto Geológico y Minero de España, Urb. Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es; c.fernandez@igme.es
6 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus

Palabras clave: Brecha de género, Geología, Mentorización formal.

Resumen

Los programas de mentorización han demostrado ser una herramienta útil para hacer frente a las barreras a las que se enfrentan las mujeres tanto en su formación académica como en el desarrollo de su actividad profesional (Sexton *et al*., 2018). En este contexto, la Comisión Mujeres y Geología puso en marcha en 2020 Geólogas en Red (Unidad de Mujeres y Ciencia, 2023), un programa de mentorización con perspectiva de género que tiene entre sus objetivos la integración y la visibilización de las geólogas en uno de los campos científicos menos diversos de las áreas STEM (Marín-Spiotta *et al*., 2020). Este programa cuenta con más de 50 mentoras, profesionales de distintas disciplinas de la Geología, que actúan como referentes y proporcionan a las mentorizadas herramientas y motivación para la consecución de sus objetivos. Desde su puesta en marcha, han participado 37 parejas mentora-mentorizada con diferente grado de éxito. El seguimiento del programa, mediante encuestas, ha permitido identificar las motivaciones, miedos y obstáculos a los que las geólogas se enfrentan a lo largo de su carrera.

Abstract

Mentoring programmes have proven to be a useful tool to deal with the barriers that women face both during their academic training and in the development of their professional activity (Sexton *et al*., 2018). In this context, the Women and Geology Commission launched in 2020 Women Geologists Network (*Unidad de Mujeres y Ciencia*, 2023), a mentoring programme with a gender perspective that has among its objectives the integration and visibility of women geologists in one of less diverse scientific fields in the STEM areas (Marín-Spiotta *et al*., 2020). This programme has more than 50 women mentors from different disciplines of Geology, who serve as a reference and provide the mentees with tools and motivation to achieve their goals. Since its launch, 37 mentor-mentee pairs have participated with different degrees of success. The monitoring of the programme, by questionnaire, has made it possible to identify the motivations, fears and obstacles that the female geologists have to face during their careers.

Referencias

Marín-Spiotta, E., Barnes, R. T., Berhe, A. A., Hastings, M. G., Mattheis, A., Schneider, B., y Williams, B. M. (2020). Hostile climates are barriers to diversifying the geosciences. Advances in Geosciences, 53, 117–127. DOI: 10.5194/adgeo-53-117-2020

Sexton, J.M., Pugh, K.J., Bergstrom, C.M. y Riggs, E.M. (2018). Reasons undergraduate students majored in geology across six universities: the importance of gender and department. Journal of Geoscience Education, 66(4), 319-336

Unidad de Mujeres y Ciencia (2023) Guía de programas de mentorazgo en Ciencia, Tecnología e Innovación: Descripción y análisis desde un enfoque de género. Ministerio de Ciencia e Innovación, 51 pp

Implementación de un Comité de igualdad en un centro de investigación de Geociencias (GEO3BCN-CSIC)

Implementation of an Equality Committee in an Earth Sciences Research Institute (GEO3BCN-CSIC)

D. Cruset[1], A. Geyer[1], C. Ayala[1], J. Alcalde[1], J. Álvarez-Marrón[1], L. Expósito[1], J. Ibáñez-Insa[1], M. López-Saavedra[1], E. Montoya[1] y G. Monzón[1]

[1] Geociències Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. comissio.igualtat@geo3bcn.csic.es

Palabras clave: Igualdad, Geociencias, concienciación, prevención, actuación.

Resumen

La igualdad de género en el ámbito de las Geociencias ha sido históricamente desafiante. Las mujeres se han enfrentado a innumerables barreras para su participación plena y equitativa en esta disciplina científica. A pesar de los avances en la concienciación sobre la importancia del trabajo de las mujeres en la investigación, todavía persisten desequilibrios de representación, oportunidades y reconocimiento. De hecho, de acuerdo con los datos del CSIC del año 2020, en la subárea de Recursos Naturales, donde se incluyen las Geociencias, el índice de techo de cristal es de 2.28, por encima de la media de 1.35. Este índice mide las dificultades para las mujeres en investigación respecto a los hombres.

La creación del Comité de Igualdad de GEO3BCN-CSIC en enero de 2022 es una respuesta a esta problemática. También refleja un esfuerzo consciente por parte del Centro para abordar los desafíos de desigualdad de género que existen, reconociendo la importancia de una participación equitativa y de la eliminación de sesgos de género en la investigación. El Comité está formado por ocho personas pertenecientes a todos los estamentos existentes en GEO3BCN-CSIC (personal científico, incluyendo pre y postdocs, personal técnico y de comunicación, así como Dirección).

Para concienciar en materia de igualdad, se han organizado diversos seminarios, exposiciones y mesas redondas, preparado videos y proyectado películas temáticas. También se realizó una encuesta interna para conocer la percepción del personal sobre la igualdad en el Centro cuyos resultados indican una situación aceptable, con algunas deficiencias a erradicar. La página web de GEO3BCN tiene una sección de Igualdad que informa sobre las actividades del Comité y la documentación y normativa para implementar medidas contra desigualdades, discriminación, acoso laboral, sexual y violencia de género.

Abstract

Gender equality in Geosciences has historically been challenging. Women have faced numerous barriers to their equitable participation in this scientific discipline. Despite the advancements in awareness of the importance of women's work in research, disparities in representation, opportunities, and recognition persist. In fact, according to CSIC data from 2020, in the subarea of Natural Resources, which includes Geosciences, the glass ceiling index is 2.28, exceeding the average of 1.35. This index measures the difficulties that women face in their research careers compared to men.

The establishment of the Equality Committee of the GEO3BCN-CSIC in January 2022 is a response to this issue. It reflects a conscious effort to address gender inequality challenges, recognizing the importance of equitable participation and the elimination of gender biases in research. The Committee comprises eight representatives from all existing groups in GEO3BCN-CSIC (predoctoral and postdoctoral researchers, technical and communication staff, staff scientists, and the management team).

To raise awareness of equality, we have organized seminars, exhibitions and roundtable discussions, created videos, and screened movies. A survey was also conducted to know the staff's perception of equality in the Centre. The results show an acceptable situation, although with a few deficiencies that need to be addressed. The GEO3BCN website contains an Equality section that outlines the activities of the committee and the documents and guidelines to establish measures to detect, prevent, and address situations of inequality, workplace and sexual harassment, discrimination, and gender violence.

Nuevas caras de viejos problemas: visibilizando la mujer en Geología a través de cómics.

New faces, age-old struggles: Making women visible in Geology through comics.

E. Díaz-Losada[1], R. Martín-Banda[2], A. Lucía-Vela[1], A. Ruiz-Constán[3], C. Ayala[4], D. Ponce de León[5] y J. Rodríguez[5]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) C. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid elisabeth.diaz@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) Plaza de España-Torre Norte. 41013 Sevilla r.martin@igme.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) Urb. Alcázar del Genil, 4-edif. Zulema, Bajo. 18006 Granada a.ruiz@igme.es
4 Geociencias Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Luis Sole i Sabaris, s/n. 08028 Barcelona cayala@geo3bcn.csic.es
5 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) C. La Calera, 1. 28760 Tres Cantos (Madrid) d.ponce@igme.es y ja.rodriguez@igme.es

Palabras clave: Igualdad, mujeres y geología, pioneras, comic, sensibilización

Resumen

"Nuevas caras de viejos problemas" es una serie de 16 cómics compuesta por 64 viñetas creadas desde el Comité de Igualdad del IGME e ilustradas por las geólogas Dánae Sanz y Nia Schamuels. Su objetivo es sensibilizar acerca de los obstáculos asociados a ser mujer, a los que nos seguimos enfrentando desde tiempos pasados en el ámbito de la geología, en particular, y en el mundo, en general. A la vez busca dar a conocer y poner en valor a 16 pioneras en esta ciencia, haciendo un paralelismo con situaciones análogas de sus vidas, en un formato atractivo y ameno. Entre la cuidadosa selección de situaciones reales reflejadas en las viñetas, varias son extrapolables a cualquier otro contexto vital, laboral o de estudio, garantizando así la representatividad y relevancia de las escenas para cualquier mujer, no solo en el ámbito de la geología. Además, los diferentes orígenes y contextos culturales de las pioneras elegidas (Mateos y Ruiz Constán, 2021) aportan un enfoque inclusivo a las viñetas, haciéndolas interesantes como recurso didáctico en los centros educativos. Las viñetas generan reflexión, discusión e incremento de la conciencia colectiva sobre los problemas de género que vivimos en la ciencia de la geología. Para acceder a ellas se dispone de un código QR asociado.

Abstract

"New faces, age-old struggles" is a series of 16 comics composed of 64 vignettes created by the IGME Equality Committee and illustrated by geologists Danae Sanz and Nia Schamuels. Its aim is to raise awareness about the obstacles associated with being a woman, which we continue to face from past times in the field of geology, in particular, and in the world in general. At the same time, it seeks to make known and value 16 pioneers in this science, making a parallelism with analogous situations of their lives, in an attractive and entertaining format. Among the careful selection of real situations reflected in the vignettes, several can be extrapolated to any other context of life, work or study, thus ensuring the representativeness and relevance of the scenes for any woman, not only in the field of geology. In addition, the different origins and cultural contexts of the chosen pioneers (Mateos and Ruiz Constán, 2021) provide an inclusive approach to the vignettes, making them interesting as a didactic resource in educational centers. The vignettes generate reflection, discussion and increase collective awareness of the gender problems we experience in the science of geology. You have an available QR code to access them.

Referencias

Mateos R.M. y Ruiz Constán A. (2021). *GEAS Mujeres que estudian la Tierra.* 41 pp. ISBN 978-84-09-30001-3

Presencia y evolución de geocientíficas en el área de Exploración y Producción de Repsol

Presence and evolution of female geoscientists in Repsol E&P division

I. García Saiz[1], V. Olgado Azpiazu[1]

1 Repsol Exploración. Méndez Álvaro 44, Madrid 28045. i.garcia.saiz@repsol.com, mvolgadoa@repsol.com

Palabras clave: Mujer, Empresa, Geocientífica, E&P, Liderazgo

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo analizar la participación actual de las mujeres geocientíficas en Repsol y su evolución en la historia reciente de la compañía. En concreto, este análisis se centra en la división de Exploración y Producción de Hidrocarburos (E&P) y también en el área de Soluciones Geológicas Bajas en Carbono (GLCS).

Para ello, se han recopilado y examinado datos cuantitativos de la última década, discretizándolos por área geográfica, rango de edad, categoría y rol profesional. El análisis muestra que en 2023 el porcentaje de mujeres en E&P y GLCS representó el 27,7 %, ligeramente inferior al 28,2 % registrado en 2018. Este porcentaje es uno de los menores de los distintos negocios de la compañía. Las posiciones abarcan desde intérpretes geofísicas, geomodeladoras, ingenieras de reservorio, geólogas especialistas y petrofísicas, hasta gestoras de proyectos, analistas de información y desarrollo de negocio, entre otras.

Además, se ha observado que la diferencia entre géneros es más acusada según aumenta la categoría profesional, disminuyendo la representación de mujeres hasta el 14,9%-16,7% en roles superiores de responsabilidad y liderazgo, y siendo nula en puestos de dirección ejecutiva.

Habiendo identificado una brecha de participación entre géneros en las áreas estudiadas, se han revisado las medidas implementadas por la compañía destinadas a incrementar e impulsar la presencia de mujeres en puestos de mayor nivel jerárquico. Asimismo, se ha extendido el análisis a las principales carreras geocientíficas para entender si existe una correlación entre los porcentajes anteriores y la distribución por género de los estudiantes.

Abstract

The objective of this study is to analyse the current participation of women geoscientists in Repsol and their evolution in the company's recent history. Specifically, this analysis focuses on the Hydrocarbon Exploration and Production (E&P) and Geological Low Carbon Solutions (GLCS) divisions.

To this end, quantitative data from the last decade have been collected and examined, discretizing them geographically, per age range, category, and professional role. The analysis shows that the percentage of women in E&P and GLCS represented 27.7% in 2023, slightly lower than the 28.2% recorded in 2018. This percentage is one of the lowest in the different businesses of company. The positions range from geophysical interpreters, geomodelers, reservoir engineers, specialist geologists and petrophysicists, to project managers, information, and business development analysts, among others.

Furthermore, it has been observed that the gender difference is more pronounced as the professional category increases, with the representation of women decreasing to 14.9% -16.7% in roles of superior responsibility and leadership, being inexistent for executive direction positions.

Having identified a gender gap in the areas studied, it has been carried out a revision of the measures implemented by the company aiming to increase and promote the presence of women in higher hierarchical level positions. Likewise, the analysis has been extended to the main geoscientific careers to understand if there is a correlation between the previous percentages and the gender distribution of the students.

Redibujando la historia: mujeres y geología en Latinoamérica.

Redrawing history: women and geology in Latin America

G. Olivenza[1], D. Ponce de León[2], F. Galea[3], M. Manrique[4], M. Vargas[5], M. Etcheverría[6], N. Pezzutti[6], M. Pita[7] y N. Roitberg[8]

1 Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos. C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.gracia.olivenza@asgmi.org
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ La Calera, 1. 28760 Tres Cantos, Madrid. d.poncedeleon@igme.es
3 Sociedad Venezolana de Geólogos. Qta. Mercedes, PB, La Carlota, Caracas, Distrito Capital, Venezuela. franciagalea@gmail.com
4 Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú (INGEMMET). Av. Canadá N° 1470 Lima, San Borja, Perú. mmanrique@ingemmet.gob.pe
5 Servicio Geológico Colombiano (SGC). Diagonal 53 N0. 34 - 53 Bogotá DC, Colombia. mvargasa@sgc.gov.co
6 Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Av. General Paz 5445 (colectora), Provincia de Buenos Aires, Argentina. mariela.etcheverria@segemar.gov.ar
7 Instituto de Geología y Paleontología de Cuba (IGP). Vía Blanca No. 1002, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba. drhumanos@igp.minem.cu
8 Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) Setor Bancário Norte - SBN Quadra 02, Bloco H Brasília, Brasil. nathalia.roitberg@cprm.gov.br

Palabras clave: geología, geología en Latinoamérica, mujeres en geología, mujeres en ciencias, mujeres en geociencias

Resumen

La geología apareció como campo de estudio en Latinoamérica durante los primeros tiempos tras la llegada de españoles y portugueses (Alonso, 2009). debido a su interés por los recursos geológicos, especialmente los minerales. (INGEMMET, 2021) (Rolleri, 1999)

Sin embargo, los primeros registros de la actividad profesional de las mujeres en el ámbito de la geología son del siglo XX. En un contexto en el que las mujeres tenían limitados los derechos políticos, económicos y sociales, el acceso de estas a la educación superior era poco común.

Esta comunicación pretende dar a conocer las contribuciones científicas y el papel fundamental de algunas de estas pioneras en el desarrollo de la geología en Latinoamérica.

Abstract

Geology emerged as a field of study in Latin America in the early days after the arrival of the Spanish and Portuguese (Alonso, 2009) due to their interest in geological resources, particularly minerals. (INGEMMET, 2021) (Rolleri, 1999)

However, the first records of women's professional activity in the field of geology date back to the 20th century. In a context where women's political, economic and social rights were limited, women's access to higher education was rare.

This communication aims to show the scientific contributions and fundamental role of some of these pioneering women in the development of geology in Latin America.

Referencias

Alonso, R.N. (2009). *Breve historia de la geología de América Latina*. Ed. Mundo Gráfico, Salta Editorial, 120 p.

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (2021). *169 años de historia e investigación, geológica, minera y metalúrgica en el Perú*. Ed. INGEMMET, 255 p.

Rolleri, E.O., Caballé, M.F. y Tessone, M.O. (1999). *Datos para una historia de la geología argentina.* Caminos, R. (Ed.): Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29 (1): 1-33. Buenos Aires.

¿Existe paridad en la participación y organización de actividades de divulgación geológica en España?

Is there parity in the participation and organization of geological outreach activities in Spain?

A. Ruiz-Constán[1,2], B. Martínez-García[2,3], A. Calonge[4], M. Chamizo-Borreguero[2], I. Pérez-Cáceres[2,5]

1 Instituto Geológico y Minero de España, Urbanización Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es
2 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
3 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
4 Universidad de Alcalá. Pza. San Diego s/n. 28801 Alcalá de Henares, Madrid. a.calonge@uah.es
5 Cámara Oficial Mineira de Galicia. Rua Juana Capdevielle 2 (Edificio Expocoruña), 15008 A Coruña. irepcaceres@gmail.com

Palabras clave: referentes femeninos, estereotipos de género, divulgación paritaria, liderazgo femenino

Resumen

La visibilización de geólogas como referentes es básico para que niñas y jóvenes se interesen por la geología y se planteen convertir esta ciencia en su futuro profesional. Uno de los formatos más útiles y cercanos para mostrar estos referentes son las actividades de divulgación. En el ámbito de las Ciencias de la Tierra, en los últimos 15 años se han desarrollado diversas iniciativas a nivel nacional que promueven el conocimiento de la geología y entre las que destacan: el *Geolodía* y las *Geocharlas*, coordinadas por la Sociedad Geológica de España; las *Olimpiadas de Geología*, coordinadas por la Asociación Española Para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra; y, *Apadrina una Roca*, coordinada por el Instituto Geológico y Minero de España. Para comprobar el grado de participación de las mujeres en dichas iniciativas, se han tenido en cuenta los diferentes roles existentes: organizadoras, coordinadoras, ponentes, monitoras, público o profesorado/estudiantado participante. Así, se ha observado una mayor implicación femenina en cuestiones relacionadas con la preparación, acompañamiento y gestión de los eventos, además de en el papel de ponentes y monitoras. Sin embargo, se constata una escasa representación de las geólogas en los aspectos de liderazgo, dirección o coordinación de las actividades, posiblemente como reflejo de los sesgos encontrados en el ámbito académico. Estos datos evidencian la necesidad de prestar especial atención a las dinámicas de funcionamiento de las actividades divulgativas para conseguir una plena incorporación e inclusión de las mujeres y las niñas en la ciencia.

Abstract

The visibility of female geologists as references is essential for girls and young people to become interested in geology and consider turning this science into their professional future. One of the most useful and accessible formats to show these references are outreach activities. In the field of Geosciences, in the last 15 years various initiatives that promote knowledge of geology have been developed at the national level and among which stand out: *Geoloday* and *Geocharlas*, coordinated by the Geological Society of Spain; *Geology Olympiad*, coordinated by the Spanish Association for Earth Sciences Teaching; and *Apadrina una Roca*, coordinated by the Geological and Mining Institute of Spain. To verify the degree of participation of women in these initiatives, the different existing roles have been taken into account: organizers, coordinators, speakers, monitors, public or participating teachers/students. Thus, greater female involvement has been observed in issues related to the preparation, support and management of events, in addition to the role of speakers and monitors. However, there is little representation of female geologists in aspects of leadership, direction or coordination of activities, possibly as a reflection of the biases found in the academic field. These data show the need to pay special attention to the dynamics of the functioning of dissemination activities to achieve full incorporation and inclusion of women and girls in science.

“Mujeres con los pies en la Tierra”, un espacio para científicas.

“Mujeres con los pies en la Tierra”, a space to women scientists.

D. Sanz-Pérez, [1,2], P. M. Carro-Rodríguez[1,2], A. Oliver[1,3], I. Menéndez[1,4], E. Cuesta[1,5], S. Gamboa[1,3], A. R. Gómez Cano[1,6], P. López-Guerrero[1]

1 Asociación Mujeres con los pies en la Tierra. C/ Jose Antonio Novais, 12, 28040 Madrid España. dasanz01@ucm.es, patcarro@ucm.es, adriana.oliver@uvigo.es, iris.menendez@mfn.berlin, elena.cuestaf@gmail.com, sara.gamboa@uvigo.es, argomezcano@gmail.com, palomalopez1981@gmail.com
2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid España.
3 Centro de Investigación Mariña. Universidad de Vigo. Grupo de Exoloxía Animal (GEA). MAPAS Lab. Edificio CITEXVI. Rúa Fonte das Abelleiras s/n, 36310, Vigo, España.
4 Museum für Naturkunde, Leibniz Institute for Evolution and Biodiversity Science, 43, 10115 Berlin, Alemania.
5 GeoBio Center, Ludwig Maximilian University of Munich, Richard-Wagner-Straße 10, 80333 München, Alemania.
6 Transmitting Science, Carrer Gardenia, 2 08784 Piera, Barcelona, España.

Palabras clave: didáctica, feminismo, investigación, mujer y ciencia, visibilización femenina.

Resumen

Existe un gran interés en los aspectos de la historia de la ciencia ligados a las investigaciones realizadas por mujeres (Menéndez et al., 2021). Ya sea por proporcionar una visión correcta sobre las mujeres científicas en el pasado o por proveer de roles a seguir para las futuras generaciones de científicas, se está detectando una gran demanda de actividades de divulgación sobre mujeres científicas.

Para debatir sobre las inquietudes de las científicas en el ámbito de las ciencias naturales, se creó en 2017 la asociación “Mujeres con los pies en la Tierra” (MPT), realizando actividades para visibilizar a las mujeres en este campo a través de materiales divulgativos y actividades de aprendizaje. Enfocándose en las paleontólogas, se han diseñado materiales (físicos y online) para implementar perspectiva de género en el aula. El juego de mesa “Científicas Reunidas” fomenta el conocimiento y despierta conciencias sobre los sesgos y la falta de conocimiento histórico sobre científicas. Igualmente, se ofrece formación sobre perspectiva de género para docentes a través de talleres, charlas o cursos para instituciones a todos los niveles. MPT se ha propuesto romper estereotipos y visibilizar a las mujeres que, desde siempre, han participado en el desarrollo científico.

Abstract

There is a growing interest in those aspects of the history of science linked to female scientists (Menéndez et al., 2021). Whether it is to provide a corrected vision of women scientists in the past or to provide roles to follow for future generations, a great demand for outreach activities on women scientists has being detected.

The society "Mujeres con los pies en la Tierra (MPT)" (Women with their feet on the Earth) was created in 2017, to provide a space for discussion women scientists’ concerns. To showcase women’s studies in natural sciences, MPT has created informative materials for learning activities. Emphasizing female paleontologists, materials physical and online, have been designed to implement a gender perspective in the classroom. The board game "Scientists Reunited" promotes knowledge and, raises awareness of the biases and historical gaps about women scientists. The society offers gender perspective training activities, workshops, lectures and courses for teachers at all levels. MPT has set out to break stereotypes and make visible the women who have always participated in scientific development.

Referencias

Menéndez, I., Gómez-Cano, A. R., Carro-Rodríguez, P. M., López-Guerrero, P., Oliver, A., Gamboa, S., Cuesta, E. y Sanz-Pérez, D. (2021). *Geotemas* 18, 678-680.

Salidas de campo en Geología y la menstruación. ¿Cómo afecta al estudiantado?

Geology field trips and menstruation: How does it affect the students?

D. Sanz-Pérez[1,2], A. Oliver[1,3], S. Gamboa[1,3,4], I. Menéndez[1,5], A.R. Gómez Cano[1,6], P.M. Carro-Rodríguez[1]

1 Asociación Mujeres con los pies en la Tierra. .C/ Jose Antonio Novais, 12, 28040 Madrid España. dasanz01@ucm.es, adriana.oliver@uvigo.es, saragamb@ucm.es, iris.menendez@mfn.berlin, argomezcano@gmail.com, patcarro@ucm.es
2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid España
3 MAPAS Lab; Centro de Investigación Mariña. Universidade de Vigo. 36310, Vigo, Spain.
4 Universidad Complutense. Avenida Seneca, 2, 28040, Madrid
5 Museum für Naturkunde, Leibniz Institute for Evolution and Biodiversity Science, 43, 10115 Berlin, Alemania.
6 Transmitting Science, Carrer Gardenia, 2 08784 Piera, Barcelona.

Palabras clave: mujer y geología, encuesta, Grado, Máster

Resumen

En los planes de estudios relacionados con Ciencias de la Tierra destaca la importancia de las salidas de campo en la formación del estudiantado. Sin embargo, en muchas ocasiones los itinerarios no están planificados para cubrir posibles necesidades vinculadas a la menstruación. Este trabajo se basa en una encuesta pionera entre docentes y estudiantes para analizar el impacto de estas salidas en el alumnado menstruante en la Fac. CC. Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (España). Los resultados de la encuesta mostraron que la mayoría de estudiantes menstruantes se preocupan por la percepción del resto respecto a su menstruación (olor o sangrado abundante). Además, algunas personas declararon tener problemas relacionados con la menstruación durante las salidas al campo, como dolor o incomodidad. También destacaron la escasez de paradas durante el día o el acceso a los aseos durante los trayectos de las salidas de campo, y la necesidad de que los botiquines incluyan compresas, tampones y otros productos de higiene. Entre las medidas que proponemos, en base a los resultados, está el establecimiento de pautas de actuación para las salidas de campo, ya que no hay protocolos oficiales sobre estas cuestiones a pesar de que afectan a gran parte del alumnado, con el fin de concienciar sobre este asunto. Los resultados obtenidos podrían estar representando un problema que afecta a otras facultades españolas; por ello, consideramos beneficioso trasladar esta encuesta a otros centros para favorecer la accesibilidad de todo el estudiantado y evitar que estas cuestiones puedan ser un problema a la hora de fomentar vocaciones en la disciplina de las Ciencias de la Tierra o el abandono de la misma.

Abstract

Field trips are an essential part of Earth Science education. However, trip itineraries often overlook considerations related to menstruation. This work is based on a pioneering survey among professors and students to analyze the impact of these field trips on menstruating students at the Faculty of Geological Sciences, Universidad Complutense de Madrid (Spain). Survey results revealed that most menstruating students are concerned about others' perceptions of their menstruation (smell or perceptible bleeding). In addition, some reported experiencing issues related to menstruation during field trips, such as pain or discomfort. They also highlighted the scarcity of breaks throughout the day, limited access to restrooms during field trip journeys, and the need for first aid kits to include menstruation sanitary products. Based on these findings, proposed measures include the establishment of guidelines for field trips, as there are no official protocols on these matters despite their significant impact on a large portion of the students. The obtained results may represent a problem affecting other Spanish faculties; therefore, we considered it beneficial to translate this survey to other institutions to enhance accessibility for all students and prevent these issues from hindering interest or retention in the discipline of Earth Sciences.

Representación de las geólogas y paleontólogas en los libros de divulgación

Representation of women geologists and paleontologists in popular science books

D. Sanz-Pérez[1,2] y A. M. Valenzuela-Toro[3,4]

1 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España. dasanz01@ucm.es
2 Asociación Mujeres con los pies en la Tierra, 28040 Madrid, España.
3 CIAHN Atacama, Corporación de Investigación y Avance de la Paleontología e Historia Natural de Atacama, Caldera, Región de Atacama, Chile. avalenzuela.toro@gmail.com
4 Department of Paleobiology, National Museum of Natural History, Smithsonian Institution, Washington DC, U.S.A.

Palabras clave: divulgación científica, geología, mujer y ciencia, referentes, visibilidad

Resumen

La ausencia de referentes femeninos repercute negativamente en las ambiciones científicas de las niñas. Los libros de divulgación se han convertido en una plataforma popular para presentar la historia de diversas científicas. Sin embargo, algunos de estos libros podrían carecer de matices y perpetuar estereotipos de exclusión relacionados con la disciplina científica o la nacionalidad y lengua nativa de las científicas. En este estudio, hemos revisado 13 libros de divulgación que recogen la biografía de múltiples científicas para evaluar cómo están representadas las geólogas y paleontólogas, así como las científicas hispanohablantes. En total se mencionan 194 científicas, cuyas materias de trabajo se han agrupado en 18 disciplinas. Medicina, biología, astronomía y matemáticas concentran el 50% de las científicas citadas. Se mencionan 14 geólogas y 3 paleontólogas, siendo Mary Anning la única que aparece en la mitad de los libros. La mitad de las geólogas recogidas pertenecen a un libro divulgativo dedicado exclusivamente a geólogas. También hemos detectado un sesgo relacionado con el país de origen de las científicas, 31,8% estadounidenses y 10,4% británicas. Únicamente se mencionan 11 científicas de habla hispana, 5 españolas y 6 de América Central y del Sur (Argentina, Chile, Colombia, Colombia, Costa Rica, México, Venezuela). Estos resultados evidencian la existencia de sesgos asociados a las disciplinas y nacionalidad de las científicas, enfatizando la importancia de ampliar los horizontes de los libros de divulgación para incluir un espectro más amplio de científicas.

Abstract

The absence of female role models undermines girls' ambitions to pursue a scientific career. Popular science books have become a popular platform for showcasing and celebrating the stories and groundbreaking contributions of women scientists. However, some of these books can lack nuance and, subconsciously, perpetuate exclusionary stereotypes related to the disciplines, country of origin, or the native language of women scientists. Here, we reviewed 13 popular science books featuring biographies of women scientists to evaluate how well geologists, paleontologists, and, more broadly, Spanish-speaking women scientists are represented. In total, 194 women scientists are listed, grouped into 18 disciplines. Medicine, biology, astronomy, and mathematics account for 50% of the women scientists cited. Fourteen geologists and three paleontologists are mentioned, Mary Anning being the only one who appears in half of the books. Half of all women geologists were listed in a single book dedicated exclusively to featuring women geologists. We also found a bias in the country of origin of the women scientists, 31.8% American and 10.4% British. Only 11 Spanish-speaking women scientists are mentioned, 5 Spanish and 6 from Central and South America (Argentina, Chile, Colombia, Colombia, Costa Rica, Mexico, and Venezuela). These results reveal the existence of overlooked biases in the disciplines, nationality, and language of women scientists featured in popular science books. They stress the need to include a wider spectrum of women scientists that ensures the emergence of more diverse role models.

Implicaciones de la brecha entre investigación y educación Secundaria. Perspectiva de género en los Proyectos de Excelencia.

Implications of the gap between research and secondary education. Gender perspective in Excellence Projects.

S. Torres-López[1]

1 Departamento de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. C/Francisco Tomás y Valiente, 7. 28049. Madrid. sara.torres@uam.es

Palabras clave: Brecha de género, educación secundaria, investigación, proyectos de excelencia.

Resumen

Se prevé que para el año 2030 el 85% de los trabajos en países desarrollados estén directamente relacionados con carreras STEM (Science, Tecnologhy, Engering and Maths). Sin embargo, desde los 2000 el porcentaje de estudiantes que han elegido una carrera STEM en España ha disminuido más de un 30%, situándonos por debajo de la media europea. Este dato es aún más acusado si nos referimos a mujeres. Esta realidad compromete la competencia e independencia científico-tecnológica de nuestra sociedad en los próximos años.

Los factores que influyen al elegir una carrera universitaria se dividen en tres grupos: extrínsecos (como los factores socioculturales), intrínsecos (como el autoconcepto y las expectativas) e interpersonales (como la demanda laboral o la historia familiar). Existe un gran desconocimiento entre el alumnado preuniversitario sobre la ciencia y su diversidad, limitando su capacidad de decisión sobre su futuro, expectativas e intereses personales. Esto genera un problema para entender retos sociales futuros y la realidad científico-tecnológica que nos rodea. Incluso en los bachilleratos donde existen programas específicos para que el alumnado se inicie en la investigación realizando actividades y proyectos en colaboración con personal investigador de las universidades (p.ej. BIE), encontramos un alumnado que no conoce la metodología ni la diversidad de los estudios científicos, y tiende a centrarse en proyectos fundamentalmente tecnológicos. El reto al que nos enfrentamos implica cambios estructurales que generen un vínculo estrecho entre la investigación y la docencia secundaria, para formar y dotar de herramientas al alumnado para poder conocer y entender los avances científicos y poder formar parte de ellos.

Abstract

It is predicted that by 2030, 85% of jobs in developed countries will be directly related to STEM (Science, Technology, Engineering and Maths) careers. However, since 2000 the percentage of students who have chosen a STEM career in Spain has decreased by more than 30%, placing us below the European average. This figure is even more pronounced if we refer to women. This reality compromises the scientific-technological competence and independence of our society in the coming years.

The factors that influence the choice of a university degree can be divided into three groups: extrinsic (such as sociocultural factors), intrinsic (such as self-concept and expectations) and interpersonal (such as labor demand or family history). There is a great lack of knowledge among pre-university students about science and its diversity, limiting their ability to make decisions about their future, expectations and personal interests. This generates a problem in understanding future social challenges and the scientific-technological reality that surrounds us. Even in high schools where there are specific programs to introduce students to research by carrying out activities and projects in collaboration with university research staff (e.g. BIE), we find students who do not know the methodology and diversity of scientific studies, and tend to focus on mainly technological projects. The challenge we face implies structural changes that generate a close link between research and secondary education, in order to train and provide students with the tools to know and understand scientific advances and to be able to be part of them.

Integración de la perspectiva de género en investigación: implicaciones y retos futuros.

Integration of the gender perspective in research: Implications and future challenges.

S. Torres-López[1], A. Serrano Mamolar[2] y S. Rodríguez Arribas[2]

1 Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias. Campus de Cantoblanco. Avda. Francisco Tomás y Valiente, 7. 28049 Madrid (España). sara.torres@uam.es
2 Dpto. De Ingeniería Informática, Universidad de Burgos, Escuela Politécnica Superior. Campus Vena. Avda. Cantabria s/n. 09006 Burgos (España). asmamolar@ubu.es; srarribas@ubu.es

Palabras clave: Perspectiva de género, investigación, STEM, Ciencia, mujer

Resumen

La productividad, eficacia y rendimiento científico disminuyen por el hecho de no tener en cuenta la variable género en su planificación, desarrollo, resultados e interpretación de estos, dando lugar a una pérdida de competencia y capacidad de avance en la ciencia. Podemos afirmar que las mujeres tienen 5 veces menos alcance a trabajos bien remunerados a causa de los sesgos de los algoritmos de los sistemas de selección.

Son muchos y muy diversos los factores que dan lugar a esta realidad. Acotándolos al campo científico destacan la falta de formación en perspectiva de género, falta de conocimiento sobre la problemática derivada en la ciencia y una ausencia significativa de herramientas (guías, protocolos, objetivos íntegros). Es importante señalar la falta de referentes femeninos en los grupos de investigación, de forma muy acusada en el campo STEM. Esto confronta con los ODS que incluye la agenda 2030, que señalan de forma específica la perspectiva de género, y exige la obligatoriedad desde 2020 de la inclusión de perspectiva de género en las propuestas. Por tanto, el reto urgente al que tenemos que hacer frente en el futuro, una vez que tenemos el marco legislativo y administrativo que incorpora la perspectiva de género, es trasladarlo a la investigación y a la docencia universitaria. En este trabajo se identifica la necesidad de realizar cambios estructurales que permitan formar y dotar de herramientas y metodologías a la comunidad investigadora para incluir la perspectiva de género de forma íntegra en la propia investigación y en la formación de futuros investigadores e investigadoras.

Abstract

Productivity, efficiency and scientific performance decrease due to the fact of not taking into account the gender variable in their planning, development, results and interpretation of these, resulting in a loss of competence and ability to advance in science. We can affirm that women have 5 times less access to well-paid jobs because of the biases of the algorithms of the selection systems.

There are many and very diverse factors that give rise to this reality. In the scientific field, they include the lack of training in gender perspective, lack of knowledge about the problems arising in science and a significant absence of tools (guidelines, protocols, complete objectives). It is important to point out the lack of female referents in research groups, especially in the STEM field. This confronts with the SDGs included in the 2030 agenda, which specifically point out the gender perspective, and require from 2020 the inclusion of gender perspective in the proposals. Therefore, the urgent challenge that we have to face in the future, once we have the legislative and administrative framework that incorporates the gender perspective, is to transfer it to research and university teaching. This work identifies the need for structural changes to train and provide the research community with tools and methodologies to include the gender perspective in an integral way in the research itself and in the training of future researchers.

El debate y el estudio de casos como detectores de sesgos de género en el aula. Un caso práctico en Geología

Discussion and case studies as detectors of gender bias in the classroom. A case study in Geology

S. Torres-López[1] y L. Trigos-Luque[1]

1 Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. Carretera de Colmenar viejo km 15. Ciudad Universitaria de Cantoblanco 28049 Madrid. sara.torres@uam.es

Palabras clave: perspectiva de género, sesgos de género, Debate, Estudios de Casos, STEM

Resumen

En este trabajo se presenta un ejemplo de como abordar la perspectiva de género en la docencia universitaria. El Estudio de Casos es una metodología activa muy utilizada en Medicina, Psicología y en Ciencias Sociales; sin embargo, no está tan extendida en otras disciplinas como la Geología, Matemáticas, Físicas, e Ingenierías. Es una técnica de investigación cualitativa que permite un aprendizaje autónomo y por descubrimiento del alumnado. Aquí se presenta como trabajar en el aula con el alumnado, a través de esta metodología y el uso del Debate, temas como: los estereotipos, sesgos, micromachismos, invisibilidades, autopercepción y autoconcepto, todos ellos aplicando una mirada de género. Planteando un caso de un tema de Geología y generando un debate sobre la propia actuación del alumnado en una actividad, lo que lleva a una reflexión sobre su propia percepción y autoconocimiento. Se presenta los resultados obtenidos en una clase de Geología de primero de CCAA y se aborda mejoras para su uso en distintas disciplinas.

Abstract

This paper presents an example of how to approach the gender perspective in university teaching. The Case Study is an active methodology widely used in Medicine, Psychology and Social Sciences; however, it is not so widespread in other disciplines such as Geology, Mathematics, Physics, and Engineering. It is a qualitative research technique that allows autonomous learning and discovery by students. Here it is presented how to work in the classroom with students, through this methodology and the use of Debate, topics such as: stereotypes, biases, micromachisms, invisibilities, self-perception and self-concept, all of them applying a gender perspective. By presenting a case of a Geology topic and generate a debate on the students' own performance in an activity, which leads to a reflection on their own perception and self-knowledge. The results obtained in a Geology class of the first year of CCAA are presented and improvements for their use in different disciplines are addressed.

Primeros resultados del estudio estratigráfico-sedimentológico de la transición Pleistoceno tardío-Holoceno en la laguna de TaguaTagua, Chile.

First results of the stratigraphic-sedimentological study of the Late Pleistocene-Holocene transition in the TaguaTagua Lake, Chile.

G. Aliaga-Aliaga[1], M. Frugone-Alvarez[2], T. Villaseñor-Jorquera[1], B. Valero-Garces[3].

1 Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O´Higgins 2820000 Rancagua, Chile. Guillermo.aliaga@postgrado.uoh.cl
2 Departamento de Química Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, 4030000 Concepción, Chile.
3 Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global, Instituto Pirenaico de Ecología, 50000 Zaragoza.

Palabras clave: TaguaTagua, Pleistoceno tardío-Holoceno, Estratigrafía.

Resumen

En este trabajo se presentan los primeros resultados de un nuevo estudio estratigráfico-sedimentológico de los depósitos lacustres del cuaternario en la antigua laguna de TaguaTagua (~34°S), en Chile. Cercanos al sitio de estudio se emplazan los sitios paleontológicos y arqueológicos TaguaTagua 1 (Labarca *et al*., 2020), TaguaTagua 2 (Núñez, 1994) y TaguaTagua 3 (Labarca *et al*., 2024). En este estudio se analiza la estratigrafía de 10 pozos de sondeo de 2 m de profundidad en promedio excavados en un área de 120 m x 150 m, cercana a los sitios TaguaTagua durante una prospección realizada en 2023.

Abstract

This paper presents the first results of a new stratigraphic-sedimentological study of quaternary lake deposits in the ancient TaguaTagua Lake (~34°S), Chile. The paleontological and archaeological sites TaguaTagua 1 (Labarca et al., 2020), TaguaTagua 2 (Núñez, 1994) and TaguaTagua 3 (Labarca et al., 2024) are located near the study site. This study analyzes the stratigraphy of 10 boreholes with an average depth of 2 m excavated in an area of 120 m x 150 m, near the TaguaTagua sites during a survey conducted in 2023.

Referencias

Labarca, R., González-Guarda, E., Lizama-Catalán, Á., Villavicencio, N. A., Alarcón-Muñoz, J., Suazo-Lara, F., Oyanadel-Urbina, P., Soto-Huenchuman, P., Salazar, C., Soto-Acuña, S., & Buldrini, K. E. (2020). Taguatagua 1: New insights into the late Pleistocene fauna, paleoenvironment, and human subsistence in a unique lacustrine context in central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 238.

Labarca, R.; Frugone-Álvarez, M.; Vilches, L.; Blanco, J.F.; Peñaloza, A.; Godoy-Aguirre, C.; Lizama Catalán, A.; Oyarzo, C.; Tornero. C.; González-Guarda, E.; Delgado, A.; Sepúlveda, M.; Soto-Huenchuman, P. (2024). TaguaTagua 3: a new late Pleistocene settlement in a highly suitable lacustrine habitat in central Chile (34°S*). PlosOne* (Accepted)

Nuñez, L., Varela, J., Casamiquela, R., Schiappacasse, V., Niemeyer, H., & Villagran, C. (1994). Cuenca de Taguatagua en Chile: El ambiente del Pleistoceno superior y ocupaciones humanas. *Revista Chilena de Historia Natural*, 67, 503-519.

Nuevas evidencias de minería aurífera antigua en la sierra de la Culebra (Zamora).

New evidences of ancient gold mining in the Sierra de la Culebra (Zamora).

R. Andrés-Bercianos[1] y J. Fernández-Lozano[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), c/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. r.andres@igme.es
2 Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24007 León. jferl@unileon.es

Palabras clave: minería aurífera antigua, estratigrafía, LiDAR, drones, sierra de la Culebra.

Resumen

El noroeste peninsular se caracteriza por la presencia de numerosos indicios de minería aurífera antigua, localizándose en la zona aurífera de Pino del Oro los principales restos estudiados en la provincia de Zamora (Sánchez-Palencia *et al.*, 2018). Sin embargo, recientemente se han descrito en la sierra de la Culebra otras labores (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2024), documentando en este trabajo nuevos vestigios situados junto a las localidades de Sarracín de Aliste y Villanueva de Valrojo. Para ello, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis del territorio, considerando aspectos geológicos y de la ingeniería minera, mediante el estudio estratigráfico, la fotointerpretación aérea y el uso de nuevas tecnologías. En estos sectores se constata la realización de pequeñas cortas, zanjones o zanjas-canal, con el objetivo de lavar los depósitos superficiales del piedemonte —llegando a alcanzar, incluso, el basamento paleozoico—. Estas labores mineras pudieron llevarse a cabo a partir del trazado de una red hidráulica que, en muchos casos, se abastece de la captación de los arroyos circundantes. Por tanto, se pone de manifiesto la importancia de documentar los restos y extrapolar esta línea de investigación a otros sectores de la sierra de la Culebra, contribuyendo a garantizar la preservación de todo el conjunto y a mejorar el conocimiento de los paisajes culturales asociados a la minería del oro en época antigua.

Abstract

The northwestern region of the Iberian Peninsula is known for its significant presence of historical gold mining remnants. The primary focus of study in the Zamora province has been on the remains discovered in the gold-rich area of Pino del Oro (Sánchez-Palencia et al. 2018). However, recent findings by Andrés-Bercianos and Fernández-Lozano (2024) have revealed other mining sites within the Sierra de la Culebra, shedding light on new vestiges situated near the villages of Sarracín de Aliste and Villanueva de Valrojo. To achieve this, a comprehensive analysis of the region has been conducted, taking into consideration geological and mining engineering factors. This analysis has involved stratigraphic research, aerial photo-interpretation, and the utilization of cutting-edge technologies. In these areas, evidence of open-cut mining, trenches, and trenches-channel has been confirmed, indicating the purpose of washing the piedmont deposits, even reaching the Paleozoic bedrock in some cases. These mining activities were made feasible through the development of a hydraulic network, often supplied by the diversion of nearby streams. Therefore, it is crucial to document these remnants and extend the research efforts to other regions within the Sierra de la Culebra. This initiative not only contributes to the preservation of the entire complex but also enhances our understanding of the cultural landscapes associated with ancient gold mining practices.

Referencias

Andrés-Bercianos, R. y Fernández-Lozano, J. (2024). En: *III Congreso de Historia de Zamora*. En prensa.
Sánchez-Palencia, F.J., Romero, D. y Beltrán, A. (2018). *Mélanges de la Casa de Velázquez* 48(1), 63-87.

Origen de las placas de arenisca en las ocupaciones magdalenienses en la cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias, España).

Source area of the sandstones slabs from the Magdalenian occupations in the Tito Bustillo cave (Ribadesella, Asturias, Spain).

I. Armenteros[1], P. Barba[1], S. Delgado-Raack[2], M. Cueto[2], J. Tapia[3], R. Cerezo-Fernández[4, 5], A. Martínez-Villa, E.[6] Alvarez-Fernández[4, 5]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca. ilde@usal.es, barba@usal.es
2 Dpto. Prehistòria, Facultat de Filosofia i Lletres, Universidad Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Cerdanyola del Vallès, Barcelona. selina.delgado@uab.cat, mariancuetor@gmail.com
3 Sociedad de Ciencias Aranzadi, 20014 San Sebastián.
4 GIR PREHUSAL, Dpto de Prehistoria, Hª Antigua y Arqueología, Universidad de Salamanca, 37002 Salamanca. rosanacerezo@usal.es; epanik@usal.es
5 Sociedad de Ciencias Aranzadi, 20014 San Sebastián. jtapia@aranzadi.eus
6 Centro Ecomuseo de la Fauna Glacial de Onís. abamiaarkeos@gmail.com

Palabras clave: Placas de arenisca, Tito Bustillo, Pleistoceno final, Magdaleniense, Prehistoria.

Resumen

La cueva de Tito Bustillo (Ribadesella (Asturias) está en la Formación Caliza de la Escalada (Pensilvánico). En el vestíbulo de acceso a la cueva (Área de Estancia), las estructuras documentadas (fosas, hogares, …) con restos de tipo biótico (huesos, conchas, ...) y abiótico (útiles líticos en sílex, placas de arenisca, ...), permiten reconstruir los modos de vida hace unos 17.000 años (Pleistoceno superior, Magdaleniense) (Álvarez-Fernández et al., 2022). Más de un centenar de placas de arenisca del yacimiento arqueológico fueron recogidas en las formaciones geológicas próximas como materia prima para la creación de artefactos (lámparas) y soportes en los que se preparaban pigmentos. Muchas de estas placas aparecen termoalteradas e intencionalmente grabadas con artefactos líticos, reconociéndose representaciones de animales (caballos, ciervas, etc.). Las características litológicas de las placas han permitido conocer su procedencia de la Formación Vega (Jurásico superior), situada en los acantilados actuales alejados en el periodo Magdaleniense unos 8/10 km de la línea de costa. (Esta investigación forma parte del proyecto PID2020-114462GB-I00, financiado por el MINECO, Gobierno de España.)

Abstract

Tito Bustillo cave (Ribadesella (Asturias) is in the Formación Caliza de la Escalada (Pensylvanian). In the cave's access vestibule (the "Área de Estancia"), different structures (pits, hearths, ...) with biotic (bones, shells, …) and abiotic (flint lithic tools, sandstone slabs, …) remains allow us to reconstruct the way of life about 17,000 years ago, (Upper Pleistocene, Magdalenian) (Álvarez-Fernández et al., 2022). Over a hundred sandstone slabs in the archaeological site were taken from nearby geological formations as raw material for the artefact creation (lamps) and supports in which pigments were prepared. Many of these slabs were thermoaltered and intentionally engraved with lithic artefacts, being the representations of animals (horses, red deers, etc.) recognized. The lithological characteristics of the plates have allowed us to know their origin from the Vega Formation (Upper Jurassic), located on the current cliffs during the Magdalenian period about 8/10 km away from the coastline. (This research is part of the project PID2020-114462GB-I00, funded by MINECO, Government of Spain.)

Referencias

Álvarez-Fernández, E., Tapia, J., Aguirre, A., Arias, P., Camarós, E., Cerezo, R., García, B., Martín, N., Martín, S., Peyroteo, R., Portero, R., Teira, L. y Cueto, M. (2022). En: *Descendiendo el río Sella. Una (re)visión de la Arqueología Prehistórica del valle del Sella (Asturias, España)* (J. Jordá Pardo *et al*., Eds.), *Entemu* XIX, 248-266.

Explotación histórica del hierro en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel (España).

Iron historical exploitation in the Courel Mountains UNESCO Global Geopark (Spain).

D. Ballesteros[1, 2], M. Fuertes-Fuente[1, 3], A. Cepedal[3], R. Vila[1, 4], X.C. Barros[1], I. Pérez-Cáceres[1, 5] y M. Alemparte[1, 6]

1 Xeoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel, 27320 Quiroga.
2 Dpto. Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria, 39005 Santander.
ballesterosd@unican.es
3 Dpto. Geología, Universidad de Oviedo, 33003 Oviedo.
4 Museo Xeolóxico de Quiroga, 27320 Quiroga.
5 Cámara Oficial Mineira de Galicia, 15008 A Coruña.
6 Grupo de Desenvolvemento Rural Ribeira Sacra-Courel, 27340 Bóveda.

Palabras clave: ferrería, geoparque, hierro, mineralización, minería.

Resumen

La explotación artesanal del hierro mediante talleres conocidos como *ferrerías* o *mazos* representó una de las principales actividades económicas en el NE de la Península Ibérica entre los siglos XVI y XIX, como es el caso del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel. El objetivo de este trabajo es inventariar esta industria artesanal en Geoparque, establecer su contexto geológico, caracterizar las principales mineralizaciones de hierro y establecer su origen. Para lograrlo, se inventariaron y analizaron las labores mineras y las *ferrerías* mediante un sistema de información geográfica, apoyado en trabajo de campo y consultas a la población local. A escala local, se levantó el plano de la mina de Paradela (Ferreirós de Abaixo) y se estudió su mineralización con microscopía óptica de luz transmitida y reflejada, y microscopia electrónica de barrido con microanálisis (EDS). Hasta la fecha, se han identificado más de 74 labores superficiales y subterráneas en el flanco normal del sinclinal de O Courel, en relación con pizarras, cuarcitas y mármoles del Ordovícico Superior. También se han identificado 15 ferrerías situadas a menos de 10 km de las explotaciones. La mina de Paradela (50 m de longitud) se excavó para explotar un cuerpo estratiforme, brechoide y mineralizado con goethita, sin rasgos sedimentarios claramente reconocibles como oolitos y/o pisolitos ferruginosos. Estas mineralizaciones se asemejan a los yacimientos tipo *ironstone* ordovícicos descritos en otras áreas del noroeste de España.

Abstract

The artisanal exploitation of iron through workshops known as *ferrerías* or *mazos* represented one of the main economic activities in the NW of the Iberian Peninsula between the 16th and 19th centuries, as is the case of the UNESCO Global Geopark Montañas do Courel. The aim of this work is to inventory this industry of the Geopark and to establish its geological context, to characterize the main iron mineralizations and to establish their origin. To achieve this, the mining works and ironworks were inventoried and analysed by means of a geographic information system, supported by fieldwork, bibliographic compilation and consultations with the local population. On a local scale, the Paradela mine (Ferreirós de Abaixo) was mapped and its mineralization was studied with transmitted and reflected light optical microscopy and electron microscopy (SEM-EDS). To date, >74 surface and subway workings have been identified on the normal flank of the O Courel syncline, in relation to the Upper Ordovician slates, quartzites and marbles. There are also 15 forges located at less than 10 km from the exploitations. The Paradela mine (50 m length) was excavated to exploit a stratiform body, brecciated and mineralized with goethite, without clearly recognizable sedimentary features such as ferruginosus oolites and/or pisolites. These mineralizations resemble Ordovician ironstone-type deposits described in other areas of northwestern Spain.

Cartografía y estratigrafía de la mina romana de As Borreas de Caldesiños (Ourense).

Cartography and stratigraphy of the roman mine of As Borreas de Caldesiños (Ourense).

V. Barrientos Rodríguez[1], R. Matías Rodríguez[2] y E. J. González Clavijo[3]

1 E.T.S. Caminos, Canales y Puertos. Campus Elviña 15071, A Coruña. victor.barrientos@udc.es
[2] SEDPGYM. matiasr.roberto@gmail.com
[3]SGE. eduardogclavijo@gmail.com

Palabras clave: minería romana, oro, estratigrafía, área madre, depósitos antrópicos.

Resumen

La mina romana de As Borreas de Caldesiños (Viana do Bolo, Ourense) es una explotación aurífera romanas de los siglos I y II. La erosión de los materiales variscos circundantes (pizarras, esquistos, cuarcitas y granitos de dos micas) aportó los sedimentos con oro que se depositaron durante el Mioceno. La actividad minera utilizando medios hidráulicos permitió la extracción del oro y generó un paisaje muy llamativo similar al de las Médulas de Carucedo (León). En este estudio se define el contacto entre los materiales paleozoicos y los sedimentos terciarios, así como se caracteriza la estratigrafía de los sedimentos para que permita explicar distintas dinámicas de flujo o de fases deposicionales. Por otro lado, se intenta identificar la procedencia de los materiales sedimentarios midiendo la dirección de imbricación de los cantos, con la dificultad de que estos sedimentos se encuentran basculados hacia el este por tectónica alpina. Estas medidas indican que los sedimentos fueron depositados por corrientes de agua provenientes del sur-suroeste. Así mismo, se cartografían los depósitos antrópico existentes en la parte inferior de la explotación, los cuales son los materiales expulsados a través de los canales de lavado de la mina y, por lo tanto, no están tectonizados y se depositan sobre terrazas fluviales del río Camba.

Abstract

The Roman mine of As Borreas de Caldesiños (Viana do Bolo, Ourense) is a Roman gold exploitation from the 1st and 2nd centuries. The erosion of the surrounding Variscan materials (slates, schists, quartzites and two-mica granites) provided the gold-bearing sediments deposited during the Miocene. Mining activity using hydraulic means allowed the extraction of gold and generated a very striking landscape similar to that of the Médulas de Carucedo (León). In this study, the boundary between Paleozoic materials and Tertiary sediments is defined, as well as the stratigraphy of the sediments is characterized to explain different flow dynamics or depositional phases. On the other hand, an attempt is made to identify the origin of the sedimentary materials by measuring the orientation of imbricated clasts, with the trouble that these sediments are tilted towards the east by alpine tectonics. These measurements indicate that the sediments were deposited by water currents coming from the south-southwest. Likewise, the existing anthropic deposits in the lower part of the exploitation are mapped, which are the materials expelled through the mine washing channels and, accordingly, they are not tectonized and are deposited over fluvial terraces of the river Camba.

La geología como elemento condicionante e integrador en un yacimiento arqueológico visigodo: 'Los Hitos' (Arisgotas, Toledo, España)

Geology as a conditioning and integrating element in a Visigothic archaeological site: 'Los Hitos' (Arisgotas, Toledo, Spain).

C. Camuñas[1], M.A. Perucha[1], M.A. Rodríguez-Pascua[1], I.M. Sánchez Ramos[2] y A. Díez-Herrero[1]

1 CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. c.camunas@igme.es, ma.perucha@igme.es, ma.rodriguez@igme.es, andres.diez@igme.es

2 Seminario de Arqueología. Facultad de Humanidades. Universidad Pablo de Olavide. 41013 Sevilla. imsanram@upo.es

Resumen: Los estudios geológicos realizados en yacimientos arqueológicos aportan una valiosa información que es de gran ayuda para confirmar o refutar las interpretaciones arqueológicas planteadas. El entorno geológico del yacimiento arqueológico de 'Los Hitos' se caracteriza por la presencia de materiales metamórficos, intruidos por rocas ígneas plutónicas, y de rocas sedimentarias detríticas que recubren parcialmente todos los anteriores, lo que proporciona en conjunto una alta variedad en la disponibilidad de materiales pétreos de construcción. El estudio de las posibilidades hidrogeológicas de estos materiales, sumado a la existencia de un pozo excavado en el yacimiento, puede dar respuesta a que la ubicación del asentamiento visigodo dependiera en gran medida de la facilidad de captación de agua subterránea que cubriera las necesidades de sus pobladores en cantidad y calidad suficientes. El estudio del registro paleohidrológico del yacimiento puede ayudar a comprender la posible interferencia de las comunidades humanas con las avenidas e inundaciones de los arroyos que circundan 'Los Hitos', y entender la funcionalidad del dique-mota meridional.

Palabras clave: yacimiento arqueológico, geología, agua subterránea, riesgos geológicos.

Abstract: *Geological studies carried out in archaeological sites provide valuable information that is of great help to confirm or refute the proposed archaeological interpretations. The geological environment is characterized by the presence of metamorphic materials, intruded by plutonic igneous rocks, and detrital sedimentary rocks that partially cover all of the above, which together provides a high variety in the availability of stone building materials. The study of the hydrogeological possibilities of the materials and the existence of a well excavated in the 'Los Hitos' site in the area may respond that the location of the Visigothic settlement depended heavily on the ease of groundwater collection to meet the needs of its inhabitants in sufficient quantity and quality. The study of the palaeohydrological record of the site can help to understand the possible interference of human communities with the flooding from the streams surrounding 'Los Hitos', and to understand the functionality of the southern dyke.*

Key words: *archaeological site, geology, groundwater, geological risks.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Desde hace décadas, el estudio de los yacimientos arqueológicos se realiza desde un punto de vista multi- e interdisciplinar, de tal manera que aparecen nuevas vías de investigación que aportan datos relevantes y dibujan enfoques diferentes para el desarrollo de futuros estudios.

Muchos de los procesos y fenómenos que controlan la dinámica terrestre no son lineales y continuos en su intensidad y frecuencia, sino que presentan eventos extremos de mayor magnitud y menor frecuencia, como terremotos, deslizamientos, colapsos, avenidas e inundaciones, que han podido interferir con las actividades humanas a lo largo de la Historia; e incluso haber condicionado la ubicación de los asentamientos, las vías de comunicación, las tipologías constructivas, la implementación de determinadas estructuras o elementos de protección (diques, contrafuertes…) y el abandono de todo o parte del asentamiento tras un desastre natural.

Por lo tanto, el estudio de los procesos geodinámicos activos en el entorno de yacimientos arqueológicos puede ser de notable interés para la interpretación arqueológica de los mismos y las aportaciones que los estudios geológicos pueden realizar a las investigaciones históricas en general y a los yacimientos arqueológicos en particular, son de gran ayuda para formular nuevas hipótesis causales, y para confirmar o refutar otras planteadas por equipos multidisciplinares.

Adicionalmente, el agua es un elemento esencial y resulta una condición indispensable para el emplazamiento, crecimiento y desarrollo de cualquier civilización a lo largo de la Historia. La búsqueda de agua, superficial o subterránea, en cantidad y calidad

suficientes para su aprovechamiento, es uno de los principales factores a resolver a la hora de decidir la ubicación de una población; y en el pasado ha condicionado la fundación, apogeo y declive de civilizaciones, culturas y asentamientos humanos.

MARCO GEOLÓGICO

El yacimiento visigodo de 'Los Hitos' se encuentra en la pedanía de Arisgotas, del municipio toledano de Orgaz y, desde un punto de vista geológico, en el Macizo Ibérico, concretamente en la Zona Centroibérica (Julivert et al., 1972), caracterizada por la presencia de materiales ordovícicos, discordantes sobre los conjuntos precámbricos; concretamente en el sector de los Montes de Toledo (Sierra de Los Yébenes), con sucesiones de materiales metamórficos carbonáticos y siliciclásticos de edades Cámbrico-Ordovícico (Figura 1).

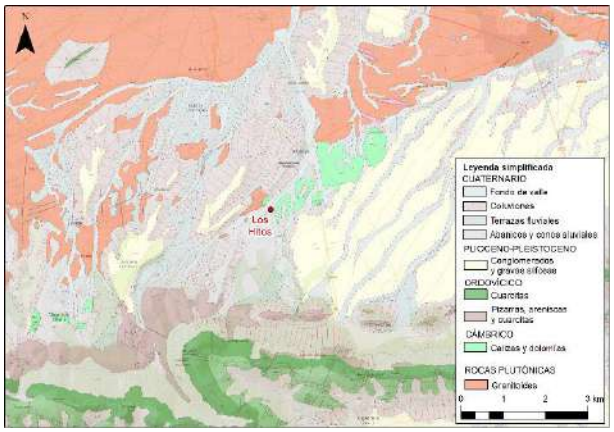


FIGURA 1. *Contexto geológico del yacimiento de 'Los Hitos' (Base geológica GEODE, Clariana García et al., 2020).*

Hacia el norte, estos conjuntos metamórficos son intruidos por rocas ígneas plutónicas de edad Carbonífero superior, que forman el batolito o plutón de Sonseca. Son rocas graníticas, de grano medio, porfídicas, con grandes cristales de feldespato, cuarzo y biotita, que destacan por su disyunción en bolos y por presentar un lajamiento por diaclasado subhorizontal. Más en detalle, al este y noreste del yacimiento de 'Los Hitos' afloran, de forma aislada, unas calizas del Cámbrico inferior, en contacto con las rocas plutónicas y, por lo tanto, con un metamorfismo de contacto provocado por la intrusión de esta masa granítica, que en ocasiones tiene más de 1 km (Andonaegui, 1992). Mantienen siempre un paralelismo y proximidad con las series cuarcíticas del Ordovícico inferior (Vázquez et al., 1991), que forman una serie de crestas alineadas con dirección E-O, constituidas por bancos cuarcíticos, más resistentes a la erosión que los materiales pizarrosos que los engloban. Producto de la erosión y tapizando el relieve se encuentran los materiales del Plioceno y Pleistoceno, constituidos por conglomerados y gravas silíceas con encostramientos y costras calizas locales, correspondientes al piedemonte de la Raña, y a los abanicos y conos aluviales (el yacimiento arqueológico se encuentra sobre este tipo de materiales). Por último, aparecen los fangos arenosos y gravas poligénicas de los fondos de valle holocenos.

HIDROGEOLOGÍA Y POZOS

Hidrológicamente, 'Los Hitos' pertenecen a la nueva masa de agua subterránea de 'Sonseca', de la Demarcación Hidrográfica del río Tajo, definida en el Plan Hidrológico 2022-2027. Las características hidrogeológicas de los materiales de la zona no son las más idóneas para definir acuíferos regionales de gran importancia.

Así, las calizas marmóreas, cuarcitas y pizarras de la Sierra de Los Yébenes, dada su propia naturaleza, están consideradas de baja permeabilidad. A las calizas cámbricas se les asigna una permeabilidad alta por fracturación y karstificación, pudiendo dar lugar a un acuífero libre, local y aislado.

Los granitos se caracterizan por tener una porosidad y permeabilidad primaria muy bajas lo que implica que no constituyen acuíferos con importantes volúmenes de agua almacenada y, por tanto, a escala regional están considerados como impermeables. Sin embargo, esta capacidad aumenta en función de la porosidad y permeabilidad secundarias, ya sea por fracturas o por procesos de alteración y meteorización. El lehm granítico, que se encuentra sobre las rocas ígneas como producto de alteración, debe su permeabilidad media a la porosidad intergranular (Sánchez Carretero et al., 2009) y, por lo tanto, se le puede atribuir la condición de acuífero de interés local. El espesor de estos materiales alterados y consecuentemente del acuífero, es muy variable, dependiendo de las características de la roca madre y de los procesos concretos que hayan actuado en la región, así como de la climatología, pero generalmente no es muy elevado.

Por último, los conglomerados, arenas, limos y arcillas, que abarcan desde el Plioceno a la actualidad (Holoceno), están dispuestos en abanicos aluviales, conos de deyección y mantos aluviales, ocupando las laderas, el piedemonte de las alineaciones montañosas, así como el contacto del granito y las calizas cámbricas (Figura 1). Se les atribuye una permeabilidad media a alta, debido a su porosidad intergranular, y estos niveles adquieren interés hidrogeológico, siempre en el ámbito local, dada su escasa extensión y potencia.

Pese a las condiciones hidrogeológicas poco favorables a nivel regional que imperan en la zona, a nivel local existe una gran cantidad de captaciones de agua en forma de pozos, en su mayoría de gran diámetro, variable entre 1,5 y 2,5 m, que alcanzan el nivel freático a una profundidad media inferior a 6 m. Por esta razón abundan los pozos excavados denominados 'de noria'.

El inventario de puntos de agua en la zona está constituido por 34 pozos que han sido la base del estudio hidrogeológico del yacimiento de 'Los Hitos' (Figura 2). Un total de 12 pozos se encuentran sobre el lehm granítico, otros 11 pozos alcanzan las calizas del Cámbrico y los 11 puntos de agua restantes, se disponen sobre los niveles cuaternarios, incluido el pozo excavado en el propio yacimiento.

Con la medida de la profundidad del nivel de agua en octubre de 2019 se ha elaborado un mapa de piezometría (Figura 2). El sentido del flujo subterráneo local es SO-NE, muy similar a la dirección que tiene el arroyo de Arisgotas en superficie, desde el yacimiento hasta el núcleo urbano, aunque en los pozos situados sobre materiales carbonatados del Cámbrico, el sentido del flujo subterráneo es SE-NO, apuntando hacia el contacto norte con la roca plutónica. No se aprecia una piezometría con grandes diferencias entre los pozos que captan agua de las calizas del Cámbrico frente a los pozos excavados en el lehm granítico, sino más bien que ambos acuíferos parecen estar interconectados por dicho arroyo.

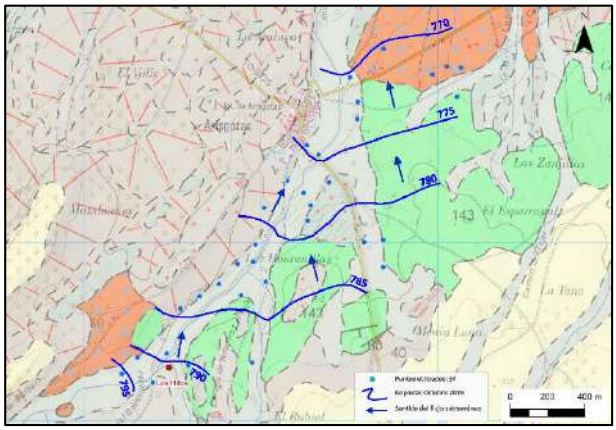


FIGURA 2. *Mapa de piezometría de octubre de 2019 (Base geológica GEODE, Clariana García et al., 2020).*

Las medidas de conductividad eléctrica y pH tomadas in situ en cada uno de los pozos, no arrojan grandes diferencias entre acuíferos, proporcionando, en ambos parámetros, valores ligeramente inferiores en el agua almacenada en calizas frente a los datos recogidos en los pozos excavados en granito.

De los resultados de los análisis hidroquímicos en laboratorio se deduce que tanto la muestra de agua granítica como la muestra del acuífero calizo, presentan una facies bicarbonatada cálcica, y según su pH son ligeramente básicas y con cierto contenido en sales. Concretamente, el agua del acuífero granítico es dura con una salinidad media y la correspondiente a las calizas del Cámbrico es moderadamente dura y poco salina.

DISPONIBILIDAD DE MATERIALES PÉTREOS DE CONSTRUCCIÓN EN EL ENTORNO

La diversidad litológica en las proximidades del yacimiento proporciona una alta variedad en la disponibilidad de materiales de construcción, para su empleo en diferentes elementos constructivos y para el uso de diferentes técnicas constructivas:

- Sillería, usando los diferentes tipos de granitoides, desde bolos graníticos y lanchares, como de la apertura de huecos de explotación en laderas de valles y vaguadas.
- Sillarejo, empleando tanto los granitoides como cuarcitas de bancos decimétricos a métricos de la Sierra de Los Yébenes.
- Mampostería, empleando fragmentos irregulares de granitoides, calizas, cuarzos, cuarcitas y lajas de pizarra, tanto de afloramientos como de los canchales y coluviones de la sierra.
- Tapial y adobe, empleando la tierra franca de los depósitos de abanicos aluviales cenozoicos del piedemonte, explotados en barreros.
- Emborrillados para pavimentos, con los cantos rodados de cuarcitas y pizarras de los depósitos aluviales.
- Transformados cerámicos (ladrillo y teja), a partir de las arcillas de la matriz de los conglomerados de los depósitos de los abanicos aluviales del piedemonte.
- Revocos, empleando las arenas del lehm granítico o la matriz de los depósitos de abanicos cenozoicos.
- Cales, empleando las calizas marmóreas cámbricas o caliches en abanicos aluviales cenozoicos.
- Almagres, pinturas y tintes, empleando los minerales (óxidos e hidróxidos de hierro) que aparecen impregnando las cuarcitas; o las arcillas de los abanicos aluviales de piedemonte.

PROCESOS FLUVIALES ACTIVOS Y RIESGO POR INUNDACIONES EN 'LOS HITOS'

El yacimiento de Los Hitos se ubica en el interfluvio próximo a la confluencia de los arroyos de Arisgotas y Sierra Gorda. En estas corrientes fluvio-torrenciales de los Montes de Toledo, son frecuentes los eventos extremos de avenidas súbitas por precipitaciones intensas, que producen desbordamiento de los cauces. Las estimaciones de caudales punta calculadas por métodos hidrometeorológicos de transformación lluvia-escorrentía, ofrecen para la cuenca del arroyo Guazalete aguas abajo de 'Los Hitos', unos caudales punta de 5,3, 9 y 16 m^3/s, para periodos de retorno de 25, 100 y 500 años, respectivamente.

Por lo tanto, para reconstruir la posible interferencia entre las inundaciones históricas y los asentamientos humanos en 'Los Hitos', sólo cabe recurrir a los métodos paleohidrológicos sobre el registro geológico-sedimentológico. La presencia en el sector meridional del yacimiento de una estructura artificial en la margen izquierda del arroyo de Sierra Gorda, con forma semilunar en planta (Figura 3), ha permitido hipotetizar que se trataba de un dique o mota para evitar el desbordamiento del arroyo hacia la orilla izquierda, y con ello evitar la inundación del asentamiento.

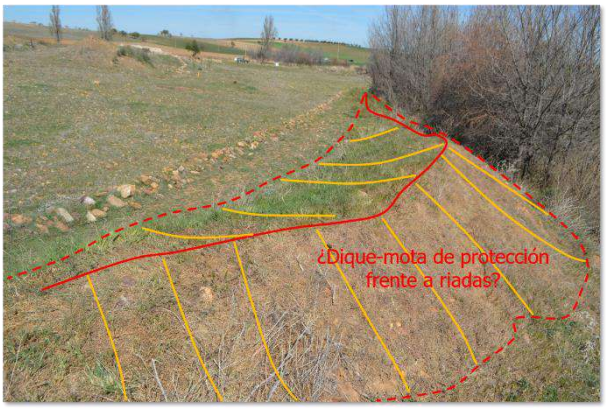


FIGURA 3. *Aspecto en campo del dique-mota visto desde el sur, a orillas del arroyo de Sierra Gorda.*

Se diseñó y realizó una calicata en el subsuelo del flanco interno del dique artificial, para caracterizar la secuencia sedimentaria del relleno y estudiar posibles depósitos de paleoinundaciones que fueran previos o posteriores a la construcción del dique, y así determinar su posible finalidad y eficacia.

De la columna sedimentológica levantada se determina que aparentemente no existen depósitos característicos de eventos de paleoinundaciones intercalados en la secuencia, lo que puede ser indicativo de que el dique se ha mostrado eficaz ante los desbordamientos; o bien que existieron inundaciones, pero sus restos han sido erosionados por posteriores eventos o por la acción antrópica.

EVIDENCIAS ARQUEOSISMOLÓGICAS DE TERREMOTOS PRETÉRITOS EN 'LOS HITOS'

Aunque la zona donde se ubican Los Hitos no es un área donde haya una sismicidad instrumental importante y donde no hay sismicidad histórica, se ha realizado un seguimiento arqueosismológico durante el proceso de excavación, ya que es cuando hay más información arqueosismológica disponible, que puede ser "destruida" durante el proceso de excavación. Este seguimiento siempre mejora la calidad de la observación y los datos tomados, en coordinación con la arqueología.

La metodología empleada se basa en una identificación de efectos arqueosismológicos de terremotos (EAEs, de su acrónimo en inglés: *Earthquake Archaeological Effects*) que se clasifican y posteriormente se analizan mediante técnicas de análisis estructural geológico para poder discriminar si la ruina se produjo por terremoto u otras causas (Rodríguez-Pascua et al., 2011; Giner-Robles et al., 2018).

En Los Hitos los principales EAEs esperables son los que afectan a las construcciones (Figura 4), pero hasta la fecha no se ha podido identificar ningún EAE que nos pueda llevar a pensar en una ruina y abandono de origen sísmico.



FIGURA 4. Yacimiento arqueológico de '*Los Hitos' en 2023.*

CONCLUSIONES

Geológicamente, el yacimiento de los Hitos se sitúa sobre conglomerados cuarcíticos superpuestos al contacto entre pizarras, cuarcitas, calizas y granitos. Y este entorno geológico ha condicionado los materiales de construcción disponibles, tanto las rocas primarias como sus derivados y transformados.

La existencia del pozo en el asentamiento de 'Los Hitos' implica el conocimiento que existía para la captación de agua subterránea y, por lo tanto, aumenta la probabilidad de que los habitantes se abastecieran de estas aguas, al encontrarse a una profundidad asequible de ser captada mediante los medios técnicos de la época. La futura excavación arqueológica del pozo, que está revestido en su interior por bloques de granito rudamente tallados, aclarará la litología que fue excavada para la captación de agua subterránea.

Aunque los métodos paleohidrológicos y arqueosismológicos aplicados hasta el momento al yacimiento de 'Los Hitos' no han podido corroborar la existencia de inundaciones ni terremotos históricos que hayan afectado a este asentamiento, la propia inexistencia de estas evidencias ya es un dato de interés arqueológico, al no poder atribuir a catástrofes naturales el abandono de los niveles de ocupación ni las tipologías constructivas; salvo el propio dique-mota, que sí que podría haber sido eficaz en la contención histórica de las riadas.

REFERENCIAS

Andonaegui, P. (1992): *Geoquímica y geocronología de los granitoides del sur de Toledo*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 365 p.

Clariana García, M.P., Rubio Pascual, F., Montes Santiago, M.J. y González Clavijo, E.J.: Mapa Geológico Digital continuo de España. Zona 1400. Centroibérica. GEODE. [Consulta 11/2020].

Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Silva, P.G., Pérez-López, R. (2018): Efectos sísmicos en yacimientos arqueológicos: catalogación y cuantificación arqueosismológica. *Boletín Geológico y Minero*, 129 (1/2), 451-467.

Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. y Nabais-Conde, L.E. (1972): *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares 1:1.000.00*. IGME, Madrid.

Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H., y Reicherter, K. (2011): A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International*, 242, 20-30.

Sánchez Carretero, R., Contreras López, E., Martín Parra, L.M., Martínez-Salanova, J., Gutiérrez Alonso, G., Barbero, L. y Villaseca, C. (2009): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 657 (Sonseca)*. IGME.

Vázquez, F., Moreno, F., García de Miguel, J.M., Ruiz, C. y Pérez-González, A. (1991): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 685 (Los Yébenes)*. IGME

Dinámica geoarqueológica en las vertientes de recintos amurallados: caso de estudio en el yacimiento arqueológico de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España).

Geoarchaeological dynamics on the slopes of walled enclosures: case study in the archaeological site of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, Spain).

M.T. De Tena[1], C. Pro[1], V. Mayoral [2] y J.M. Terrón[3]

1 Centro Universitario de Mérida, Universidad de Extremadura, Avda Santa Teresa de Jornet, 38, 06800, Mérida, Spain. mtdetena@unex.es cpro@unex.es
2 Instituto de Arqueología (CSIC-Junta de Extremadura), Plaza de España, 15, 06800, Mérida, Spain. vmayoral@iam.csic.es
3 Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), Instituto de Investigaciones Agrarias Finca La Orden-Valdesequera.

Resumen: En este trabajo se presenta el estudio llevado a cabo en el castro protohistórico de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España) con el fin de valorar los procesos dinámicos y de conservación en la vertiente oriental de este recinto. Es reconocible en la superficie de esta vertiente parte del tramo de la muralla construida con bloques de granito, aunque no es visible el sustrato sobre el que se edifica, siendo abundante los bloques deslizados a lo largo de ella.
A partir de las observaciones directas en campo y del estudio de tomografía eléctrica a través de diferentes perfiles que han alcanzado distintas profundidades, se ha podido precisar el límite de los niveles de depósitos que cubren la vertiente y el sustrato de pizarras sobre el que se edificó la muralla. En cuanto a la dinámica geoarqueológica, se ha determinado que esta vertiente ha estado afectada por procesos antrópicos y naturales, detectándose estructuras enterradas que indican sucesivas etapas de inestabilidad gravitacional.

Palabras clave: Dinámica geoarqueológica, tomografía eléctrica, Villasviejas del Tamuja.

Abstract: *This work presents the study carried out in the protohistoric fort of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, Spain) in order to assess the dynamic and conservation processes on the eastern slope of this enclosure. Part of the section of the wall built with granite blocks is recognizable on the surface of this slope, although the substrate on which it is built is not visible and the blocks slid along it are abundant.*
From direct observations in the field and the study of electrical tomography through different profiles, which have reached different depths, it has been possible to specify the limit of the levels of deposits that cover the slope and the slate substrate on which it is located. built the wall. Regarding geoarchaeological dynamics, it has been determined that this slope has been affected by anthropic and natural processes, detecting buried structures that indicate successive stages of gravitational instability.

Key words: *Geoarchaeological dynamics, electrical tomography, Villasviejas del Tamuja*

INTRODUCCIÓN

El yacimiento de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España), es un poblado fortificado que se localiza en el Suroeste de la península Ibérica y comprende dos recintos amurallados (Norte y Sur) con un total de unas 7 ha de superficie. Cuenta con una dilatada actividad de investigación que abarca trabajos de excavación en el interior de sus dos recintos amurallados (Hernández et al 1989), así como de prospección de su entorno (Hernández y Martín, 2017) y más recientemente se ha abierto una línea de investigación centrada en una lectura extensiva de la organización espacial interna del sitio (Mayoral Herrera (ed.), 2021) mediante la aplicación de métodos no destructivos. El recinto norte, objeto de estudio, se restringe a un recinto amurallado de unas 4 ha. El encajamiento y la pronunciada curva del río Tamuja ofrece en todo el costado Noroeste y Norte la protección natural de paredes verticales del sustrato natural de pizarras con desniveles de hasta entre 10 y 15 metros. A pesar de ello, todo este sector queda delimitado por una muralla de pizarra que se corresponde con la primera fase de ocupación del castro. En la vertiente oriental el sistema constructivo que se prolonga a todo el frente sur es un aparejo de bloques muy regulares de granito (sillarejo).

Pese a la gran envergadura de estas estructuras, la sedimentación de las ocupaciones del castro complica

mucho la identificación tanto de los niveles en los que apoya la muralla como de los arrastres y procesos subsiguientes al derrumbe parcial de la misma.

El objetivo del presente trabajo es abordar en detalle la dinámica de las vertientes, la configuración de su base geológica y una estimación de los depósitos que las recubren, a través del análisis en detalle de la vertiente oriental del recinto, mediante observaciones directas en campo combinadas con la aplicación de métodos no destructivos, en particular tomografía eléctrica.

MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se localiza en la provincia de Cáceres, a unos 25 km al Sureste de la capital y en el término municipal de Botija. Desde el punto de vista geológico, a escala regional el emplazamiento de Villasviejas se encuadra en la Zona Centroibérica del Macizo Ibérico donde las series del Precámbrico Superior-Cámbrico Inferior ocupan extensos afloramientos constituidas fundamentalmente por pizarras y grauvacas, denominadas Complejo Esquisto Grauváquico (CEG), y actualmente en el área de estudio Alogrupo Domo Extremeño (Fig. 1). Estas series están caracterizadas por un metamorfismo regional de bajo grado y se encuentran afectadas por diferentes fases de deformación acompañadas de plutonismo al que se liga el cercano batolito de Plasenzuela originado en la fase Varisca (Rodríguez Alonso, 2004; Pereira, 2018).

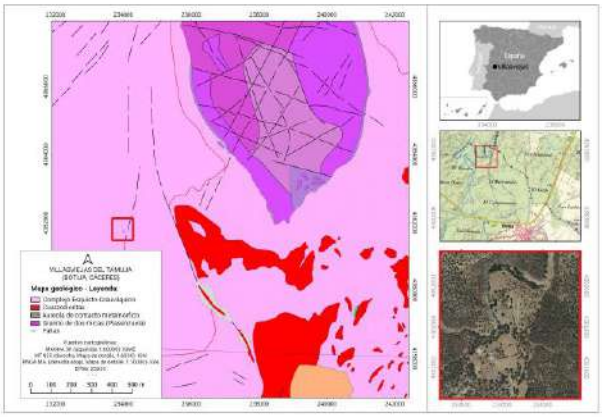


FIGURA 1. *Localización geológica del área de estudio.*

Geomorfológicamente está enclavada en la extensa penillanura trujillano- cacereña, desarrollada sobre los materiales del zócalo hercínico centroibérico, que está siendo degradada por la red hidrográfica actual, situándose el yacimiento de Villasviejas, en la cuenca del río Tamuja incluido en la red del Almonte, afluente del Tajo.

En un análisis más detallado del relieve del recinto Norte, puede verificarse una clara diferenciación entre las vertientes este y oeste que lo delimitan. Esta última presenta una topografía escarpada, conformada por pizarras con orientaciones que varían de norte a sur (verticalizadas a norte y más tendidas a sur), reconociéndose en algunos puntos la muralla edificada sobre esta base.

Por lo que respecta a la ladera oriental, se trata de una vertiente con una topografía menos abrupta y aterrazada. No se observan afloramientos del sustrato de pizarras, y los recubrimientos de derrubios tapizan la superficie con importantes acumulaciones en la base. En esta ladera es reconocible en superficie parte del tramo de la muralla construida con bloques de granito, y son abundantes los bloques deslizados a lo largo de ella como consecuencia del desplome de grandes tramos del lienzo que abrían activados procesos de inestabilidad y erosivos. La generación de una extensa trama de parcelas agrícolas habría modificado fuertemente la topografía de esta vertiente.

METODOLOGÍA

La metodología ha consistido, por un lado, en el reconocimiento en campo los materiales aflorantes del área de estudio y el examen de las características de los depósitos que cubre la vertiente. De manera indirecta se ha recurrido a la tomografía eléctrica adecuada en la exploración geoarqueológica (Rey et al, 2010; Teixidó et al, 2013), al proporcionar información de las discontinuidades del subsuelo e identificar el sustrato litológico. Se realizaron tres perfiles en el primer tramo del arroyo y ladera, para estimar la potencia del depósito e interpretar la disposición de los niveles que pudieran establecerse, cuyas principales características se muestran en la Tabla 1. El equipo empleado fue un ABEM Terrameter LS, realizándose el procesado de los datos con el programa de inversión Res2dinv de Geotomo Software. En los tres perfiles realizados, se han empleado dos cables con 21 electrodos cada uno, adquiriendo los datos mediante la configuración “multi gradient array”. Todos los perfiles han sido georreferenciados mediante observaciones GPS con correcciones RTK procedentes de la Red Extremeña de Posicionamiento. El Sistema de Proyección empleado ha sido el UTM Huso 29N, datum ETRS 89.

	Distancia entre electrodos (m)	Longitud (m)	Profundidad (m)
P1	1	40	8
P2	0.5	20	4
P3	1	40	8

TABLA I. *Descripción de los perfiles de tomografía eléctrica.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras el reconocimiento en campo no se observa el afloramiento del sustrato de pizarra en el área de estudio, pero sí abundan los bloques de granito deslizados, que claramente se corresponden con el desplome de la muralla edificada en su parte superior.

Toda la ladera se halla cubierta de depósitos de derrubios que en parte la ha soterrado. Estos depósitos de ladera se componen de limos y arenas con algunos cantos de pizarras y material cerámico arrastrados de niveles superiores desmantelados (Figura 2 (a)). La base de la ladera está intensamente antropizada, localizándose cercas de piedras cercanas al cauce y a media ladera que han actuado como diques de contención creándose pequeñas terrazas con considerables acumulaciones de derrubios (Figura 2 (b)).

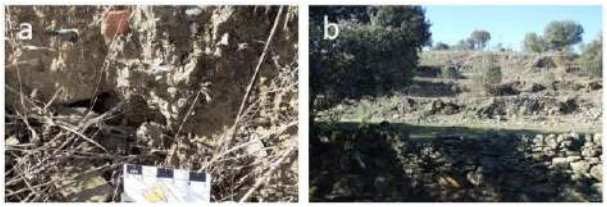


FIGURA 2. *Depósitos de ladera (a). Cercas de piedras edificadas a lo largo de la ladera delimitando pequeños huertos (b).*

En cuanto a los perfiles de tomografía eléctrica llevados a cabo, se ha obtenido la distribución de la resistividad para cada uno de ellos con un error inferior al 2%. En la Figura 3 se muestra la distribución de resistividad para cada perfil empleando una escala común, con el fin de analizar y comparar no sólo las principales anomalías, sino también los distintos niveles que configuran la vertiente.

En los tres perfiles, se identifica un primer nivel con resistividades entre 600 y 700 Ωm que se interpreta como derrubios de ladera en el que pueden distinguirse diferentes elementos constructivos que se corresponden con las anomalías obtenidas. Por debajo de este nivel se ha identificado el sustrato de pizarras a diferentes profundidades y con valores de resistividad en torno a los 340 Ωm, los mismos que los obtenidos en los perfiles realizados en el interior del recinto en anteriores campañas de estudio (Mayoral et al., 2019; de Tena, 2020; Pro et al., 2020).

En particular, en el perfil P1 puede observarse en el primer nivel diferentes anomalías, probablemente correspondientes a una construcción/cerca que ha podido quedar recubierta por la acumulación de materiales de laderas, poniendo de manifiesto la importante dinámica reciente en esta vertiente. Los diferentes valores de resistividad de las anomalías detectadas en él (A1, A2, A3 y A4), coincidirían con los distintos estados de alteración de los tramos sepultados. La potencia d este nivel es de 2.5 m y estaría separado del nivel inferior, correspondiente al sustrato de pizarras, por una superficie neta y aplanada, bien preparada.

En el perfil P2, el nivel de depósitos engloba la anomalía B1, localizada entre 4 m y 8 m desde el origen del perfil, presentando unos valores de resistividad muy elevados atribuibles a un importante derrumbe de bloques pertenecientes a la muralla y cercano torreón. La anomalía (B2), entre los 12 m y 14 m se correspondería con un elemento constructivo coincidente con el localizado en el perfil P1. Bajo esta estructura se encuentra el sustrato de pizarras.

En cuanto al perfil P3, el primer nivel presenta un espesor variable con un máximo de 3 m, correspondiendo la parte inicial a depósitos de ladera y a aluviales en su parte inferior. En la parte inferior del perfil el aluvial presenta espesores de alrededor del metro.

Por lo que se refiere a las anomalías presentes en este nivel, los valores de resistividad obtenidos se corresponden con bloques graníticos. La primera de ella localizada entre los 4 y 8 m (C1), se interpreta como restos de una estructura muraria situada a una cota coincidente con la del lienzo próximo visible y por tanto podría verificarse la continuidad de esta estructura que contaría con una anchura de 4 m. A partir de los 12 metros desde el origen del perfil, las diferentes anomalías determinadas corresponderían a bloques graníticos basculados laderas abajo provenientes de la zona de coronación. Por debajo de este nivel aparece el sustrato de pizarras.

Tras estos resultados se puede establecer no solo la estructura geológica de la ladera a partir de las diferentes capas geoeléctricas, sino también inferir acerca de cómo ha evolucionado en el tiempo. Está caracterizada por ausencia de afloramientos del sustrato pizarroso, dominando un manto de derrubios, encontrándose dicho sustrato a 3 m de profundidad. En su posterior evolución y dinámica han actuado procesos tanto naturales como antrópicos. La influencia de la mano del hombre en este espacio ha tenido un control decisivo en la topografía actual. Las cercas para cultivos construidas en la ladera han actuado como diques, favoreciendo la retención de sedimentos. La potente capa de derrubios que recubren la ladera es indicadora de la dinámica a la que ha estado sometida y en la que se han visto implicadas construcciones a tenor de los bloques de materiales detectados englobados en estos depósitos.

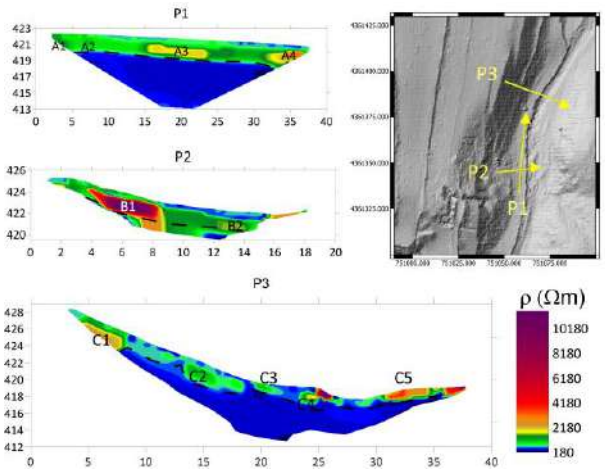


FIGURA 3. *Distribución de la resistividad y localización de los perfiles P1, P2 y P3.*

CONCLUSIONES

La metodología seguida en este trabajo combinando la exploración directa en campo y la prospección geofísica (tomografía), ha permitido caracterizar la configuración actual de las laderas del recinto del castro, y avanzar en la comprensión de cómo han evolucionado a través del tiempo.

Los perfiles de tomografía eléctrica han mostrado la configuración geológica-arqueológica de estas últimas, permitiendo identificar el sustrato geológico, una serie de elementos arqueológicos y los niveles de depósitos que los cubren.

A partir de este estudio se ha podido determinar que la muralla se apoya directamente sobre el sustrato de pizarras, identificado en la anomalía C1 del perfil 3 (aunque dicha anomalía no esté registrada por completo). Asimismo, han podido identificarse diferentes fases de actuación de procesos gravitatorios y acciones erosivas tras localizar bloques derrumbados de la muralla con diferentes potencias de recubrimiento.

A tenor de los resultados, se constata cómo la construcción de la muralla habría estado sometida a una notable inestabilidad, en la que habrían actuado desprendimientos, deslizamientos y procesos de arrastre de materiales, complicando su perdurabilidad. Este conocimiento obtenido pone de manifiesto la complejidad, y, sobre todo, la fragilidad de un espacio sometido a la acción de la escorrentía. De este modo, la conservación a largo plazo de los elementos arqueológicos (muralla y la secuencia constructiva que se ha ido apoyando sobre ella) está comprometida si no se toman medidas de conservación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo económico de los siguientes proyectos de investigación: “Investigación y valorización social del patrimonio arqueológico de la Segunda Edad del Hierro en Extremadura mediante el uso de TIC y métodos no invasivos” (Ref. PRI IB20124), financiado por el Consorcio Regional Junta de Extremadura, y “Las raíces de los fenómenos urbanos en el suroeste de la Península Ibérica. Caracterización de los asentamientos de la Edad del Hierro mediante métodos no invasivos (ref. PID2019-104611GB), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España. También queremos expresar nuestro agradecimiento al ayuntamiento de Botija (Cáceres) por su apoyo para el desarrollo de nuestra investigación.

REFERENCIAS

Hernández Hernández, F.; Rodríguez López, M. D. y Sánchez Sánchez, M. A. (1989): Excavaciones en el Castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). Dirección General de Patrimonio Cultural, Editora Regional de Extremadura. Mérida.

Hernández Hernández, F., Galán Domingo, E., Martín Bravo, A.M. (2009): A la vista de las murallas: análisis arqueológico del entorno del castro prerromano de Villasviejas del Tamuja (Cáceres). *Complutum* 20 (1), 109–132.

De Tena, M. T., Pro, C., Charro, C., Salgado, J. A., Mayoral, V. (2020): Geological characterisation of the settlement of Villasviejas del Tamuja (Cáceres, Spain). *Quaternary International* Volumen 566-567 91-97, https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.024

Mayoral, V.; Charro, C.; Salgado, J.A.; Pro, C.; de Tena, M.T.; Chapa, T.; Vallés, J.; Terrón, J.M; Quirós, E. (2019): Radiography of an Iron Age hillfort: Non-invasive archaeology in the settlement of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). *Trabajos de Prehistoria*, 76, 302–322, doi:10.3989/tp.2019.12239.

Mayoral, V. (Ed.) (2021): Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). *Desvelamiento del paisaje urbano de un Castro de la Edad del Hierro*. Mytra 9, Mérida, Spain,

Pro, C.; B. Caldeira, M. T. de Tena, C. Charro, R. J. Oliveira, J. F. Borges and V. Mayoral. (2020): Exploring the Consistency of Data Collected in Archaeological Geophysics: A Case Study from the Iron Age Hillfort of Villasviejas del Tamuja (Extremadura, Spain). *Remote Sensing*, 12, 1989. doi:10.3390/rs12121989.

Pereira, J. M., Castro, A., Fernández, C., Rodríguez, C. (2018): Multiple Paleozoic magmaticorogenic events in the Central Extremadura batholith (Iberian Variscan belt, Spain). *Journal of Iberian Geology*, 1-27. https://doi.org/10.1007/s41513-018-0063-5

Rey, J., Martínez, J., Dueñas, J, Campos, D., Arias, F. y Benavente, J. (2010): Electrical tomography applied to the survey of the archaeological site of Cástulo (Linares, Jaén). Preliminary results. *Geogaceta*, 48.

Rodríguez Alonso, M.D., Díez Balda, M.A., Perejón, A., Pieren, A., Liñán, E., López Díaz, F., Moreno, F., Gámez Vintaned, J.A., González Lodeiro, F., Martínez Poyatos, D., Vegas, R. (2004): Dominio del Complejo esquisto-grauváquico. Estratigrafía. La secuencia litoestratigráfica del Neoproterozoico–Cámbrico inferior. En: Vera, J.A. (Ed.), *Geología de España*. Sociedad Geológica de España — Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 78–81.

Teixidó, T., Artigot, E.G., Peña, J.A., Molina, F., Nájera, T., Carrión, F. (2013): Geoarchaeological context of the motilla de la Vega site (Spain) based on electrical resistivity tomography. *Archaeol. Prospect*. 20 (1), 11–22. https://doi.org/0.1002/arp.14

De (geo)arqueología y (arqueo)magnetismo. Una propuesta para la estandarización del trabajo conjunto.

On (geo)archaeology and (archaeo)magnetism. A standard joint workflow proposal.

J. del Río[1]

1 Departamento de Historia, Geografía y Comunicación – Área de Prehistoria. Edificio I+D+i, Universidad de Burgos. Pza. Misael Bañuelos s/n, 09001, Burgos. jdelrio@ubu.es

Palabras clave: arqueomagnetismo, geoarqueología, técnicas de campo, interdisciplinariedad, metodología

Resumen

El arqueomagnetismo se sitúa a caballo entre la arqueología y la geofísica, valiéndose de materiales arqueológicos que han alcanzado altas temperaturas para indagar en las características del campo magnético terrestre en épocas pasadas. Sin embargo, no está considerado parte de la gran familia de la geoarqueología —como demuestra la separación de las sesiones durante el propio CGE—. Aunque existen algunos trabajos que defienden la necesidad de la retroalimentación entre ambas disciplinas (Gallet *et al.*, 2009; Gómez-Paccard *et al.*, 2016), considero necesario recuperar la crítica de Goldberg (2008), que propone, en su caso, que la interacción entre la arqueología y la micromorfología debe aspirar a más, y trasladarla a mi propio campo. Argumento que los procesos de trabajo de ambas disciplinas (geoarqueología y arqueomagnetismo) deben ser repensados conjuntamente y sistematizados desde las primeras fases de intervención. Algunas medidas consisten en promover un mayor conocimiento sobre los métodos ajenos, la sistematización del proceso de documentación y la unificación de los datos obtenidos. Esta simbiosis metodológica permite integrar las necesidades de todos los agentes implicados y construir un conocimiento conjunto desde la base.

Abstract

Archaeomagnetism lays at the crossroads between archaeology and geophysics, using heated artefacts to obtain information about the Earth's magnetic field in the past. However, it is not traditionally considered a geoarchaeological technique. Although some previous works highlight the need to nurture the collaboration between both fields (Gallet *et al.*, 2009; Gómez-Paccard *et al.*, 2016), Goldberg's plea for better standards (2008), in his case concerning the interaction between archaeology and micromorphology, can also be applied in this case. I argue that the workflow in both disciplines (geoarchaeology and archaeomagnetism) should be unified and defined collaboratively from the first stages of planning. Some actions to tackle this are the sharing of knowledge about processes and methods, shared documentation standards, and shared data. This methodological symbiosis allows everybody's needs to be taken into account, and produces real collaborative knowledge.

Referencias

Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., Warme, N., Gran-Aymerich, J., & Lefevre, A. (2009). On the use of archeology in geomagnetism, and vice-versa: recent developments in archeomagnetism. *Comptes Rendus Physique* 10 (7), 630-648.

Goldberg, P. (2008). Raising the bar. *Archaeological concepts for the study of the cultural past*, 24-39.

Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F. J., & Carrancho, Á. (2016). Arqueomagnetismo: aplicación al estudio del campo magnético de la Tierra y a la caracterización de yacimientos arqueológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24 (3), 294-294.

Materias primas de las industrias líticas en la ocupación mesolítica del Abric del Xicotó (Alòs de Balaguer, Lleida).

Raw materials of the lithic industries in the Mesolithic occupation of Abric del Xicotó (Alòs de Balaguer, Lleida).

C. Emens[1, 2 *], M. Sánchez de la Torre[1, 2], X. Mangado[1, 2], C.B. González-Olivares[1, 2] y G. Alías[3, 2]

1 Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (SERP), Universitat de Barcelona 08001 Barcelona.
2 Institut d'Arqueologia de la Universitat de Barcelona (IAUB), 08001 Barcelona.
3 Dpto. Geoquímica, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona 08028 Barcelona.
* emens@ub.edu

Resumen: En Prehistoria, el estudio de las materias primas líticas y más concretamente sobre el sílex, constituye desde hace décadas una importante vía para la comprensión de la movilidad y la economía de las comunidades pasadas. Sin embargo, los estudios centrados en el análisis de materias líticas distintas al sílex han recibido por lo general escasa atención en la investigación prehistórica, creando así una brecha en el conocimiento sobre la caracterización y captación de estas litologías y el uso de las mismas, presumiéndose mayoritariamente una procedencia local. En este trabajo se presentan los primeros resultados del estudio de materiales líticos distintos al sílex recuperados en el nivel mesolítico datado en el X y IX milenio cal BP del Abric del Xicotó (Alòs de Balaguer, Lleida), situado en las Sierras Marginales Catalanas, así como una primera valoración sobre la posible procedencia de estos materiales en base a su comparación con muestras geológicas recuperadas en las terrazas fósiles próximas al yacimiento del río Segre. A través del estudio petrológico comparativo de artefactos arqueológicos y de muestras geológicas recuperadas en dichos depósitos fluviales, ahondaremos en las estrategias de aprovisionamiento y gestión de los recursos líticos de las sociedades cazadoras-recolectoras del Holoceno en la cuenca media del río Segre y proporcionaremos datos sobre la localidad litológica de las industrias mesolíticas analizadas.

Palabras clave: Petrología, Rocas Metamórficas, Abric del Xicotó, industria lítica, Holoceno

Abstract: *In Prehistory, the study of lithic raw materials, specifically flint, has been an important avenue for understanding the mobility and economy of past communities for decades. However, studies focused on the analysis of lithic materials other than flint have generally received scant attention in prehistoric research, thus creating a gap in knowledge regarding the characterization and acquisition of these lithologies, with a presumption of mostly local origin. This paper presents the initial results of the study of lithic materials other than flint recovered from the Mesolithic level dated to the X and IX millennia cal BP at the Abric del Xicotó (Alòs de Balaguer, NE of Iberia), located in the Sierras Marginales Catalanas. It also provides an initial assessment of the possible origin of these materials based on their comparison with geological samples recovered from fossil terraces of the Segre river near the site. Through comparative petrological study of archaeological artifacts and geological samples recovered from these fluvial deposits, we will delve into the catchment and management strategies of lithic resources by hunter-gatherer societies during the Holocene in the middle basin of the Segre river, providing data on the lithological locality of the analysed Mesolithic industries.*

Key words: *Petrology, Metamorphic rocks, Abric del Xicotó, Lithics, Holocene*

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos ancestrales, los humanos se han servido de los recursos naturales líticos para cubrir sus necesidades de supervivencia y culturales. En este sentido, los recursos abióticos tienen una gran importancia, especialmente en períodos pleistocénicos y de inicios del Holoceno. Los estudios sobre geoquímica de sílex demuestran la movilidad de estas materias primas a media y larga distancia durante el Paleolítico superior (Eixea et al., 2023). En contraste, se presume que, con la llegada del Holoceno, las comunidades humanas hayan adaptado sus estrategias de captación y uso de materias abióticas a un ámbito más local. Estas características ligadas al sílex, junto con su gran presencia a nivel numérico en los yacimientos prehistóricos han causado, por un lado, un gran foco en el estudio del sílex, y por el otro, la infrarrepresentación del resto del conjunto lítico (Prieto et al., 2022).

Por esta razón, se pretende realizar un estudio de las materias primas líticas –exceptuando el sílex– recuperadas en el yacimiento arqueológico del Abric del Xicotó (Alòs de Balaguer, Lleida) en el que se han documentado ocupaciones humanas holocénicas correspondientes culturalmente al Mesolítico de Muescas y Denticulados, denominado así por las características de sus útiles líticos que se basan en la configuración de denticulación y de muescas producto del retoque simple en sus lotes industriales, y datado en el X milenio cal BP (Sánchez de la Torre et al., 2022).

La caracterización del utillaje de las ocupaciones mesolíticas del Abric del Xicotó se ha completado con una caracterización litológica de los depósitos fluviales presentes en las inmediaciones del yacimiento, para poder de este modo relacionar las litologías que ofrecen los depósitos.

La conservación de las terrazas fósiles a lo largo del curso del Segre es dispar, las más antiguas se preservan en la cuenca alta del valle, correspondiéndose a la comarca de la Cerdanya, mientras que a partir del curso medio se conservan las más actuales. Estudios geomorfológicos previos han propuesto la existencia de entre siete y nueve terrazas que se corresponden, en su mayoría, al encajamiento del río debido al retroceso marino en estadios glaciares y a la elevación de estructuras geológicas (Stange et al., 2013).

Considerando la naturaleza geológica de los Pirineos, los depósitos aluviales del río Segre ofrecen gran variedad litológica producto del transporte fluvial, configurando así un enclave atractivo para explotar sus recursos abióticos en época prehistórica. Por otro lado, los registros arqueológicos evidencian una ocupación de las inmediaciones del río Segre en los Pirineos, desde, por lo menos, el Paleolítico Medio, que indican su potencial como nicho ecológico para las comunidades humanas a lo largo de toda la Prehistoria (Emens, 2022).

Partiendo de estos datos, el estudio del contenido litológico de estos depósitos fluviales y su contextualización geográfica y cronológica en relación con las sociedades superopaleolíticas, como elemento socioeconómico y cultural resulta esencial. Por este motivo se realizaron prospecciones y muestreos en las terrazas sub-actuales y fósiles del curso medio del río.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Abric del Xicotó se encuentra en la margen derecha del río Segre, en su curso medio. Este yacimiento se localizó en 1998 a través de una serie de prospecciones geoarqueológicas llevadas a cabo por investigadores del SERP de la Universitat de Barcelona. En 1999 se realizó un sondeo para valorar el potencial arqueológico del lugar, que resultó positivo. En 2013 se retomaron los trabajos arqueológicos gracias a la implantación del grado en Arqueología de la Universitat de Barcelona, que permitió integrar el yacimiento como campo de prácticas (Sánchez de la Torre et al., 2022).

Desde 2013, los trabajos arqueológicos anuales han permitido establecer -hasta el momento- tres niveles sedimentarios, que se corresponden con distintas ocupaciones cronoculturales prehistóricas. El nivel I corresponde a ocupaciones de la Edad del Bronce y el Neolítico Antiguo (datado en 7250–7000 cal BP), siendo el nivel II transicional e identificando un nivel III, que es el que presentamos en este trabajo, y que se relaciona con el Mesolítico de Muescas y Denticulados (fechado en 9500 al 8800 cal BP) (Sánchez de la Torre et al., 2022).

En el nivel mesolítico (III), se han documentado 110 artefactos o restos de los procesos de su configuración. Para garantizar su conservación como elemento de valor patrimonial, únicamente se han realizado estudios macroscópicos no destructivos de las muestras para caracterizar sus asociaciones minerales, texturas y clasificación petrológica mediante un lupa binocular modelo OLYMPUS KL 1500 LCD con un sistema de iluminación acoplado de luz incidente OLYMPUS TH4-200. Este estudio permitirá así relacionar el origen, ambientes de formación y composición de los artefactos líticos y de las muestras geológicas de los depósitos fluviales.

Con intención de comparar petrológicamente estos dos conjuntos, se definieron como áreas de estudio las terrazas fósiles de la zona de Alòs de Balaguer, pues estos depósitos ofrecen tanto diversas litologías como una rápida accesibilidad para ser explotados ya desde tiempos prehistóricos (Fig. 1).



FIGURA 1. *Terraza fósil TQ5 en Alòs de Balaguer. Escala: 1 metro.*

Durante las prospecciones llevadas a cabo en abril del 2023 se identificaron y delimitaron los depósitos y se muestrearon en un área de 1 m^2. El muestreo se basó en el registro de las frecuencias de 3 tipos de rocas – corneanas, cuarcitas y granitoides – que pertenecen a la categoría granulométrica de canto rodado/canto de río (>64 mm), ya que son los parámetros más representados en el conjunto arqueológico. A partir de estos muestreos se pretendía, por un lado, inferir la disponibilidad y variabilidad litológica presente en estas terrazas, y por otro, abastecernos de un conjunto geológico para realizar análisis comparativos con los efectivos arqueológicos. Se tomaron 20 muestras de cada tipo de roca por cada terraza.

RESULTADOS

Se han estudiado 89 efectivos arqueológicos del total del nivel III, ya que algunos están en proceso de análisis de residuos. A nivel litológico es evidente el dominio porcentual de las rocas metamórficas por encima de las ígneas y sedimentarias (Fig. 2). El 88% (74 efectivos) del total corresponde a rocas producto del metamorfismo de contacto, el 8% (6 efectivos) a rocas de origen plutónico, el 2% (2 efectivos) a rocas sedimentarias y un 2% (2 efectivos) como rocas indeterminables, debido a la alta alteración postdeposicional que presentan.

Las rocas metamórficas son principalmente de composición pelítica e incluyen cornubianitas moteadas (69%) y filitas moteadas (8%); además, también se encuentran cuarcitas (10%), algunas de ellas presentan una microestructura foliada relicta.

Las cornubianitas (66 efectivos) se agrupan composicionalmente en las que presentan andalucita (58%), las que presentan minerales ferromagnesianos como la cordierita (25%) o la biotita (15%) y una cornubianita con presencia de granate (2%).

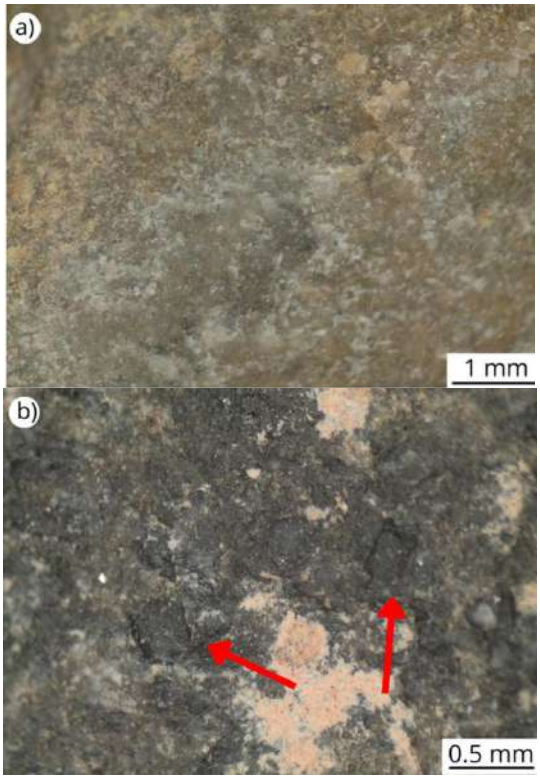


FIGURA 2. Muestras de mano de rocas metamórficas. *a) Microestructura granoblástica en una cuarcita. b) Identificación de porfidoblastos de andalucita en una cornubianita.*

En el trayecto del curso medio del río Segre, en lo que corresponde al tramo entre Artesa de Segre y Alòs de Balaguer, se atraviesan yesos y arcillas del Triásico (Keuper), donde se conservan las terrazas denominadas T7, T8 y T9. Estas terrazas se disponen a una altura con respecto al nivel actual del río de 35 a 40 metros (T7), 18-20 metros (T8) y 10 metros (T9). Las terrazas del río Segre se han datado mediante diversos métodos numéricos, que se realizaron a lo largo del curso del río y de sus afluentes mayores. La T7 se ha situado cronológicamente en el estadio isotópico 3, ha sido datada por Termoluminiscencia en 50000 BP. Las terrazas T8 y T9 en el estadio isotópico 2, mediante Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL por sus siglas en inglés) han sido datadas en 15000 BP y 10000 BP respectivamente (Peña Monné et al., 2011).

La terminología que usaremos de ahora en adelante se basará en el estudio más reciente realizado por Stange et al. (2013) que a través de la aplicación de SIG delimitaron cuatro terrazas en nuestra zona de estudio, denominadas- de más reciente a más antigua-: TQ7, TQ6, TQ5 y TQ4 (Fig. 3).

Las frecuencias litológicas registradas en los diferentes depósitos fluviales indican un dominio porcentual de las rocas metamórficas como corneanas (56%) y cuarcitas (26%) sobre los granitoides (18%) que ocupan el tercer lugar en abundancia.

En este sentido, la representación es muy similar a la del conjunto arqueológico, en el que existe una predominancia de cornubianitas y filitas moteadas, seguidas de las cuarcitas y granitoides. Las cornubianitas también se distinguen composicionalmente entre aquellas que presentan principalmente andalucita o cordierita y/o biotita en forma de porfidoblastos. Por su parte, las cuarcitas se presentan en porcentajes equivalentes al conjunto arqueológico. Los granitoides se dividen en leucogranitos, granitos y granodioritas.

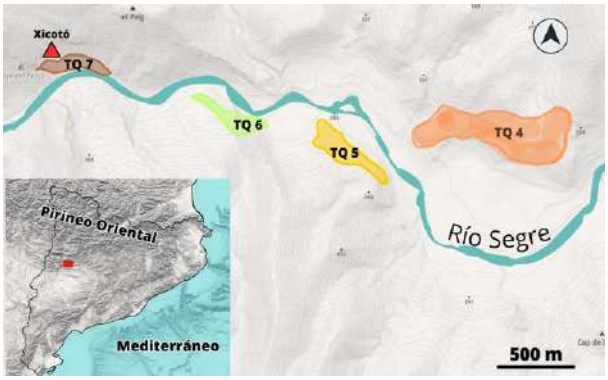


FIGURA 3. *Distribución de las diferentes terrazas fósiles del curso medio del río Segre y localización de Xicotó en Alòs de Balaguer.*

DISCUSIONES

Definimos los depósitos fluviales como área de explotación de recursos abióticos en la Prehistoria, debido a que las características propias que presentan estos enclaves proporcionan una diversidad litológica y una accesibilidad a las materias primas líticas muy elevadas, que las hace proclives a su explotación por parte de las comunidades prehistóricas (Emens, 2022).

Como hemos mencionado en el apartado introductorio, durante el Paleolítico superior se establecen relaciones de intercambio a media y larga distancia de materias primas líticas entre comunidades, fenómeno evidenciado por los estudios geoquímicos en sílex. El mantenimiento de estas relaciones de

intercambio y/o movilidad podría haber jugado un papel importante en la supervivencia de estos grupos humanos en escenarios medioambientales hostiles como serían el Último Máximo Glaciar o el Tardiglaciar.

Con la llegada del Holoceno, las sociedades de cazadores-recolectores pasan a habitar en un clima y ambiente más favorables. Este hecho podría haber llevado a los distintos grupos humanos a adaptarse al nuevo entorno y que por lo tanto ya no fuera imprescindible mantener relaciones y contactos culturales a tan largas distancias para obtener recursos o asegurarse la continuidad social, esto habría supuesto o facilitado el desarrollo de unas explotaciones de índole mucho más local de los recursos con el objetivo de paliar sus necesidades económicas y sociales.

En la ocupación de cazadores-recolectores que se da durante el Holoceno en el Abric del Xicotó no solo observamos una alta correlación entre la composición de los artefactos líticos y la materia prima que ofrecen los depósitos cercanos, sino que además los soportes líticos presentes en el yacimiento (cantos de río con estigmas de uso, fragmentos de cantos y restos de talla y configuración de estos) nos indican qué tipos de gestión tecnológica se desarrollaron sobre estas materias.

En este sentido, las corneanas parecen ser el material que principalmente se captaba para ser procesado en el yacimiento. Esto puede deberse al hábito de fractura concoide de su talla. Aunque este no es tan limpio como el del sílex, el tamaño de los granos, sobre todo de las matrices, permite una talla relativamente adecuada para la manufactura de lascas y en menor medida de láminas.

La práctica ausencia de granitoides en el conjunto arqueológico estudiado nos habla de que, aun siendo un material abundante en el entorno, los humanos que explotaban estos depósitos no tenían un uso para él dentro de la gestión económica en el yacimiento y por lo tanto no se tomaba en consideración, había un criterio de selección, que debía responder a las características estructurales y/o mecánicas de este tipo de rocas, que las definía como no aptas.

Existe una percepción generalizada de involución tecnológica y cultural con relación a la cultura material del Mesolítico en contraste con períodos del Paleolítico superior. Otra perspectiva, a nuestro juicio más adecuada, describe a estas comunidades como grupos que han logrado una optimización de sus estrategias de captación y gestión tecnológica de la materia prima con el objetivo de obtener una alta polivalencia de los soportes (Martínez-Moreno et al*.,* 2006).

CONCLUSIONES

Con este estudio se han aportado datos sobre la captación y gestión de los recursos líticos distintos al sílex por parte de los últimos grupos cazadores-recolectores durante el Holoceno en el NE peninsular. La concordancia petrológica identificada entre los lotes industriales arqueológicos y las muestras geológicas de los depósitos fluviales, permiten desarrollar narrativas sobre las áreas de actividad económicas de las poblaciones humanas que ocuparon las inmediaciones del curso medio del río Segre.

Análisis geoquímicos en curso podrán ayudarnos a precisar el origen de estas rocas y a obtener datos sobre la movilidad de estos materiales entre grupos humanos en la Prehistoria.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido posible gracias a un contrato predoctoral FPI (MCIN/AEI/ y por FSE), al proyecto ministerial PID2020·113960GB·I00, al Grado en Arqueología de la Universitat de Barcelona, a los proyectos CLT009/18/00030 y CLT009/22/000076 de la Generalitat de Catalunya y al grupo consolidado SERP (SGR2021-00337). Agradecemos en especial al Ajuntament de Alòs de Balaguer por su predisposición.

REFERENCIAS

Eixea, A., Roldán, C., Villaverde, V., Días, I., Prudencio, I., Marques, R., Russo, D., Gméling, K., Cavallo, G. y Murcia, S. (2023). Geochemical and Petrographic Analyses on Middle and Upper Palaeolithic Cherts from the Central Region of Mediterranean Iberia. *Lithic Technology*, 48(2), 93-116.

Emens, C. (2022). *Anàlisi de La Indústria Lítica Polimentada: proposta d'anàlisi tecnològica i aproximació als sistemes de captació i aprovisionament de la matèria primera al neolític del NE Peninsular.* Trabajo de Máster inédito. Univ. de Barcelona. 123 p.

Martínez-Moreno, J., Mora, R. y Casanova, J. (2006). El Mesolítico de los Pirineos Surorientales: una reflexión sobre el significado de las «facies de fortuna» del postglaciar. En A. Alday (Coord.). *Memorias de Yacimientos Alaveses 11*: 163-192.

Peña Monné, J. L., Turu i Michels, V. y Calvet, M. (2011). El Cuaternario en España y áreas afines. *Resúmenes XIII Reunión Nacional de Cuaternario, Avances en 2011*: 51-55.

Prieto, A. (2018). *Adquisición y gestión de la cuarcita en la Región Cantábrica: El Paleolítico medio y superior en las Cuencas del Deva, Cares y Güeña*. Tesis doctoral. Univ. del País Vasco. 589 p.

Sánchez de la Torre, M., González Olivares, C. B., Gratuze, B., le Bourdonnec, F. X. y Mangado, X. (2022). Geochemical study of chert artefacts from Xicotó Rockshelter (NE Iberia) archaeological site. New data on Neolithic and Mesolithic human occupations. *Interdisciplinaria Archaeologica*, 13(2): 99-115.

Stange, K. M., van Balen, R., Vandenberghe, J., Peña, J. L. y Sancho, C. (2013). External controls on Quaternary fluvial incision and terrace formation at the Segre River, Southern Pyrenees. *Tectonophysics*, 602: 316–331.

EvulcaRED: estudio de vulnerabilidad y riesgos geológicos aplicado a la red hidráulica de Las Médulas (León, España).

EvulcaRED: Study of vulnerability and geological risks applied to the hydraulic system of Las Médulas (León, Spain).

J. Fernández-Lozano[1], R. M. Carrasco[2], J. Pedraza[3], E. Sanz-Ablanedo[4] y J. R. Rodríguez-Pérez[4]

1 Dpto. de Tecnología Minera, Topografía y Estructuras. ESTI Minas, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León. jferl@unileon.es
2 Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera. Universidad de Castilla-La Mancha, Avda. Carlos III, s/n, 45071, Toledo, Spain. rosa.carrasco@uclm.es
3 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais, 12, 28040, Madrid. javierp@ucm.es
4 Dpto. de Tecnología Minera, Topografía y Estructuras. ESTI Minas, Universidad de León, Campus de Ponferrada s/n, 24071, Ponferrada. esana@unileon.es y jr.rodriguez@unileon.es

Palabras clave: EvulcaRED, Mapa de vulnerabilidad, canales romanos, Las Médulas, SIG.

Resumen

El proyecto de investigación EvulcaRED se centra en analizar el estado de conservación y el riesgo de destrucción de la red hidráulica de Las Médulas con objeto de garantizar su adecuada gestión y la correcta toma de decisiones sobre el desarrollo de acciones encaminadas a su rehabilitación y puesta en valor como elemento turístico en la provincia de León. Está estructurado en tres fases: i) una primera de reconocimiento que ha permitido sacar a la luz nuevos canales, mejorando con ello la cartografía de la red hidráulica; ii) un análisis geomorfológico y petrofísico que permita identificar los factores que condicionan el estado de preservación de la red y una tercera fase iii) en la que se plantea el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para el desarrollo de una cartografía basada en un análisis multicriterio de datos geológicos, climáticos y de riesgos asociados a la traza de los canales romanos. Los resultados de este proyecto se plasmarán en un mapa de vulnerabilidad de la red hidráulica. La identificación de puntos de alta vulnerabilidad contribuirá a mejorar la gestión y toma de decisiones en las intervenciones de conservación. Además, permitirá regular el desarrollo de actividades turísticas sobre este conjunto de excepcional valor histórico y arqueológico.

Abstract

The EvulcaRED research project is focused on analyzing the state of conservation and the risk of destruction of the hydraulic network of Las Médulas in order to ensure its proper management and the correct decision making on the development of actions aimed at its rehabilitation and enhancement as a tourist attraction in the Province of León. It is structured in three phases: i) a first reconnaissance phase that has brought to light new canals, thus improving the mapping of the hydraulic network; ii) a geomorphological and petrophysical analysis to identify the factors that condition the state of preservation of the network and a third phase iii) in which the use of geographic information systems (GIS) is proposed for the development of a cartography based on a multicriteria analysis of geological, climatic and risk data associated with the Roman channels. The results of this project will provide vulnerability map of the hydraulic network. The identification of high vulnerability areas will contribute to improve management and decision making in conservation interventions. It will also help regulate the development of tourist activities on this site of exceptional historical and archaeological value.

Biogeoquímica de la transición Pleistoceno-Holoceno del registro TaguaTagua 3, Chile central (~34ºS).

Biogeochemical sedimentology of the Pleistocene-Holocene transition of the TaguaTagua 3 record in central Chile (~34ºS).

M. Frugone-Álvarez*[1,2], R. Labarca[3], S. Contreras[1], C. Godoy[3], N. Viña[1], E. Tejos[1], C. Tornero[4], E. González-Guarda[5], T. Viñaseñor[5], G. Aliaga[5], J. Blanco[6], P. Soto[7], A. Delgado-Huertas[8] y B. Valero-Garcés[9]

1 Dpto. de Química Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.
2 Núcleo Milenio AFOREST
3 Departamento de Antropología, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile
4 Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)
5 Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Libertador Bernardo O'Higgins
6 Sociedad Chilena de Arqueología
7 Corporación Laguna de Taguatagua, Santiago, Chile
8 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT, (CSIC-UGR), Granada, España
9 Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Zaragoza, España

Palabras clave: Biogeoquímica, Transición Pleistoceno-Holoceno, Cambio Climatico.

Resumen

Este estudio examina los cambios biogeoquímicos en el sitio geoarqueológico Tagua-Tagua durante la transición Pleistoceno-Holoceno en el centro de Chile (~34°S), mediante un análisis detallado de la secuencia TT19-3A a lo largo de los últimos 20 mil años. Se realizaron análisis de tamaño de grano, microfósiles, análisis isotópicos en carbonatos, y se estudiaron biomarcadores lipídicos como n-alcanos, n-alcanoles, ácidos grasos y esteroles para investigar los procesos sedimentarios y cambios ambientales pasados. Los resultados indican cambios significativos en el transporte y deposición de sedimentos, así como en la vegetación y temperatura hacia la transición Pleistoceno-Holoceno. Se produjeron cambios importantes en ~20.5-18, ~15-12.8, ~12,5-12, ~11,5-11 y ~10,5-10 ka cal BP caracterizados por cambios a condiciones más húmedas y temperatura. Detectamos un pulso humedo entre ~12,8 y 12,5 ka cal BP. El registro ATTL sugieren cambios importantes en la intensidad del Anticiclón del Pacífico Sur, sincronizados con cambios atmosféricos a gran escala durante la Terminación 1 y el inicio del Holoceno.

Abstract

This study examines the biogeochemical changes at the Tagua-Tagua geoarchaeological site during the Pleistocene-Holocene transition in central Chile (~34°S), through a detailed analysis of the TT19-3A sequence over the last 20,000 years. Analyses of grain size, microfossils, isotopic analyses on carbonates, and lipid biomarkers such as n-alkanes, n-alkanols, fatty acids, and sterols were conducted to investigate sedimentary processes and past environmental changes. The results indicate significant changes in sediment transport and deposition, as well as in vegetation and temperature towards the Pleistocene-Holocene transition. Major changes occurred at ~20.5-18, ~15-12.8, ~12.5-12, ~11.5-11, and ~10.5-10 ka cal BP, characterized by shifts to wetter conditions and temperature. We detected a wet pulse between ~12.8 and 12.5 ka cal BP. The ATTL record suggests significant changes in the intensity of the South Pacific Anticyclone, synchronized with large-scale atmospheric changes during Termination 1 and the beginning of the Holocene.

Referencias

Labarca, R., Frugone-Álvarez, M., Vilches, L., Blanco, J.F., Peñaloza, A., Godoy-Aguirre, C., Lizama-Catalán, A., Oyarzo, C., Tornero, C., González-Guarda, E., Delgado, A., Sepúlveda, M. y Soto-Huenchuman, P. (2024). Taguatagua 3: a new late Pleistocene settlement in a highly suitable lacustrine habitat in central Chile (34°S). *PlosOne* (Accepted)

Métodos de estudio para la identificación, puesta en valor y recuperación de las minas de agua romanas. Carmona, Torreperogil y Huelva, como ejemplos prácticos de patrimonio histórico-geológico.

Study methods for the identification, enhancement and recovery of Roman Water Mines. Carmona, Torreperogil and Huelva, as practical examples of historical-geological heritage.

A. González-Cantero[1], R. Vidal-Garduño[2]

1 Gama Geofísica, 28232 Las Rozas (Madrid). agonzalez@gama-geofisica.com
2 Geologika Aestuaria S.L.U.-Universidad de Huelva, 21007 Huelva. rafavidal@geologika.es

Resumen: Este trabajo aporta nuevos métodos de investigación, para el estudio geotécnico-hidrogeológico de las minas de agua de origen romano. Estos procedimientos serán de aplicación en otras partes del mundo, ya que la presencia de estas obras de abastecimiento era habitual en todo el Imperio Romano.
Se crea así, un protocolo de trabajo inédito hasta el momento, basado en los buenos resultados obtenidos en las estructuras subterráneas de Carmona y Torreperogil, que han supuesto un gran avance en el estudio y conocimiento de las mismas. Cuando se concluyan estas dos actuaciones, junto con la de Huelva, se podrá correlacionar tres áreas, geográficamente distanciadas, con técnicas constructivas y modelos de aprovechamiento hidráulico muy similares.
Sin duda, nos encontramos ante una línea de investigación de gran interés que permitirá desarrollar un amplio conocimiento en estas construcciones históricas y que ponen de manifiesto la importancia de la hidrogeología en la ingeniería romana en Andalucía, así como el amplio potencial que tienen tanto en el conocimiento del marco natural como en su valorización turística y patrimonial.

Palabras clave: hidrogeología, igeniería hidráulica, minas de agua, patrimonio histórico-geológico, seguridad estructural.

Abstract: *This work provides new research methods for the geotechnical-hydrogeological study of the Water Mines of Roman origin. These procedures will be applied in other parts of the world, since the presence of these supply works was common throughout the Roman Empire.*
Thus, a previously unpublished work protocol is created, based on the good results obtained in the underground structures of Carmona and Torreperogil, which have represented a great advance in the study and knowledge of them. When these two actions are completed, together with the one in Huelva, it will be possible to correlate three areas, geographically distant, with very similar construction techniques and hydraulic use models.
Without a doubt, we are faced with a line of research of great interest that will allow us to develop extensive knowledge of these historical constructions and that reveal the importance of hydrogeology in Roman engineering in Andalusia, as well as the broad potential they have both in the knowledge of the natural framework as well as its tourist and heritage valorization.

Key words: *Geotechnics, Historical-Geological Heritage, Hydrogeology, Hydraulic Engineering, Structural Safety, Water Mines.*

INTRODUCCIÓN

Hasta la realización de las primeras investigaciones de este tipo de estructuras hidráulicas en el ámbito hidrogeológico-geotécnico, el estudio de las minas de agua romanas se basaba en referencias bibliográficas y observaciones arqueológicas exteriores y en exploraciones e incursiones espeleológicas con motivaciones meramente divulgativas. Por tanto, este trabajo viene a aportar nuevos métodos de estudio en las obras subterráneas, extrapolables a todas las que se construyeron en el Imperio Romano *(Román Rodríguez, J. M..)*. Nuestro campo de trabajo se centra en los notorios ejemplos que tenemos en Andalucía, pero que podrán usarse a nivel mundial.

Los primeros estudios científicos se realizan en las galerías de la ciudad de Carmona (Sevilla), en las denominadas como "Puerta de Córdoba" y de "San Antón" *(Orche Amaré, P. et al.)*, como parte del encargo de la inspección de seguridad y estabilidad geotécnica de las mismas para su puesta en valor (Figura 1). Ante la falta de trabajos y procedimientos previos, se creó de un grupo multidisplinar formado por espeleólogos, geólogos y arqueólogos, especializados en actividades subterráneas.



FIGURA 1. *Detalles de las estalactitas en las galerías de la Mina de San Antón (Carmona, Sevilla)*

Como exponíamos anteriormente, todas se construyen de un modo muy similar, con unos patrones geológicos concretos y aprovechando acuíferos elevados topográficamente para drenarlos a conciencia a un solo punto (Figura 2). Son galerías filtrantes que aprovechan las unidades permeables a techo, para recoger las aguas de lluvia y conducirlas gracias al cierre impermeable subyacente (Figura 3). En ellas pueden observarse numerosas soluciones ingenieriles, capaces de aprovechar el comportamiento hidrogeológico de toda la masa porosa (*IGME*).

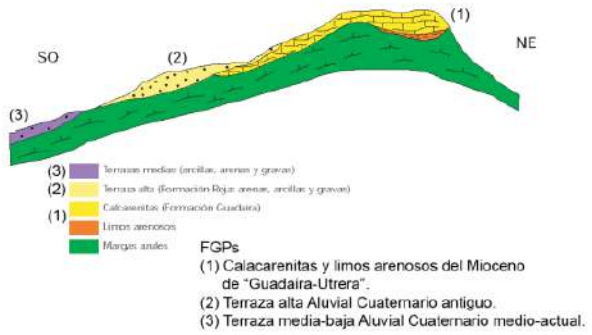


FIGURA 2. *Sección tipo de la geología de aprovechamiento de aguas subterráneas de Carmona (IGME).*

El estudio de las mismas nos ayuda a recuperar caudales perdidos que alimentaban antiguas fuentes y manantiales ya que en los casos estudiados, estos flujos llegaron incluso a abastecer de agua potable a importantes núcleos de población e industrias, hasta hace muy pocas décadas *(Antequera Fernández, M.)*.

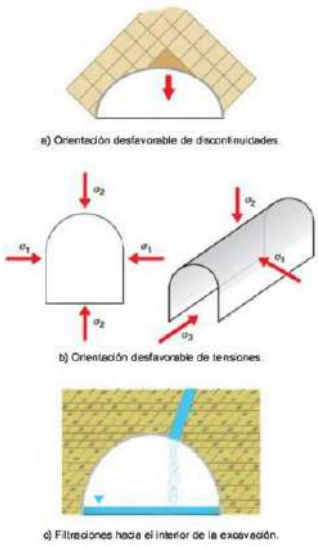


FIGURA 3. *Condicionantes estructurales en las filtraciones de agua en las galerías (Ingeniería Geológica, López Vallejo et al.).*

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se procede a la elaboración de un protocolo de trabajo que consistió en los siguientes pasos:

-Análisis de la información documental previa de los arqueólogos y arquitectos de los ayuntamientos.

-Inspección inicial de las galerías por parte de los espeleólogos del grupo AAES, para valorar el estado de las cavidades. Se acompañan de medidores de gases nocivos. También realizan un levantamiento topográfico previo, que nos servirá como base para los trabajos posteriores.

-Elaboración de una cartografía geológica e hidrogeológica bibliográfica previa, para su uso en el interior de las minas. Es fundamental incluir factores como el contexto tectónico regional, la sismicidad o acciones humanas relevantes *(López Vallejo, L. et al.)*.

-Visita técnica por parte de los geólogos especialistas en las áreas de geotecnia e hidrogeología para la inspección detallada de los elementos estructurales constituyentes de las galerías. De esta forma, optimizamos el tiempo de inspección y minimizamos los riesgos en las entradas, contando con toda la información posible.

Para la inspección geotécnica de las estructuras, nos basamos en las técnicas habituales de minería subterránea *(López Jimeno, C. et al.)*. Sobre la base cartográfica, y con el marco geológico-geotécnico local, procedemos a la descripción geométrica de los túneles (hastiales, bóveda y rasante), deteniéndonos en condicionantes de estabilidad como son las litologías, elementos estructurales, parámetros resistentes, presencia de agua o restos de la actividad antrópica *(Ayala Carcedo, F.J. et al.)*. Para la toma de muestras y mediciones nos ayudamos de la brújula y martillo de geólogo, tomamuestras de mano, escisómetro (*Vane Test*) y esclerómetro (Figura 4).



FIGURA 4. *Toma de muestras y mediciones con esclerometrías (Torreperogil, Jaén)*

La realización de estaciones geomecánicas y la toma de datos *in situ*, nos permite elaborar un modelo de las condiciones geotécnicas de las cavidades y avanzar en el cálculo de los factores de seguridad de los frentes mediante el tratamiento estadístico de los mismos (back-analysis) (Figura 5).

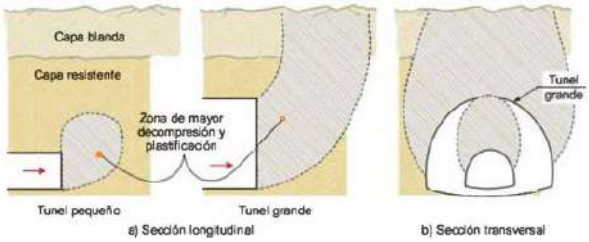


FIGURA 5. *Influencia de la geometría y la estratigrafía en la estabilidad de los túneles (Ingeniería Geológica, López Vallejo et al.).*

CONCLUSIONES

Como exponíamos anteriormente, los resultados obtenidos en los trabajos realizados hasta el momento en las Minas Carmona y Torreperogil, son muy ilusionantes. A la contribución fundamental al conocimiento geológico, geotécnico e hidrogeológico de las zonas, se le une la extensa información obtenida en las áreas de la ingeniería, arqueología o el urbanismo, que podrán ser utilizados para el desarrollo de otras disciplinas complementarias.

Instamos a las Administraciones públicas a seguir apoyando y promoviendo la puesta en valor de estas estructuras de ingeniería romana. No solo enriquecen el conocimiento histórico de los municipios, sino que también se convierten en recursos turísticos singulares que atraerán a visitantes interesados en la historia y la arqueología.

AGRADECIMIENTOS

A la Asociación Andaluza de Exploraciones Subterráneas (especialmente a José Millán Naranjo), por su apoyo y asesoramiento técnico durante las visitas y por la transmisión de información fundamental para la redacción de este artículo. A los Ayuntamientos de Carmona y Torreperogil por confiar en nuestro equipo para el estudio y valorización de su patrimonio histórico.

REFERENCIAS

Ayala Carcedo, F.J. et al. (1987) *Manual de Taludes* IGME-CSIC. España.

Antequera Fernández, M. (2015). *Las galerías drenantes en el sector oriental y suroriental de la Península Ibérica. Identificación, análisis y gestión patrimonial* (Tesis doctoral), Universitat de Valencia.

Azcárate Martín, J.E. y Espejo Molina, J.A. (1977): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 906 (Úbeda)*. IGME, Madrid.

Borrero Domínguez, J.D. y Roldán García, F.J. (1988): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 985 (Carmona)*. IGME, Madrid.

De Torres, T. (1975): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 999-1016 (Huelva-Los Caños)*. IGME, Madrid.

González de Vallejo L. et al. (2005) *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall-Pearson Educacion. Italia.

López Jimeno, C. et al. (2011) *Manual de túneles y obras subterráneas*. ETSI MINAS y ENERGÍA (UPM). España.

Orche Amaré, P.; Millán Naranjo, J. Y Román Rodríguez, J. M. (2018). Sánchez Jiménez, F.J. (Coord.): *II Congreso Internacional de Patrimonio Industrial y de la Obra Pública*: Patrimonio Industrial: pasado, presente y futuro, Junta de Andalucía, pp. 378-394

Román Rodríguez, J. M. (2023). Claves para la definición de un paisaje cultural. *Archeopress* 2023: 37-50.

Análisis Preliminares de Isótopos de Estroncio en Esmalte Dental y Hueso de *Equus* de la Cueva Fantasma, Atapuerca (Burgos, España): Implicaciones sobre patrones de movilidad local.

Preliminary Strontium Isotope Analyses of *Equus* Enamels and Bone from Cueva Fantasma, Atapuerca (Burgos, Spain): Insights into Local Mobility Patterns.

A. Hasozbek[1], F. Jiménez Barredo[1], A. I. Ortega[1], M. Terradillo-Bernal[2], J. Vallverdú[3,4], M. Duval[1], J. M. Parès[1], A. Pourmand[5] y A. Sharifi[5,6]

1 Geocronología y Geología, Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo de Atapuerca, 3, 09002 Burgos. (altug.hasozbek@cenieh.es)
2 Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales, Universidad Internacional Isabel I de Castilla (Ui1), 09003 Burgos, Spain
3 IPHES, Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social (IPHES), URV (Edifici W3), 43007, Tarragona, Spain
4 Universitat Rovira i Virgili (URV), Departament d'Història i Història de l'Art, 43002 Tarragona, Spain
5 Department of Marine Geosciences, Neptune Isotope Laboratory, University of Miami, Miami, FL, 33149-1031 USA
6 Isobar Science-BETA Analytic Research and Development Department, Miami, FL, 33155 USA

Palabras clave: $^{87}Sr/^{86}Sr$, Paleo-movilidad, Cueva Fantasma, Atapuerca, MC-ICP-MS

Resumen

Se determinaron análisis isotópicos de Sr mediante MC-ICP MS en el esmalte de dos dientes de *Equus ferus* y en una muestra de hueso recogidos en la Cueva Fantasma, Yacimientos de Atapuerca, Burgos. Las proporciones de $^{87}Sr/^{86}Sr$ en el esmalte de equidae adulto varían entre 0.709489 y 0.709598 (n=3), y para el esmalte del equino más joven, varían entre 0.709463 y 0.709546 (n=2), ambos dentro de las incertidumbres de 2σ. La muestra de hueso presenta proporciones ligeramente más altas, entre 0.709725 y 0.709966 (n=2). Mientras que las proporciones isotópicas de las muestras de esmalte son consistentes entre sí, indicando un origen geográfico localizado, la proporción ligeramente distinta en el hueso sugiere un posible cambio en el hábitat o régimen dietético de los équidos hacia la última parte de su vida. Estos resultados son consistentes con las líneas basales isotópicas regionales del estroncio predichas de 0.7090-0.7099 (Díaz-del-Río et al., 2022), y sugieren que los équidos probablemente pasaron sus vidas dentro de los entornos locales de la región de la Sierra de Atapuerca. Esta evidencia isotópica preliminar respalda la hipótesis de movilidad limitada para estos individuos de *Equus ferus*, aportando perspectivas sobre la paleoecología y los patrones de movilidad de la megafauna en la Península Ibérica durante el Pleistoceno.

Abstract

Sr-isotope analyses were conducted on two *Equus ferus* teeth enamels and a bone sample using MC-ICP MS, collected from "Cueva Fantasma", Atapuerca archeological site, Burgos. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios for an adult equidae enamel range from 0.709489 to 0.709598 (n=3), and for a younger equid enamel, from 0.709463 to 0.709546 (n=2), both within 2σ uncertainties. The bone sample exhibits slightly higher ratios, ranging from 0.709725 to 0.709966 (n=2) within 2σ uncertainties. While the isotopic ratios from the enamel samples are consistent with each other, indicating a localized geographic origin, the slightly distinct ratio from the bone suggests a likely shift in the equidae's habitat or dietary regime over the latest part of its lifetime. These findings are consistent with the predicted regional strontium isotopic baselines of 0.7090-0.7099 (Díaz-del-Río et al., 2022), and suggest that the equids likely spent their lives within the local environs of the Sierra de Atapuerca region. This preliminary isotopic evidence supports the hypothesis of limited mobility for these *Equus ferus* individuals, providing insights into the paleoecology and mobility patterns megafauna in the Iberian Peninsula during the Pleistocene.

Referencias

Díaz-del-Río, P, Uiarte, A, Becerra, P, Pérez-Villa, A, Vincent, M. J, Díaz-Zorita, M. (2022*). Journal of Archeological Science*, Reports 46, 1-10.

Enfoque multimétodo para datar las secuencias sedimentarias en Cueva del Silo y Cueva Peluda por series de U y ESR (Sierra de Atapuerca, España).

A multi-method dating of the sedimentary sequences into Cueva del Silo and Cueva Peluda by U series and RPE (Sierra de Atapuerca, España).

I. Hernando-Alonso[1], M. Richard[2,1], D. Moreno[1], A.I. Ortega[1]A. Benito-Calvo[1], E Pons-Branchu[3], E. Carbonell[4, 5] y J.M. Bermúdez de Castro[1]

[1] Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos (Spain). davinia.moreno@cenieh.es, isabel.hernando@cenieh.es, alfonso.benito@cenieh.es, anaisabel.ortega60@gmail.com, josemaria.bermudezdecastro@cenieh.es
[2] Archéosciences-Bordeaux, UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne, Pessac, France. mailys.richard@u-bordeaux-montaigne.fr
[3] Université de Versailles Saint-Quentin Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE). Orme des Merisiers, Bat 714, 91190 Saint-Aubin, Francia. edwige.pons-branchu@lsce.ipsl.fr
[4] Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social (IPHES), Edificio W3, Campus Sescelades URV, Zona Educacional 4, 43007 Tarragona (Spain). ecarbonell@iphes.cat
[5] Universitat Rovira i Virgili, Campus Sescelades URV, Zona Educacional 4, 43007 Tarragona (Spain)
congreso_geologico@uhu.es

Palabras clave: Atapuerca, Geocronología, terrazas fluviales, RPE, series de U.

Resumen

La Cueva del Silo y la Cueva Peluda son cavidades situadas en el nivel inferior del sistema kárstico Cueva Mayor-Cueva del Silo (Sierra de Atapuerca, Burgos, España), que destacan por la presencia de depósitos de gravas fluviales metamórficas y facies finas, sellados por costras estalagmíticas. Estas secuencias sedimentarias registran la entrada directa del río Arlanzón en el karst y la posición del nivel freático regional. Un estudio previo de ESR dató los depósitos fluviales de la Cueva del Silo entre 700-900 ka. En este estudio, se tomó una muestra de cada espeleotema para su datación mediante series de U. También se muestreó la unidad de gravas fluviales de Cueva Peluda para ser datada por ESR. Los resultados obtenidos sugieren que la secuencia fluvial de Cueva Peluda se depositó en el Pleistoceno inferior, mientras que los espeleotemas se han formado desde el Pleistoceno final hasta la actualidad. Estos resultados son consistentes estratigráficamente y se alinean con cronologías previas del sistema kárstico de Atapuerca y de las terrazas fluviales en el sector NE de la cuenca del Duero.

Abstract

The Cueva del Silo and Cueva Peluda are cavities located in the lower level of the Cueva Mayor-Cueva del Silo karst system (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain), notable for their deposits of fluvial metamorphic gravels and fine facies, capped by flowstones. These formations record the direct entry of the Arlanzón River into the cave system and the position of the regional water table. A previous ESR study dated the fluvial deposits in Cueva del Silo between 700-800 ka. For this study, one sample was taken from each speleothem to be dated by U analyses. One sample from the fluvial gravels in Cueva Peluda has also been taken to be dated by ESR. The obtained results suggest that,, the fluvial sequence in Cueva Peluda was deposited in the Lower Pleistocene, whereas the speleothems have been formed from the Late Pleistocene to present. These results are stratigraphically consistent and align with previous chronologies of the Atapueca karst system and fluvial terraces in the NE sector of the Duero basin.

Geoarqueología del registro prehistórico kárstico del Pleistoceno superior final y Holoceno inferior del valle del Sella, Asturias, España.

Geoarchaeology of the prehistoric karstic record of the Upper Pleistocene and Lower Holocene of the Sella valley, Asturias, Spain.

J. F. Jordá Pardo[1], D. Álvarez-Alonso[2], E. Álvarez-Fernández[3], M. de Andrés-Herrero[2], P. Carral[4], M. Cueto[5], C. Duarte[6], A. Maestro[7], S. Martín-Jarque[3], A. Martínez-Villa[8], A. Maximiano Castillejo[1], J. Molina Salido[1], Portero, R.[9] y J. Tapia[10]

1 Dpto. de Prehistoria y Arqueología, UNED E-28040 Madrid (España). jjorda@geo.uned.es; amaximiano@geo.uned.es; jmolina@geo.uned.es
2 Dpto. de Prehistoria, Hª Antigua y Arqueología, UCM E-28040 Madrid. david.alvarez@ucm.es; maría.deandres@ucm.es
3 Dpto. de Prehistoria, Hª Antigua y Arqueología, Universidad de Salamanca E-37002 Salamanca. epanik@usal.es
4 Dpto. de Geología y Geoquímica, UAM E-28049 Madrid. pilar.carral@uam.es
5 Universidad Autónoma de Barcelona. mariancuetor@gmail.com
6 CIAECHumano, Universidade do Algarve P-8005-139 Faro. cduarte.as@gmail.com
7 Dpto. de Geología y Geofísica. C.N. IGME-CSIC E-28760 Tres Cantos (Madrid). a.maestro@igme.es
8 Abamia Arkeos y Centro Ecomuseo Fauna Glacial E-33556 Avín, Onís, Asturias (España). abamiaarkeos@gmail.com
9 IIIPC, Universidad de Cantabria E- 39005 Santander. rodrigoportero@hotmail.com
10 Sociedad de Ciencias Aranzadi E-20014 Donostia-San Sebastián (España). jtapia@aranzadi.eus

Palabras clave: Paleolítico superior, procesos geológicos, radiocarbono, cronoestratigrafía, N de Iberia.

Resumen

Las investigaciones arqueológicas realizadas los últimos años en el curso bajo y medio del valle Sella, están permitiendo precisar las ocupaciones de los grupos de cazadores-recolectores-mariscadores que habitaron en el N de Iberia al final del Pleistoceno superior y el Holoceno inferior. Se están realizando nuevos proyectos de investigación (proyectos CantabricOIS2 y PaleontheMove) en los yacimientos localizados en la desembocadura del Sella (Cova Rosa, El Cierro, Les Pedroses, La Lloseta, Tito Bustillo) y en su curso medio (Los Azules). Las investigaciones geoarqueológicas efectuadas y las nuevas dataciones ^{14}C obtenidas nos han permitido conocer los procesos geológicos y antrópicos responsables del registro de esos estos yacimientos kársticos y precisar la posición cronoestratigráficas de las distintas secuencias. Además, los resultados de estas investigaciones han permitido realizar una reconstrucción paleogeográfica de la línea de costa en la zona de Ribadesella entre el OIS 3 y el OIS 1.

Abstract

The archaeological investigations carried out in recent years in the lower and middle valley of the Sella River are making it possible to specify the occupations of the groups of hunter-gatherer-shellfisher catchers who lived in northern Iberia at the end of the Upper Pleistocene and the Lower Holocene. New research projects are being carried out (CantabricOIS2 and PaleontheMove projects) in the sites located at the mouth of the Sella (Cova Rosa, El Cierro, Les Pedroses, La Lloseta, Tito Bustillo) and in its middle course (Los Azules). The geoarchaeological investigations carried out and the new 14C dating obtained have allowed us to understand the geological and anthropic processes responsible for the recording of these karst sites and to specify the chronostratigraphic position of the different sequences. Furthermore, the results of these investigations have allowed a paleogeographic reconstruction of the coastline in the Ribadesella area between OIS 3 and OIS 1.

Referencias

Álvarez-Fernández, E. *et al*. (2021). Radiocarbon dates for the Late Pleistocene and Early Holocene occupations of Cova Rosa (Ribadesella, Asturias, Spain). *Radiocarbon* 63(3), 1.053-1.072.

Jordá Pardo, J.F. *et al*. (2018). Al oeste del Sella. Geoarqueología y cronoestratigrafía del registro del Pleistoceno superior de la cueva de El Cierro (Fresnu, Ribadesella, Asturias, España). *Bol. Geol. Min.* 129 (1), 207-250.

La Geoarqueología en España desde sus inicios hasta la actualidad.

Geoarchaeology in Spain from its beginnings to the present.

J. F. Jordá Pardo[1] y F. Borja Barrera[2]

1 Departamento de Prehistoria y Arqueología, Facultad de Geografía e Historia, UNED, Senda del Rey 7, Ciudad Universitaria E-28040 Madrid. jjorda@geo.uned.es
2 Departamento de Historia, Geografía y Antropología, Facultad de Humanidades, Universidad de Huelva, Campus del Carmen, s/n E-21071 Huelva. fborja@uhu.es

Palabras clave: historiografía, registro geoarqueológico, procesos naturales, procesos antrópicos, metodología.

Resumen

La Geoarqueología es una disciplina científica desarrollada a partir de los últimos cincuenta años, cuyo objetivo es el estudio y la interpretación de las relaciones existentes entre el medio natural y las comunidades humanas que se plasman en el registro arqueológico, considerando éste como el resultado de la acción conjunta de procesos naturales y culturales en contextos más o menos antropizados. Desde 2016 la Geoarqueología se entiende no como una Geología aplicada a la Arqueología o como una Arqueología que utiliza los métodos de las Ciencias de la Tierra en su investigación. Muy al contrario, la Geoarqueología desarrolla su propia interpretación de la evidencia arqueológica, con una narrativa científica específica que tiene un objeto de estudio, unos objetivos y una metodología propios, para de esta forma convertirse en una Geoarqueología como *Geoarqueología*. En este trabajo presentamos el desarrollo histórico de la Geoarqueología en España, desde sus inicios hasta la actualidad, sin olvidarnos de los pioneros de principios del siglo XX quienes, sin saberlo, estaban poniendo las bases de esta disciplina.

Abstract

Geoarchaeology is a scientific discipline developed over the last fifty years whose objective is the study and interpretation of the existing relationships between the natural environment and human communities that are reflected in the archaeological record, considering this as the result of the action joint of natural and cultural processes in more or less man-disturbed contexts. From 2016, Geoarchaeology is currently not understood as Geology applied to Archaeology or as Archaeology that uses the methods of Earth Sciences. Quite the contrary, Geoarchaeology develops its own interpretation of archaeological evidence, with a specific scientific narrative that has its own study objects, objectives and methodology, in order to become Geoarchaeology as *Geoarchaeology*. In this work we present the historical development of Geoarchaeology in Spain, from its beginnings to the present, without forgetting the pioneers of the early 20th century, who, without knowing it, were laying the foundations of this discipline.

Referencias

Borja Barrera, F. (2016). Open discussion: Geoarchaeology as *Geoarchaeology*. *IAG Working Group on Geoarchaeology*. *Newsleter*, 17: 7-11.

Borja Barrera, F. and Jordá Pardo, J.F. (2020). Geoarchaeology as *Geoarchaeology*. *Journal of Anthropological and Archaeological Sciences* 2 (5). JAAS.MS.ID.000150. DOI: 10.32474/JAAS.2020.02.000150.

Jordá Pardo, J.F. y Borja Barrera, F. (2018). Prólogo. En: Geoarqueología, entre las Ciencias de la Tierra y la Historia (J.F. Jordá Pardo F. Borja Barrera, Eds.). *Boletín Geológico y Minero* 129 (1/2), 5-11. https://www.igme.es/boletin/2018/129_1.htm

Cartografía geoarqueológica del complejo minero prehistórico de sílex en la Sierra de Araico - Montes de Cucho (Burgos-Álava).

Geoarchaeological mapping of the prehistoric flint mining complex in the Sierra de Araico - Montes de Cucho (Burgos-Álava).

I. Martín-Martín[1], A. Tarriño[1], A. Bandrés[2], J. Junguitu[3], L. Eguiluz[4], I. Orue[3], R. Jiménez-San Pedro[2], D. Herrero-Alonso[5], C. López-Tascón[6], H. H. Hernández[7], I. Elorrieta[3] y N. Castañeda[8]

1 Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), C/ Tomás y Valiente s/n, 01006 Vitoria-Gasteiz. i.martin@ehu.eus; antonio.tarrinno@ehu.eus
2 TUV SUD IBERIA SAU, C/ Las Balsas, 22, 26009 Logroño. alberto.bandres@tuvsud.com; rut.jimenez@tuvsud.com
3 Investigador(a) independiente, iosujun@gmail.com; irantzuelorrieta@gmail.com
4 Departamento de Geología, Universidad del País Vasco (UPV-EHU), Paseo de las Universidades, 7, 01006 Vitoria-Gasteiz.
5 Departamento de Historia, Arte e Xeografía, Universidad de Vigo, Campus Universitario As Lagoas s/n. 32004. Ourense. diego.herrero.alonso@uvigo.es
6 Departamento de Historia, Universidad de Oviedo (UNIOVI), C/ Amparo Pedregal, s/n, 33011 Oviedo. lopeztcristina@uniovi.es
7 Programa de Doctorado en Patrimonio, Sociedades y Espacios de Frontera, Universidad de Zaragoza (UNIZAR), C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. hugohdezhdez@hotmail.com
8 Departamento Prehistoria y Arqueología, Universidad Autónoma de Madrid (UAM), C/ Tomás y Valiente 2, 28049 Madrid. nuria.castanneda@uam.es

Palabras clave: Cartografía, Recursos minerales, Minería prehistórica, Sílex de Treviño, Rocas silíceas.

Resumen

Las calizas lacustres-palustres del Mioceno de la Sierra de Araico (Condado de Treviño, Burgos - Berantevilla, Álava) se ubican en el sinclinal surpirenaico de Miranda-Treviño (Cuenca Vasco-Cantábrica). En estos relieves carbonatados afloran varias decenas de horizontes silicificados que aparecen con morfologías estratiformes (silcretas de origen palustre) y nodular (sílex de origen lacustre) que han sido explotados intensamente durante la Prehistoria. Se presenta una cartografía de alta resolución donde se han mapeando accidentes estructurales generalmente marcados por los resaltes originados por las líneas de capa, junto a rasgos de modelado antrópico reflejo de las explotaciones: fundamentalmente trincheras superficiales y escombreras de diversos tipos, etc. Son rellenos mineros que al ser tan antiguos (5.000-6.000 años), se encuentran integrados en el paisaje siendo de difícil identificación. La utilización de modelos de sombras 3D generados con LiDAR se utiliza como una herramienta poderosa para mapear dichos indicios. Actualmente los escombros mineros tapan los afloramientos de sílex de modo que es difícil, a primera vista, darse cuenta de la trascendencia que tuvieron estos afloramientos como lugar de explotación de este recurso mineral tan importante en la Prehistoria. Estos sílex se han difundido por toda la Cornisa cantábrica, Pirineo occidental y Cuenca Aquitana, constituyendo uno de los principales sílex trazadores de la Prehistoria en la Península Ibérica.

Abstract

The Miocene lacustrine-palustrine limestones of the Sierra de Araico are located in the syncline of Miranda-Treviño (Basque-Cantabrian Basin). In these carbonate reliefs there are several tens of silicified horizons that appear with stratiform morphologies (silcretes) and nodular (flint) that have been intensively exploited in Prehistory. A high-resolution cartography using LiDAR is presented, mapping the structural forms and anthropic modeling reflecting mining exploitations. The particularity of the mining landfills is that, being so old (5,000-6,000 years), they are integrated into the landscape and are difficult to identify. Nowadays, mining debris covers the flint outcrops so that it is difficult to realize the importance that these outcrops had as a place of exploitation of this mineral resource so important in Prehistory. These flints have spread throughout the Cantabrian Coast, the western Pyrenees and the Aquitaine Basin, constituting one of the main flint tracers of Prehistory in the Iberian Peninsula.

Contexto geoarqueológico de los sistemas de molienda del cuarzo aurífero en la minería romana del noroeste ibérico.

Geoarchaeological context of gold quartz milling systems in Roman mining in the Iberian northwest.

R. Matías Rodríguez[1]

1 SEDPGYM. matiasr.roberto@gmail.com

Palabras clave: minería aurífera romana, molinos cuarzo aurífero, noroeste ibérico.

Resumen:

La minería aurífera romana del noroeste ibérico destaca por la huella resultante de las extensas explotaciones hidráulicas y redes kilométricas de canales dejadas con profusión a lo largo y ancho de este singular territorio. La concentración gravimétrica simple fue el método de trabajo aplicado en la recuperación del oro de estos yacimientos, bien en sedimentos aluviales, bien en las zonas de oxidación (eluviales) de depósitos primarios, sin la intervención de otro tratamiento que la separación por densidades en unos canales de lavado. Sin embargo, la explotación de los numerosos yacimientos auríferos primarios existentes en este entorno supuso un desafío diferente, ya que el oro debía de ser liberado de la matriz que lo contenía, generalmente cuarzo o rocas silicificadas, que se caracterizan por una excepcional dureza a la hora de ser machacadas y trituradas para ser reducidas a polvo. Este aspecto ya fue recogido en el texto del naturalista romano Plinio el Viejo (PLIN.Nat.33.69 en Pérez y Matías, 2008), indicando incluso una terminología específica. La molienda era realizada en dos procesos diferentes en los que se emplearon materiales rocosos seleccionados por sus características mecánicas, algunos de los cuales procedían del entorno geológico inmediato, si bien, se constata la traslación de algunos materiales desde decenas de kilómetros, incluso cientos, en casos concretos. En este trabajo se ponen de manifiesto por primera vez con una visión de conjunto las características principales de los materiales geológicos utilizados sistemáticamente en la molienda del cuarzo aurífero, estableciendo una relación entre la disponibilidad en el entorno geológico y las explotaciones auríferas romanas, así como los criterios de selección para ser integrados en el proceso de molienda.

Abstract:

Roman gold mining in the Iberian northwest stands out for the footprint resulting from the extensive hydraulic operations and kilometer networks of canals left in profusion throughout the length and breadth of this unique territory. The simple gravimetric concentration was the working method applied in the recovery of gold from these deposits, either in alluvial sediments or in oxidation zones (eluvial) of primary deposits, without the intervention of any other treatment than separation by densities in some washing channels. However, the mining of the numerous existing primary gold deposits in this environment posed a different challenge, since the gold had to be released from the matrix that contained it, generally quartz or silicified rocks, which are characterized by exceptional resistance when crushed to be reduced to powder. This aspect was already included in the text of the Roman naturalist Pliny the Elder (PLIN.Nat.33.69)*, even indicating a specific terminology. The milling was carried out in two different processes in which rock materials selected for their mechanical characteristics, some of which came from the immediate geological environment, although the transfer of some materials from tens of kilometers, even hundreds, in specific cases. In this work they are revealed for the first time with an overview of the main characteristics of the geological materials used systematically in the milling of gold-bearing quartz, establishing a relationship between the availability in the geological environment and gold mining, as well as the selection criteria to be integrated into the milling process.

Key words: roman gold mining, gold-bearing quartz mills, Iberian northwest

Pérez, M. y Matías, R. (2008). Plinio y la minería aurífera romana: nueva traducción e interpretación de Plin.*Nat.*33.66-78. *Cuadernos de Filología Clásica. Estudios Latinos* 28 (1), 43-58.

La Cultura de las Motillas de la Edad del Bronce de La Mancha y su relación con el evento climático 4.2 ka cal BP.

The Motilla Culture of the Bronze Age of La Mancha and its relationship with the climatic event 4.2 ka cal BP.

M. Mejías[1], L. Benítez de Lugo Enrich[2]

1 CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. m.mejias@igme.es, ORCID: 0000-0001-6084-3067
2 Universidad Complutense de Madrid. c/ Profesor Aranguren s.n. 28040 Madrid. luis.benitezdelugo@ucm.es. ORCID: 0000-0003-2000-6293

Resumen: Los primeros estudios arqueológicos sobre la Cultura de las Motillas de la Edad del Bronce de La Mancha se inician hace poco más de cuatro décadas. Desde entonces, diversos organismos públicos de investigación y universidades han intentado encontrar explicación a las causas del origen, evolución y desaparición de este singular grupo humano que habitó La Mancha durante la Prehistoria Reciente. Los últimos avances en investigación pluridisciplinar (Geología, Hidrogeología y Arqueología) permiten establecer un marco de desarrollo de esta Cultura basado en tres elementos principales: i) las motillas, muy probablemente, son el más antiguo sistema de captación de agua subterránea establecido en Europa; ii) la implantación de esta red de pozos estuvo relacionada con una crisis climática que hizo desaparecer de forma generalizada las aguas superficiales durante un largo periodo de tiempo, relacionado con el Evento Climático 4.2 ka BP y iii) las motillas forman *tells* muy similares a los túmulos funerarios y contienen enterramientos en su interior.

Palabras clave: agua subterránea, crisis climática, Edad del Bronce, La Mancha, motillas

Abstract: *The first archaeological studies on the Motilla Culture of the Bronze Age of La Mancha began a little more than four decades ago. Since then, various research public organizations and universities have tried to find an explanation for the causes of the origin, evolution and disappearance of this unique human group that inhabited La Mancha during Recent Prehistory. The latest advances in multidisciplinary research: Geology, Hydrogeology and Archaeology, allow us to establish a framework for the development of this Culture based on three main elements: i) the motillas, most probably, are the oldest groundwater collection system established in Europe; ii) the implementation of this network of wells was related to a climate crisis that caused surface waters to generally disappear for a long period of time, related to the 4.2 ka BP Climate Event and iii) the motillas form tells very similar to the burial mounds and contain burials in their interior.*

Key words: *Bronze Age, climate crisis, groundwater, La Mancha, motillas*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La Mancha es una comarca natural de la meseta sur de la península ibérica. Está delimitada por los relieves de Sierra Morena al sur, los Montes de Toledo al norte y oeste, y la Serranía de Cuenca al noreste. Se trata de un altiplano básicamente llano, con una altitud entre 600 y 700 m; los principales cursos fluviales son el Guadiana, el Záncara, el Cigüela y el Júcar.

Durante la Edad del Bronce, La Mancha estuvo habitada por uno de los principales complejos culturales de la Península Ibérica: la Cultura de las Motillas (Benítez de Lugo Enrich y Mejías, 2017; Mejías et al. 2020). El nombre de este grupo humano proviene del tipo de yacimiento arqueológico característico de la Edad del Bronce manchega: la motilla. Se trata de yacimientos caracterizados por recintos irregulares de mampostería caliza y tapial, de planta circular y, en algunos casos, torre central. Fueron construidos donde era posible acceder al nivel freático de los acuíferos con la tecnología prehistórica. El primer inventario de estos sitios se presentó en 2010 (Benítez de Lugo Enrich 2010), actualmente se conocen 45 motillas (figura 1) (Benítez de Lugo Enrich y Mejías 2022).

Las investigaciones realizadas hasta el momento ponen de manifiesto la influencia del evento climático 4,2 ka cal BP en el origen de esta Cultura, que provocó un periodo de estrés ambiental iniciado a finales del Calcolítico.

Los escasos datos arqueológicos disponibles sobre las comunidades que vivieron en La Mancha durante el

Calcolítico revelan un territorio de pequeños poblamientos situados cerca de cursos de agua, cuyos muertos eran depositados, por lo general, en enterramientos individuales en hoyos o colectivos, primarios o secundarios, ubicados en abrigos o cuevas funerarias. El inicio de la Edad del Bronce trajo intensos cambios sociales a La Mancha. Hacia el 2350 cal BC las precipitaciones disminuyeron drásticamente durante varios siglos, en un evento bien estudiado y descrito a nivel mundial -el evento climático 4,2 ka cal BP-, que en La Mancha se ha constatado en yacimientos arqueológicos como la motilla de El Azuer y Castillejo del Bonete (Terrinches, Ciudad Real) (Mejías et al. 2020).

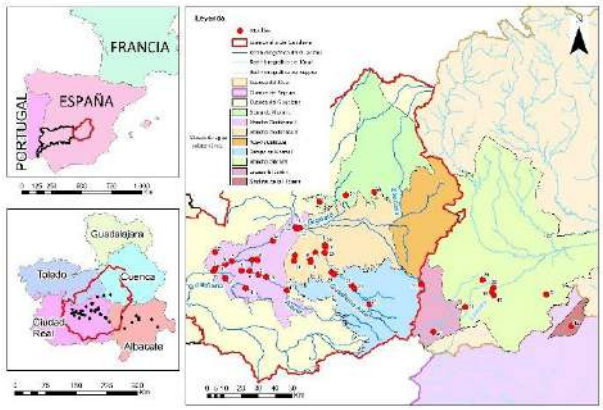


FIGURA 1. *Localización de las motillas en la llanura manchega: 1. El Quintillo, 2. Torralba, 3. El Cura, 4. Las Cañas, 5. La Albuera, 6. Daimiel, 7. La Máquina, 8. Zuacorta, 9. La Vega Media, 10. El Azuer, 11. Los Palacios, 12. La Vega, 13. El Espino, 14. Pedro Alonso, 15. Los Romeros, 16. Brocheros, 17. Casa de Mancha, 18. Barrios, 19. Perales, 20. La Membrilleja, 21. El Juez, 22. Santa María, 23. El Retamar, 24. La Moraleja, 25. Laguna de Cueva Morenilla, 26. La Jacidra, 27. El Morrión, 28. El Pedernoso, 29. El Acequión, 30. El Cuervo, 31. Malvecinos, 32. Pedregosas, 33. Camino de Herradero I, 34. Camino de Herradero II, 35. Huerta de Triviño, 36. Antonino, 37. Malagón, 38. Ojo de San Jorge, 39. Hoya Vacas, 40. Gorrineras, 41. Balazote, 42. Hoya Rasa, 43. Prado Viejo, 44. Chavillo, 45. Arquillo.*

En la motilla más estudiada, la situada en el río Azuer (figura 2), los arqueólogos han encontrado evidencias de su uso durante casi un milenio. La construcción de la torre, y su impresionante pozo, ha sido fechada precisamente en el inicio del evento climático referido. Entre 2000 y 1800 cal BC, los habitantes de La Mancha tuvieron que afrontar los rigores más extremos de la aridez del evento climático de 4,2 ka cal BP. Posteriormente, los niveles de humedad se recuperaron progresivamente hasta que esta motilla quedó deshabitada. Sólo en la última fase de habitación del yacimiento (1600-1350 cal a. C.) se ha informado de viviendas en los espacios exteriores en torno a la motilla, como lugar de residencia, pero no se ha descrito ningún asentamiento en torno a la motilla durante sus primeros siglos de existencia.

Cuando el periodo de aridez extrema fue llegando a su final y se incrementaron las precipitaciones, los ríos y manantiales comenzaron a recuperar un caudal permanente y las motillas, instaladas en lugares estratégicos y en circunstancias ambientales muy concretas, perdieron su razón de ser y se vieron inundadas por los cauces superficiales sobre los que, en ellos mismos o en sus proximidades, se asentaban. Los zócalos de sus muros, hechos de simple barro, se erosionaron. La humedad ascendió por capilaridad, desintegrando las paredes. Sus pozos de agua dulce, perforados en los cauces de los ríos, o muy cerca de ellos, se inundaron de agua superficial fangosa y hacia el 1350 cal a. C. la Cultura de las Motillas desapareció, dando paso a algunos siglos poco comprendidos durante la Edad del Bronce Final, prácticamente carentes de información arqueológica. Sólo bien entrado el I milenio a.C. se vuelve a detectar un territorio socialmente organizado en torno a los *oppida* de la Edad del Hierro. Este colapso cultural de la Edad del Bronce Final no se limita sólo a la Cultura de las Motillas; es un fenómeno que también se puede observar en la Cultura Argárica, en el sur y este de la península ibérica.



FIGURA 2. *Vista aérea de la motilla de El Azuer, destacando el pozo y la torre (Servicio de trabajos aéreos del CN IGME-CSIC)*

LAS MOTILLAS Y EL AGUA SUBTERRÁNEA

Desde las primeras investigaciones en estos yacimientos, los arqueólogos se preguntaban por qué las motillas se ubican de una manera tan singular. Se elucubraron consideraciones de defensa, comunicación ganadera u organización social. Pero fue prácticamente hace una década cuando la conjunción de estudios arqueológicos, geológicos e hidrogeológicos revelaron un patrón lógico sobre la construcción y uso de estos enclaves (Benítez de Lugo Enrich y Mejías 2017; Mejías et al. 2014).

Su ubicación, cerca o sobre los cauces de los ríos, aseguraba inicialmente el abastecimiento de agua, ya sea por la proximidad al recurso o mediante la excavación de pozos en épocas secas, cuando el agua superficial dejaba de fluir por los cauces y el río desaparecía, dejando el nivel freático poco profundo. La hidrogeología local puso de manifiesto que las calizas del Plioceno o los materiales carbonatados del Jurásico y Cretácico, que forman respectivamente los acuíferos regionales superior e inferior de la llanura manchega, constituían el objetivo a alcanzar por los constructores de los pozos de las motillas, para garantizar el abastecimiento de agua a los

asentamientos manchegos de la Edad del Bronce. Las motillas se construyeron allí donde se podía alcanzar el nivel freático del acuífero regional con la tecnología disponible en la época. No necesariamente todas las motillas se ubican sobre los cauces de los ríos o en medio de lagunas; algunas se sitúan en zonas de la llanura manchega desde la que se podía acceder al agua subterránea simplemente cavando un pozo de unos metros de profundidad y alcanzando el nivel freático.

Ante esta nueva hipótesis, las explicaciones sobre la ubicación de las motillas necesariamente debían modificarse con respecto a las exclusivamente arqueológicas. Estos emplazamientos no fueron construidos en asociación con caminos o vías pecuarias, como se ha demostrado en trabajos anteriores (Benítez de Lugo Enrich et al. 2022). Tampoco se encontraban en lugares estratégicos por sus características defensivas, ya que a menudo se encuentran en enclaves hundidos, sin control visual y dominados por las terrazas y cerros circundantes, como en El Retamar (Benítez de Lugo Enrich et al. 2022) (figura 3) o El Acequión. Esta última no fue construida sobre "un pequeño islote", ni se debe imaginar siempre rodeada de agua (Fernández-Posse et al. 1996). La motilla fue construida cuando la laguna se había secado y sin dominar visualmente el entorno desde ningún promontorio. La elevación es artificial; se trata de un *tell* formado por las ruinas del propio asentamiento, que se instaló en el fondo mismo de la laguna cuando ésta se encontraba seca. Así lo demostró en 2014 la investigación impulsada por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y el Instituto Geológico y Minero de España (Mejías et al., 2015).

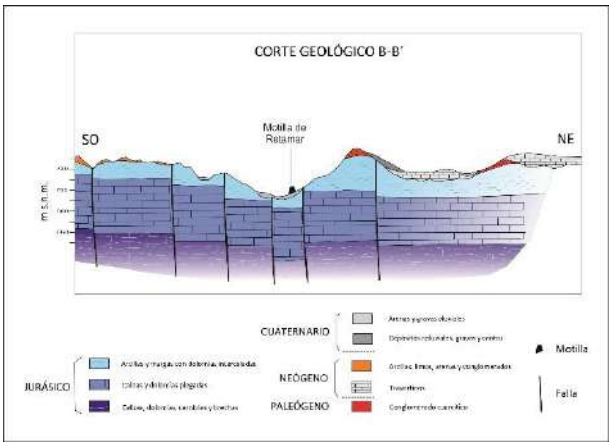


FIGURA 3. *Posición topográfica de la motilla de El Retamar sobre perfil geológico*

Los habitantes de La Mancha de la Edad del Bronce tampoco construyeron las motillas buscando rodearlas de agua para su defensa, como era el objetivo, por ejemplo, en los castillos medievales. Imaginar el paisaje manchego en el año 2000 a.C. tal como es hoy es una interpretación presentista que induce al error. Los humedales manchegos, además de resultar insalubres y, por tanto, poco atractivos para la instalación de asentamientos en su interior, eran difíciles de transitar. Construir un asentamiento en medio de una zona encharcada y pantanosa resulta difícil de entender, a menos que este ambiente hubiera estado seco durante mucho tiempo debido a un evento climático.

La Cultura de las Motillas de la Edad del Bronce de La Mancha puede considerarse la primera cultura hidráulica de Europa diseñada para extraer agua del subsuelo. La torre central detectada, y reconstruida, en la motilla de El Azuer podría haber sido utilizada para extraer y distribuir agua del acuífero mediante la fuerza de la gravedad. Probablemente esto se hizo mediante un sistema similar al magrod.

Hasta el momento, la existencia de pozos sólo ha sido confirmada por excavaciones arqueológicas en la motilla de El Azuer (figura 2). Sin embargo, mediante estudios geofísicos de superficie se han obtenido lecturas de resistividad eléctrica compatibles con pozos ya colmatados en otras cinco motillas: La Vega (Teixidó et al. 2013), El Cura, Santa María, El Retamar y El Acequión (Ibarra, 2015). En consecuencia, la existencia de pozos que alcancen el nivel freático del acuífero regional dentro de estos asentamientos parece ser el patrón determinante de la Cultura de las Motillas.

Para proteger estos pozos de las escorrentías provocadas por inundaciones ocasionales, hacia el final del evento climático 4,2 ka cal BP, debieron construirse los muros que rodean las motillas. Estos se interpretaron arqueológicamente como muros de fortificación, pero no todos los muros tienen por qué tener una función defensiva. Esto resulta especialmente cierto si no son verticales, y de mampostería irregular y ataludados, accesibles, por tanto, como ocurre en los que rodean las motillas. Más que verlos en términos militares, se pueden interpretar como diques, como señaló en 1996 el equipo de investigación de la motilla de El Acequión: "(...) el muro más exterior está construido con una fuerte pendiente hacia el exterior que funciona como un dique contra las aguas de la laguna" (Fernández-Posse et al. 1996).

CONCLUSIONES

El origen y razón de ser de la Cultura de las Motillas ha sido explicado de forma consistente y novedosa, gracias a recientes investigaciones interdisciplinares y con el propósito de superar las incongruencias y lagunas existentes en su interpretación tradicional. El final del Calcolítico no trajo a este territorio un colapso cultural como sucedió en otras regiones, aunque sí supuso un cambio importante, mediante el cual una comunidad autóctona resiliente incorporó ingeniosas soluciones tecnológicas y sociales para sobrevivir en un momento de crisis climática, probablemente con influencias procedentes del este de Europa. En ese contexto surgió en La Mancha una nueva cultura con instalaciones hidráulicas novedosas como fueron las motillas, que requirieron para su gestión una sociedad cada vez más jerarquizada. Esa desigualdad creciente se ha detectado a varios niveles: en la organización del territorio (asentamientos) y en el ámbito funerario (aspectos simbólicos y rituales).

Hasta ahora se conoce que las personas muertas de la Cultura de las Motillas se enterraban en poblados fortificados en altura, como La Encantada, o en motillas, como la del Azuer, El Acequión o El Retamar. Recientemente se ha descubierto una nueva clase de lugares sagrados, que son monumentales y dispuestos para observar las estrellas (la Cruz del Sur y los solsticios), que fueron ubicados en lugares de alta visibilidad y dotados de un claro componente funerario. Dos ejemplos son Castillejo del Bonete, en Campo de Montiel (Ciudad Real), y Bocapucheros, en Campo de Calatrava (Ciudad Real). No toda la población se enterró aquí; sólo unos pocos individuos tuvieron acceso a enterrarse en estos monumentos. En ellos se articuló un discurso visual y simbólico dirigido a legitimar la apropiación del territorio utilizando como recurso argumental a los difuntos. 'Esta tierra es nuestra y nos pertenece; estamos aquí desde siempre; así lo demuestran nuestros ancestros, aquí presentes'. Ese mensaje se lanzaba visualmente a kilómetros de distancia a través de lugares estratégicos de paso, con gran visibilidad.

Es importante haber detectado la existencia de este discurso simbólico en el Bronce de La Mancha, porque puede haber estado presente también en las motillas. Difícilmente se explican si no los 65 individuos enterrados alrededor del pozo de agua dulce en la de El Azuer. Los muertos pudieron haber proporcionado legitimidad y fuerza a los propios y un claro mensaje a los extraños: 'este pozo es nuestro'.

Karl Wittfogel fue un historiador teórico alemán que, a mediados del siglo XX, acuñó el concepto 'despotismo hidráulico'. En su opinión, el control de un recurso básico como es el agua mediante grandes edificios hidráulicos pudo haber sido un elemento clave en el comienzo de la sociedad de clases, en lo que él denominó las 'civilizaciones hidráulicas'. En su opinión, las primeras sociedades complejas en diferentes lugares del mundo requirieron la organización de trabajo forzado a gran escala para construir infraestructuras hidráulicas, definiendo él teóricamente a unos 'déspotas hidráulicos' quienes, a través diferentes medios, habrían reforzado su poder como líderes. Las personas leales tendrían más acceso al agua y serían más prósperos que los menos fieles. Quien tiene el agua tiene el poder; más agua significa más riqueza. También que los bienes producidos con esta agua deben ser defendidos frente a la codicia de otros grupos. Así fue en La Mancha de la Edad del Bronce. Para Wittfogel, una situación de este tipo pudo suponer el origen del Estado como organización que requería tanto un liderazgo claro como un cuerpo de personas competentes, instruidas y organizadas; el origen de algo parecido a lo que más adelante serían la Administración o el Ejército. Esta organización tendría como función principal deslegitimar o aplastar a cualquiera que discutiera o se movilizara contra ese Estado.

Realmente este marco teórico encaja bastante certeramente con lo que hoy se conoce de la Cultura de las Motillas, la primera civilización hidráulica de Europa.

REFERENCIAS

Benítez de Lugo Enrich, L. (2010). Las motillas y el Bronce de La Mancha. Anthropos, Valdepeñas.

Benítez de Lugo Enrich, L., Mejías Moreno, M. (2017). The hydrogeological and paleoclimatic factors in Bronze Age Motillas Culture of La Mancha: the first hydraulic culture in Europe. *Hydrogeology Journal*, 25: 1931-1950. 10.1007/s10040-017-1607-z.

Benítez de Lugo Enrich, L. and Mejías Moreno, M. (2022). Climatic crisis, socio-cultural dynamics and landscape monumentalization during the Bronze Age of La Mancha: the Motillas Culture as adaptation to the changes of the end of the 3rd mill. BC. En: *Landscapes as resources assemblages in the Bronze Age of Southern Spain* (Bartelheim, M., Contreras, F., Hardenberg, R. Eds.). *Ressourcen Kulturen* 17: 165-179. Universität Tübingen, Tübingen. http://dx.doi.org/10.15496/publikation-66226.

Benítez de Lugo Enrich, L., Mederos Martín, A., Esteban López, C., Fuentes Sánchez, J.L., Galindo-Pellicena, MªA., Menchén Herreros, G., Moraleda Sierra, J., Peña Romo, Mª V. (2022). "Bocapucheros (Almagro, Ciudad Real): nuevo tipo de enterramiento tumular en la Cultura de las Motillas". *Spal*, 31(2): 31-74. ISSN: 1133-4525.https://doi.org/10.12795/spal.2022.i31.19

Fernández-Posse, M.D., Gilman, A., Martín Morales, C. (1996). Consideraciones cronológicas sobre el Bronce de La Mancha. *Complutum Extra*, 6 (II): 111-137.

Ibarra, P. (2015). Prospección geofísica aplicada al estudio de las motillas de la Edad del Bronce de La Mancha. En: *Arqueología, Hidrogeología y Medio Ambiente en la edad del Bronce de La Mancha: la Cultura de las Motillas* (Mejías, M., Benítez de Lugo Enrich, L., López Sáez, J.A., Esteban, C. Eds.) pp. 45-50. IGME, Madrid.

Mejías, M., Benítez de Lugo Enrich, L., Del Pozo, J., Moraleda, J. (2014). Los primeros aprovechamientos de aguas subterráneas en la Península Ibérica. Las motillas de Daimiel en la Edad del Bronce de La Mancha. *Boletín Geológico y Minero*, 125: 455-474.

Mejías, M., Martínez, C., Benítez de Lugo Enrich, L., Del Pozo (2015). Hidrogeología aplicada al estudio de la Edad del Bronce de La Mancha. En: *Arqueología, hidrogeología y medio ambiente en la Edad del Bronce de La Mancha. La Cultura de las Motillas* (Mejías, M., Benítez de Lugo Enrich, L., López Sáez, J.A., Esteban, C. Eds.), pp. 57-66. IGME, Madrid.

Mejías, M., Benítez de Lugo, L., López Saéz, J.A., Lillios, K.T. (2020). La Cultura de las Motillas de La Mancha: testigos del Evento Climático 4.2 ka cal BP. *Boletín Geológico y Minero*, 131: 91-110.

Teixidó, T., Artigot, E. G., Peña, J.A., Molina, F., Najera, T., Carrion, F. (2013). Geoarchaeological Context of the Motilla de la Vega Site (Spain) Based on Electrical Resistivity Tomography, *Archaeological Prospection*, 20: 11-22.

Nuevas dataciones de las terrazas del Río Arlanzón por RPE usando el centro de Titanio (Cuenca del Duero, España).

New ESR Ti ages of the fluvial terraces of Arlanzón River (Duero basin, Spain.

D. Moreno[1*], I. Hernando-Alonso[1], A. Benito-Calvo[1], A.I. Ortega[1,2], E. Carbonell[3, 4] J.M. Bermúdez de Castro[1]

[1]Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos (Spain). davinia.moreno@cenieh.es, isabel.hernando@cenieh.es, alfonso.benito@cenieh.es, anaisabel.ortega60@gmail.com, josemaria.bermudezdecastro@cenieh.es
[2] Fundación Atapuerca, Calle Crta. De Logroño 44, 09198 Ibeas de Juarros, Burgos (Spain)
[3] Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social (IPHES), Edificio W3, Campus Sescelades URV, Zona Educacional 4, 43007 Tarragona (Spain). ecarbonell@iphes.cat
[4] Universitat Rovira i Virgili, Campus Sescelades URV, Zona Educacional 4, 43007 Tarragona (Spain)
congreso_geologico@uhu.es

Palabras clave: Atapuerca, Geocronología, terrazas fluviales, Resonancia Paramagnética Electrónica,

Resumen

La Sierra de Atapuerca, en el NE de la Cuenca del Duero, alberga los restos fósiles más antiguos de Europa conservados en un sistema endokárstico multinivel. Los estudios geomorfológicos vinculan los niveles de las cuevas de Atapuerca con las terrazas del río Arlanzón, comprendidas entre T2 (+82-91 m) y T6 (+44-46 m). Establecer un marco cronológico preciso para el sistema de catorce terrazas del río Arlanzón es crucial para comprender la conexión con Atapuerca y la incisión hidrográfica de la cuenca del Duero. Un estudio de ESR anterior dató las terrazas del Arlanzón T3 (+70-78 m), T4 (+60-67 m) y T5 (+50-58 m), utilizando solo el centro de Aluminio (Al). Actualmente, las edades de Al pueden ser interpretadas como fechas máximas, especialmente cuando no se disponen de mediciones del centro de Titanio (Ti), que sirven para evaluar si la señal de Al se blanqueó correctamente. Para mejorar este marco cronoestratigráfico, se recolectaron ocho muestras de ESR entre T2 (+84-88 m) y T5 (+50-58 m) para fecharlas utilizando ambos centros paramagnéticos. Los resultados iniciales indican edades del Pleistoceno inferior para T2 (+82-91 m), T3 (+70-78 m) y, T4 (+60-67), mientras que T5 (+50-58 m) habría formado en el Pleistoceno medio. Estos resultados concuerdan con el contexto geológico y las edades previas de ESR del valle del Arlanzón.

Abstract

The Sierra de Atapuerca, in NE Duero basin (Spain), houses the oldest fossil remains in Europe within a multilevel endokarst system. Geomorphological studies link the Atapuerca cave levels to Arlanzón River terraces between T2 (+82-91 m) and T6 (+44-46 m). Establishing a precise chronological framework for the fourteen-stepped terrace system of the Arlanzón River is crucial for understanding the connection with the Atapuerca site and the Duero basin hydrographic incision. A previous ESR study dated Arlanzón terraces T3 (+70-78 m), T4 (+60-67 m), and T5 (+50-58 m) using only the Aluminium (Al) centre. Al ages can currently be interpreted as maximum dates, especially in the absence of Titanium-centre measurements, which are used to assess whether the Al signal has been properly bleached. To enhance this chronostratigraphic framework, eight ESR samples between T2 (+84-88m) and T5 (+50-58 m) were collected to be dated using both paramagnetic centres. Initial results indicate Lower Pleistocene ages for T2 (+84-88 m) and T3 (+70-78 m) and T4 (+60-67 m), while T5 (+50-58 m) was deposited in the Middle Pleistocene age. These results align with geological context and previous ESR ages of Arlanzón valley.

Datación de un testigo de sedimentos del lago Parinacochas (Perú) en el Laboratorio de Radiaciones Ionizantes y Datación de la Universidad de Salamanca.

Dating of a sediment core of Parinacochas Lake (Perú) at the Ionizing Radiation and Dating Laboratory of the University of Salamanca.

A. Parra[1], D. Ochoa[1], B. Quintana[2] y J-A. Flores[1]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. 37008 Salamanca. idu048683@usal.es, diana.ochoa@usal.es, flores@usal.es
2 Departamento de Física Fundamental, Laboratorio de Radiaciones Ionizantes-Datación, Universidad de Salamanca. 37007 Salamanca. quintana@usal.es

Palabras clave: Sedimentos lacustres, dataciones, ^{14}C, ^{210}Pb, paleoclimatología.

Resumen

Se obtuvo un núcleo de 50 cm de longitud del lecho del lago Parinacochas (Perú) con el propósito de conocer los patrones de variabilidad climática de escala decadal y secular en el suroccidente de los Andes peruanos, evaluar su relación con la corriente de Humboldt y las dinámicas de precipitación en la costa pacífica peruana. Para ello, el grupo de Geociencias Oceánicas y el Laboratorio de Radiaciones Ionizantes y Datación (LRI-D) de la USAL planean llevar a cabo dataciones de alta resolución por ^{14}C y ^{210}Pb, que permitan establecer un modelo de edad robusto, necesario para la adecuada caracterización y análisis de los sedimentos. La datación de restos vegetales (obtenidos del sedimento), por el método de ^{14}C se llevará acabo con el MICADAS (Mini Carbon Dating System), que es un espectrómetro de masas con acelerador (AMS) que permite medir de manera muy precisa pequeñas cantidades de ^{14}C. Los resultados obtenidos mediante pruebas efectuadas con muestras diversas han arrojado resultados de alta fiabilidad. En tanto que, la datación de los sedimentos por ^{210}Pb, se realizará usando "Mazinger", un espectrómetro γ de muy bajo fondo y alta eficiencia que consta de dos detectores HPGe de amplio rango energético, así como de blindajes pasivos y activos, situado a 15 m.w.e. La naturaleza del registro y la calidad del modelo de edad permiten suponer además cambios climáticos y ambientales de las últimas décadas, por lo que se podrá evaluar el efecto antropogénico sobre el sistema lacustre desde épocas incaicas.

Abstract

A 50 cm long core was obtained from the bed of Lake Parinacochas (Peru) with the purpose of knowing the patterns of climate variability on a decadal and secular scale in the southwest of the Peruvian Andes and evaluating their interrelation with the Humboldt Current and the Precipitation dynamics on the Peruvian Pacific coast. To this objective, the Ocean Geosciences Group and the Ionizing Radiation and Dating Laboratory (LRI-D) of the USAL are planning to carry out a high-resolution dating by ^{14}C and ^{210}Pb, in order to establishing a robust age model, necessary for an adequate characterization and analysis of sediments. The dating of plant remains (obtained from sediment), by the ^{14}C method, will be carried out with the MICADAS (Mini Carbon Dating System), which is an accelerator mass spectrometer (AMS) that allows very precise measurements of small amounts of ^{14}C. The results obtained through tests carried out with diverse samples have yielded highly reliable results. Meanwhile, ^{210}Pb sediment dating will be carried out using the Mazinger, a γ-ray spectrometry system of high efficiency and very low background with two HPGe detectors, with a wide energy range, and passive and active shields, located 15 m.w.e. The nature of the record and the quality of the age model allow us to assume climatic and environmental changes in recent decades; the anthropogenic effect on the lake system since Inca times can be evaluated.

Evaluación del ciclo minero del oro galaico-romano desde la experiencia de dos siglos de investigación geológica y minera tecno-industrial.

Evaluation of the Gallaecian-Roman gold mining cycle from the experience of two centuries of geological and techno-industrial mining research.

O. Pazos

oscar_pazos@hotmail.com

Palabras clave: minería antigua, minería moderna, exploración minera, Gallaecia, romanización.

Resumen

El caso de la minería de oro galaico-romana no tuvo paralelo en la Antigüedad. En palabras de Plinio (HN 33-21-78) 'Según algunos, cada año, Asturia con Gallaecia y Lusitania producen veinte mil libras, siendo Asturia la mayor parte. Ningún lugar del mundo ha mantenido tal fertilidad durante tantas generaciones.'

La minería de oro galaico-romana no solo fue excepcional en la Antigüedad; más aun, con las lógicas científico-industriales y económicas de rentabilidad que han guiado la evolución de la minería global en los últimos siglos, resulta por completo incomprensible. La minería gallego-romana está más allá de nuestros parámetros históricos, y, por tanto, debemos buscar las explicaciones y significados de este extraordinario éxito minero en las particulares circunstancias geomineras, geográficas e históricas en las que se desarrolló dicha minería, como debemos tener en cuenta, las circunstancias arqueológicas a través de las cuales nos acercamos al período.

La comprensión e interpretación geominera de los paisajes mineros, así como de cada una de las minas y trabajos, no puede hacerse sin introducir el contexto general de la romanización y los contextos particulares históricos y geográfico-arqueológicos.

Abstract

The success of Gallaecian-Roman gold mining had no parallel in Antiquity. In the words of Pliny (HN 33, 21-78) 'According to some, each year, Asturia with Gallaecia and Lusitania produce twenty thousand pounds, Asturia being the largest part. No place in the world has maintained such fertility for so many generations.'

Gallaecian-Roman gold mining was not only exceptional in Antiquity, it is incomprehensible to the scientific-industrial and economic logics of profitability that have guided the evolution of global mining in recent centuries. Gallaecian-Roman mining is beyond our modern historical parameters, and therefore, we must seek the explanations and meanings of this extraordinary mining success in the particular geo-mining, geographical and historical circumstances in which said mining was developed, as we must take into account the archaeological circumstances through which we approach the period.

The geomining understanding and interpretation of the mining landscapes, as well as each of the mines and works, cannot be done without introducing the general context of Romanization and the particular historical and geographical-archaeological contexts.

Referencias

C. Plinio Secundo: Naturalis Historia: Liver 33, 21-78.
[https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Pliny_the_Elder/home.html]

Geoarqueología desde el Antropoceno.

Geoarchaeology from Anthropocene.

O. Pazos

oscar_pazos@hotmail.com

Palabras clave: Antropoceno, Geoarqueología.

Resumen

En las últimas décadas la investigación arqueológica ha ampliado el foco de su interés tradicional en la Prehistoria y la Historia Antigua para constituirse como una disciplina de la Historia Material de la Humanidad en cualquier época, incluso en el presente (González-Ruibal, 2006), una apertura que las reflexiones alrededor del Antropoceno han llevado al extremo de querer incluir también las creaciones inmateriales humanas, o al menos a la necesidad de hacerlo (Campbel, 2021). Por el momento, sin embargo, no parece que haya habido una reflexión semejante por quienes nos aplicamos a la Arqueología procedentes de la Geología. En mi opinión, esto tiene que ver con la tradición doctrinal de la Geología como 'ciencia natural', aplicada específicamente al estudio de la parte mineral de la naturaleza. Nuestra aportación estrictamente 'geoarqueológica' a la Arqueología quedaría pues limitada a una posición meramente instrumental, apenas apta para resolver problemas muy específicos, principalmente como herramienta arqueométrica o paisajístico-ambiental, aunque siempre de modo contextual al genuino estudio arqueológico, que contendría la clave específica de lo humano. La total confusión de lo humano y lo natural del Antropoceno debería servir para cuestionar esta auto-limitación del tipo de aportaciones que podemos -y debemos- hacer a la Arqueología, no solo en la arqueología del presente, sino en la Historia Antigua y la Prehistoria.

Abstract

In recent decades, archaeological research has expanded the focus of its traditional interest in Prehistory and Ancient History to investigate the Material History of Humanity at any time, even in the present (González-Ruibal, 2006), an open-mindedness that the reflections around the Anthropocene have led to include human immaterial creations, or at least to the need to do so (Campbel, 2021). However, for the moment there has not been a similar reflection by those of us who apply ourselves to Archeology from Geology. In my opinion, this has to do with the doctrinal tradition of Geology as a 'natural science', applied specifically to the study of the mineral part of nature. Our strictly 'geoarchaeological' contribution to Archeology would therefore be limited to a merely instrumental position, barely suitable for solving very specific problems, mainly as an archaeometric or landscape-environmental tool, although always contextually to the genuine archaeological study, which would contain the specific key of the human. The total confusion of the human and the natural of the Anthropocene should serve to question this self-limitation of the type of contributions that we can - and should - make to Archaeology, not only in the archeology of the present, but in Ancient History and Prehistory.

Referencias

Campbell, P. (2021). *Antiquity* 95 (383), 1315-1330.
González-Ruibal, A. (2006). *Norwegian Archaeological Review39-2*, 110-125.

La procedencia de los sílex de los yacimientos magdalenienses de La Garma (Omoño, Cantabria).

The origin of the flint from the Magdalenian sites of La Garma (Omoño, Cantabria).

A. Tarriño[1], A. Chauvin[2] y P. Arias[3]

1 Dpto. Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Tomás y Valiente, s/n, 01006 Vitoria-Gasteiz (Álava), antonio.tarrinno@ehu.eus
2 Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria (MUPAC), Calle Ruiz de Alda, 19, 39009 Santander, adriana.chauvin@srecd.es
3 Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de Cantabria (IIIPC) (Universidad de Cantabria-Gobierno de Cantabria-Grupo Santander) Avda. de los Castros 52, 39005 Santander, pablo.arias@unican.es

Palabras clave: La Garma, Sílex, Materias primas, Galería inferior, Magdaleniense

Resumen

La Garma (Omoño, Ribamontán al Monte, Cantabria), atesora uno de los conjuntos arqueológicos más espectaculares de la Prehistoria europea, tanto por la relevancia como por la inusualmente amplia y completa secuencia de ocupaciones documentada, desde el Paleolítico Inferior a la Edad Media (Arias *et al*. 2000). Se ha analizado la procedencia del sílex de dos yacimientos magdalenienses del complejo arqueológico: 1) La Galería inferior, cuya entrada original bloqueada y sellada ofrece los hallazgos más relevantes con un yacimiento intacto de más de 500 m^2, donde se han analizado la totalidad de los 1.212 restos líticos de sílex recuperados en la Zona IV; y, 2) la Garma A, donde se han estudiado 252 piezas líticas de sílex del nivel L3. Se muestran las similitudes y diferencias de distribución de las materias primas silíceas gestionadas en los dos yacimientos contemporáneos. De este modo, llama la atención la desigual distribución de los diferentes trazadores litológicos cantábricos: Sílex del Flysch (Barrika, Vizcaya) y sílex de Piloña (Piloña, Asturias) con las significativas presencias de los sílex Tercis (Landas, Francia) y ausencia de sílex de Treviño (Condado de Treviño, Burgos) en la Galería inferior o la presencia de sílex de Treviño y ausencia del sílex de Tercis en La Garma A. También se constata una muy desigual distribución en ambos yacimientos de los sílex locales procedentes del Monte Picota (Liencres, Cantabria).

Abstract

La Garma (*Omoño, Ribamontán al Monte, Cantabria*) treasures one of the most spectacular archaeological complexes of European Prehistory, both for its relevance and for the unusually long and complete sequence of documented occupations, from the Lower Paleolithic to the Middle Ages (Arias et al. 2000). The origin of flint from two coeval Magdalenian sites of the archaeological complex has been analyzed: 1) The *Galería inferior*, whose original passage locked and sealed, provides the most relevant finds with an intact site of more than 500 m^2, where the totality of the flint lithic remains recovered in Zone IV (1,212 units) has been analyzed; and, 2) The *Garma A*, where 252 lithic flint pieces from level L3 of Magdalenian chronology have been also studied. The similarities and differences in the distribution of siliceous raw materials managed in the two contemporary sites are shown. Thus, the unequal distribution of the different Cantabrian lithological tracers draws attention: Flysch flint (*Barrika, Biscay*) and *Piloña* flint (*Piloña, Asturias*) with the significant presence of *Tercis* flint (*Landes*, France) and absence of *Treviño* flint (*Treviño, Burgos*) in the *Galería inferior* or the presence of *Treviño* flint and absence of *Tercis* flint in *La Garma A*. There is also confirm a very unequal distribution of local flint from *Monte Picota* (*Liencres, Cantabria*) in both sites.

Referencias

Arias Cabal, P., González-Sainz, C., Moure, A., Ontañón Peredo, R. (2000). La zona arqueológica de la Garma (Cantabria): Investigación, conservación y uso social. *Trabajos de Prehistoria* 57, 41-56.

Mapas geológicos de lugares de interés de las misiones MER-A y MARS2020. Cráter Gusev y Cráter Jezero (Marte)

Geological maps of sites of interest from the MER-A and MARS2020 missions. Gusev crater and Jezero crater (Mars)

R.S. Anangonó-Tutasig[1], J. Rodríguez Rodríguez[1], S. Iglesias Álvarez[1], Pérez Fernández[1], S. del Carmen Fernández[1]

1 Instituto Universitario de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA), C. Independencia 13, E-33004 Oviedo.
anangonoronny@gmail.com, rodriguezrjavier@uniovi.es, iglesiassantiago@uniovi.es, perezsaul@uniovi.es, fernandezmsusana@uniovi.es

Resumen: La cartografía geológica en los cuerpos planetarios, como Marte, es importante para la exploración planetaria. Cráter Gusev y Jezero son lugares de aterrizaje de las misiones de exploración de la NASA. Ambos cráteres presentan evidencias geológicas de que fueron antiguos lagos en el Noeico (~3.5 G.a), cuando posiblemente el agua circulaba por la superficie. Los primeros mapas de Gusev se realizaron con imágenes del térmico visible del instrumento THEMIS (*Thermal Emission Imaging System*), que, debido a su resolución espacial (200 m/píxel), no ofrecía grandes detalles de la superficie. Los mapas de cráter Jezero se han realizado con las imágenes CTX del instrumento *Contex Camera,* que ofrecen una mejor resolución espacial (5 m/píxel) para cartografiar la superficie. Para realizar esta cartografía se han identificado una serie de unidades que han sido diferenciadas por su tonalidad, rugosidad, cambios en su topografía y morfologías, que evidencian un cambio en la superficie. En este estudio mostramos una actualización de ambas cartografías que van a complementar los mapas ya existentes.

Palabras clave: Cartografía, Geología, Marte, Cráter, QGIS.

Abstract: Mapping the geology on planetary bodies, such as Mars holds crucial significance in the realm of planetary exploration. Gusev Crater and Jezero have been designated as landing sites for NASA's exploration missions. Both craters show geological evidence that they were ancient lakes in the Noachian (~3.5G. y) when water potentially flowed on the surface. The first maps of Gusev were made with visible thermal images from the Thermal Emission Imaging System (THEMIS) instrument. However, the spatial resolution of these images (200 m/pixel) limited the detailed surface information available. In contrast, the mapping of Jezero crater utilized CTX images from the Contex Camera instrument, boasting a superior spatial resolution (5 m/pixel), enabling a more precise surface mapping. During this mapping process a series of distinct units were identified based on variations in tonality, roughness, changes in their topography and morphologies that show a change in the surface. This study presents an updated cartography of both Gusev and Jezero, serving as a valuable complement to existing maps.

Key words: Mapping, Geology, Mars, Crater, QGIS.

INTRODUCCIÓN:

Cráter Jezero es lugar de aterrizaje de la misión Mars2020, siendo este un antiguo lago de ~45 km de diámetro, situado en el borde occidental de la cuenca de Isidis. Cráter Gusev es el lugar de aterrizaje de la misión MER-A, siendo este un antiguo lago de ~160 km de diámetro, situado en la desembocadura de Ma'adim Vallis, un gran valle de más de 900 km de longitud. Ambos cráteres comparten características morfológicas muy similares, ya que ambos presentan un delta bien conservado, valles de entrada y salida, un relleno de composición mafica principalmente, así como minerales hidratados y carbonatados. Antes del lanzamiento de ambas misiones, se realizaron diversas interpretaciones de la geología ambos cráteres. Los mapas realizados para cráter Gusev (Kuzmin *et al.,* 2000; Milam *et al.,* 2003) se generaron a partir de las imágenes visible THEMIS que ofrecen una resolución de 200m/pixel. Los mapas de cráter Jezero (Horgan *et al.,* 2019), siendo estos más recientes, se centraron en estudia la zona W de Jezero, donde se utilizaron las imágenes CTX, que ofrecen una resolución de 5m/pixel, obteniendo más detalles de las características geológicas de la superficie. Los mapas anteriores se habían generado a diversas escalas, distintos niveles de detalle y extensiones. En este trabajo presentamos una nueva actualización de la cartografía de cráter Gusev y Jezero a partir de las imágenes CTX, complemento a los trabajos previos.

MARCO GEOLÓGICO:

Cráter Gusev es un cráter de gran importancia, ya que constituyó el área de estudio del *Mars Exploration Rover* (MER). Se localiza en las coordenadas 14.5°S -175.4°E, situado en el cuadrángulo Aeolis, en el hemisferio meridional de Marte, al SE de cráter Zutphen y al SW de Galdakao, en el "limite" entre las tierras altas del sur y las llanuras del norte. Gusev es un cráter de morfología circular, con un borde muy alterado que presentan fuertes

incisiones de los materiales, posiblemente modeladas por la acción del agua en el pasado. El fondo del cráter es relativamente plano, alterado con numerosos cráteres de impacto de diverso tamaño. Dentro de este podemos apreciar cráteres de impacto como cráter Thira (21,8 km de diámetro), Crivitz, (6,2 km), Castril (2,2 km). Al sur de Gusev se encuentra la boca de entrada que corresponde a la desembocadura de Ma'adim Vallis, un gran valle de ~900 km de largo, que habría sido el responsable del llenado del antiguo lago en Gusev. Otros afloramientos geológicos de gran interés son las colinas de Columbia Hills visitados por el rover Spirit en su misión en la superficie, que, por su localización, podrían ser los restos del pico central de un antiguo cráter complejo. La geología de Gusev está asociada a rocas que en la Tierra han sido clasificadas como rocas basálticas, compuestas generalmente por minerales como el olivino, piroxeno, plagioclasa, magnetita y con una cantidad baja en níquel, atribuida a meteoritos, así como una alta presencia de óxidos de hierro. Se han identificado mineralogía residual asociada a carbonatos y minerales hidratados en imágenes CRISM (Carter and Poulet, 2012). La actividad acuática se ha estimado para el Noeico-Hespérico (Grin and Cabrol, 1997)

Cráter Jezero es un cráter de impacto de ~45 km de diámetro, situado en las coordenadas 18.38°N - 77.58°E, al NW de la cuenca de Isidis y al SE de Nili Fossae. Presenta una morfología circular, que en la parte SW del cráter se conserva el borde de esta estructura. Este antiguo lago presenta dos canales de entrada, uno en la zona W, que corresponde a Neretva Vallis y otro en el N, Sava Vallis, así como un canal de salida hacia el este, conocido como Pliva Vallis. En la zona W de Jezero, existe un delta que se conserva prácticamente en su totalidad y que su origen estaría asociado a sedimentos fluviales. La geología de Jezero se caracteriza principalmente por suelos de composición basáltica, la misma encontrada en Gusev y en diversos lugares de aterrizaje en Marte. Horgan *et al.,* (20019) identificaron mediante firmas espectrales la presencia de mineralogía residual de olivino, piroxenos, óxidos de hierro, carbonatos y minerales hidratados apoyándose en datos del instrumento CRISM (*Compact Reconaissance Imager Spectrometer Mars*).

PRESENTACIÓN RESUMIDA DE DATOS Y RESULTADOS:

Para este estudio se ha utilizado un mapa base de ortoimágenes de 5 m/pixel de la *Context Camera* (CTX) (figura 1 y 2), un modelo digital del terreno (MDT) con una resolución de 5 m/pixel basado en las imágenes estéreo CTX (Anangonó-Tutasig *et al.,* 2023), mapas de inercia térmica (Laura and Fergason, 2016). Los datos se cargaron en la herramienta de código libre *QGIS* 3.32.1, que proporciona una interfaz cartográfica. Para el mapeo cartográfico se ha utilizado la herramienta *Mappy* 0.3.2 desarrollado por Penasa *et al.,* (2020). Esta herramienta facilita el mapeo vectorial de las unidades cartografiadas, que incluye la simbología utilizada en los cuerpos planetarios. El área cartografiada engloba a los cráteres Gusev y Jezero (figura 1 y 2). Las unidades cartográficas se distinguen principalmente por diferencias en el brillo relativo, el tono, la textura de la superficie, la rugosidad, así como otras características topográficas o morfológicas (escarpes, morfologías canalizadas, cambios en la topografía del terreno, campos de dunas eólicas).

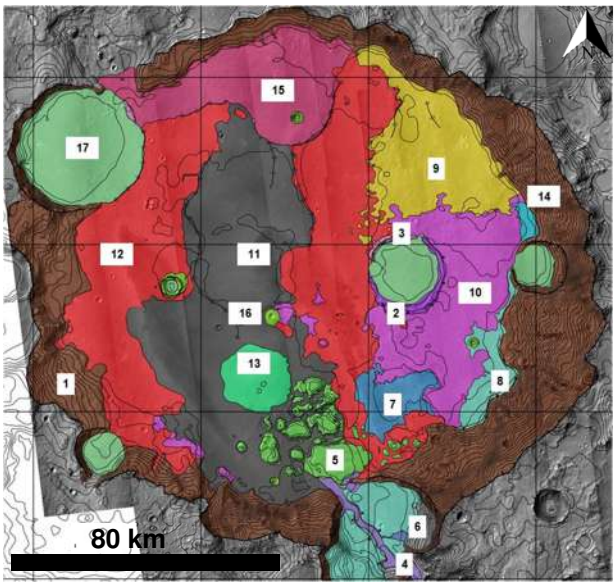


Figura 1. Cartografía de cráter Gusev. Se han identificado las siguientes unidades: (1) Borde de cráter. (2) Anillo de Cráter Thira. (3) Anillo de cráter Thira erosionado. (4) depósitos de fondo de valle. (5) depósitos de delta. (6) Lóbulo de derrame. (7) Unidad de alto albedo moteada. (8) depósitos de terraza. (9) Unidad suelo almohadillado. (10) Unidad de suelo pedregoso. (11) Unidad de fondo 2. (12) Unidad de fondo 1. (13) Meseta aislada. (14) depósitos de abanico. (15) Gran meseta. (16) Cráter de impacto de pequeño tamaño. (17) Fondo de cráteres.

En cráter Gusev (figura 1) se han mapeado las siguientes unidades a partir de cambios en la textura de la superficie, tonalidad, cambios en el relieve que las confieren de unidad independiente. Se han cartografiado las siguientes unidades: (1) Cráter altamente erosionado con variaciones morfológicas a lo largo del borde, presentando una superficie elevada e irregular. (2) Cráter Thira, de gran tamaño en el centro de Gusev, erosionado, posiblemente siendo uno de los primeros eventos de impacto dentro de Gusev. (3) Borde alterado del cráter Thira que donde se han observado características de haber sido modelado por alteración de procesos acuáticos. (4) Depósitos al sur de Gusev, asociados con Ma'adim Vallis y con características topográficas de valles fluviales. (5) Depósito deltaico asociado a Ma'adim Vallis, interpretado como facies proximales de un abanico subacuático. (6) Estructuras en forma de lóbulo asociadas a canales principales, sugiriendo deposición por avenidas fluviales. (7) Unidad al sur de Gusev con alto albedo y emisión de calor, posiblemente asociada con la roca de la corteza y a arenas de tamaño grueso. (8) Morfologías de terrazas identificadas en la

zona sur de Gusev, con características similares a terrazas marinas y fluviales. (9) Suelo relativamente plano con características de cretas glaciares y crestas, posiblemente formadas bajo antiguos glaciares. (10) Unidad con suelo pedregoso, afloramientos de roca, y características termofísicas asociadas a materiales arenosos de grano grueso, posiblemente modificada por corrientes de agua. (11) Unidad central elevada de Gusev, con presencia de crestas y cráteres de impacto, y características termofísicas indicativas de arena gruesa. (12) Unidad extensa dentro de Gusev, con suelo plano y áreas de alto albedo, donde se realizaron análisis de materiales por el rover Spirit. (13) Morfología circular con techo convexo y pequeñas cretas eólicas, similar a cerros testigos en la Tierra. (14) Depósitos en forma de lóbulo asociados a abanicos aluviales y cañones antiguos, con procesos de avulsión similares a sistemas fluviales terrestres. (15) Gran meseta al norte de Gusev, con suelo plano, rugoso, y cráteres de diverso tamaño, posiblemente asociada con depósitos de salida de Gusev. (16) Cráteres de impacto de diversos tamaños, con la temperatura asociada a la antigüedad de los impactos. (17) Materiales arenosos depositados por transporte eólico, con presencia de dunas y baja inercia térmica que se encuentran en el fondo de los cráteres de impacto.

En cráter Jezero (figura 2) se ha utilizado los mismos criterios para el mapeo de cráter Gusev. En Jezero se han identificado las siguientes unidades: (1) Una unidad morfológica que conserva el anillo original en los bordes W-SW-S del cráter. Se caracteriza por tener depósitos de roca consolidada y está asociada a procesos de erosión. (2) Depósitos deltaicos bien conservados, interpretados como depósitos de fan occidental. Es muy característico de esta unidad sus canales ramificados. (3) La unidad más profunda del cráter, que presenta un aspecto rugoso, dunas y depósitos de ceniza volcánica. (4) Valles de entrada asociados a canales de antiguos ríos, que se caracterizan por tener materiales arenosos y polvo. (5) Delta altamente degradado, con un aspecto rugoso y con unas tonalidades brillantes. Este posiblemente fue el primer episodio deltaico de Jezero. (6) Unidad de fondo plano con una alta cantidad de cráteres y dunas, depositada antes de las unidades deltaicas. (7) Características similares a los cráteres de impacto en otros lugares de Marte. (8) Fondo de cráteres, similar a las unidades en el cráter Gusev, con depósitos arenosos y dunas. (9) Lecho arenoso modelado por procesos eólicos, con dunas y baja inercia térmica. (10) Suelo rugoso con crestas y valores de inercia térmica intermedios. (11) Unidad asociada a materiales rocosos resistentes a la erosión, que, por sus características morfológicas, podría ser un antiguo cono volcánico. (12) Depósitos con orientación NW-SE asociados a la cuenca hidrográfica de Isidis Planitia, y se caracterizan por presentar un aspecto rugoso, que, mediante las imágenes térmicas, se asociarían a materiales de roca consolidad. (13) Depósitos arenosos poco alterados con campos de dunas. (14) Similar al Fondo de Jezero, pero con tonalidades más oscuras y una alteración más intensa. (15) Morfologías en forma de montículos de gran tamaño, posiblemente formados por erosión diferencial, con orientación NW-SE. (16) Unidad con suelo altamente fracturado, asociado posiblemente a fallas tectónicas. (17) Similar a las unidades de fondo identificadas en Jezero, pero con un mayor contenido de cráteres. (18) Depósitos arenosos depositados por erosión del anillo de Jezero, con pendientes pronunciadas en algunas secciones. (19) Unidad caracterizada por dunas con direcciones variadas, asociadas a la salida del antiguo lago de Jezero. (20) Depósitos asociados a terrazas que podrían haber sido formados por deslizamientos y modelados por variaciones en el nivel del lago.

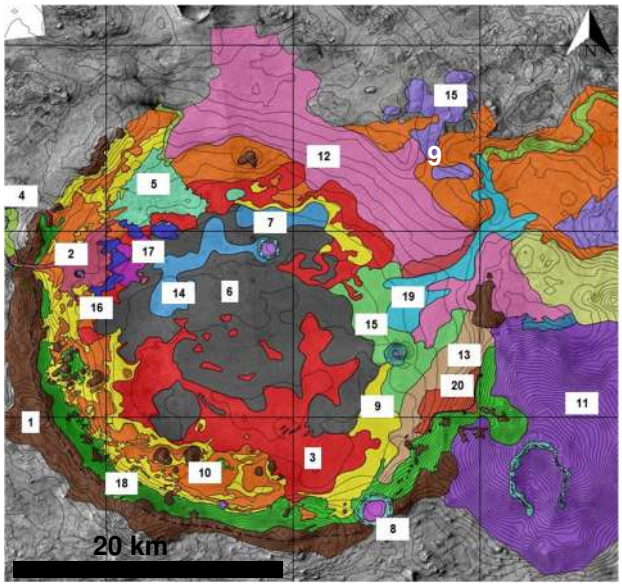


Figura 2. Cartografía de cráter Jezero. Se han identificado las siguientes unidades: (1) Anillo de cráter. (2) Delta Occidental. (3) Unidad de fondo. (4) Fondo de valle. (5) Delta Norte. (6) Unidad de fondo 2. (7) Unidad de fondo 3. (8) Bordes de anillos de cráter de menor tamaño. (9) Unidad de depósitos eólicos. (10 Unidad rugosa. (11) Unidad basamento masivo. (12) Gran unidad térmica. (13) Unidad poco alterada. (14) Unidad de fondo 3. (15) Depósitos E. (16) Unidad de fondo fracturada. (17) Unidad de fondo de transición. (18) Depósitos de ladera (borde interior de Jezero). (19) Depósitos de salida. (20 Depósitos de terraza.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES:

El resultado son dos cartografías más recientes de la geología de cráter Gusev y Jezero, donde se han identificado una serie de unidades superficiales. Ambos cráteres comparten características similares en los suelos, ya que ambos están dominados por una serie de unidades que se distinguen por su rugosidad, tonos claros y oscuros, diferencias de textura de la superficie, cambios en la elevación, así como la presencia de distintas morfologías que solo se han distinguido en uno de los cráteres, como puede ser fracturas en el lecho rocos de Jezero o morfologías almohadillas en la superficie de Gusev, que podrían estar relacionadas con una posible actividad vulcano-tectónica. Estas características permiten ser cartografiadas como unidades independientes del lecho rocoso y arenoso en estos cráteres. En ambos cráteres se encuentran depósitos

deltaicos (figura 3) que se caracterizan por ser sedimentos estratificados de tonos claros, grandes bloques, capas gruesas, capas finas y ásperas. El delta de Gusev se encuentra más erosionado, donde su origen podría estar
relacionado con un único episodio sedimentación. El delta de Jezero se conserva en su totalidad, posiblemente se formó en varios periodos de sedimentación, donde se aprecia una estructura más compleja donde se observan múltiples canales y ramificaciones.

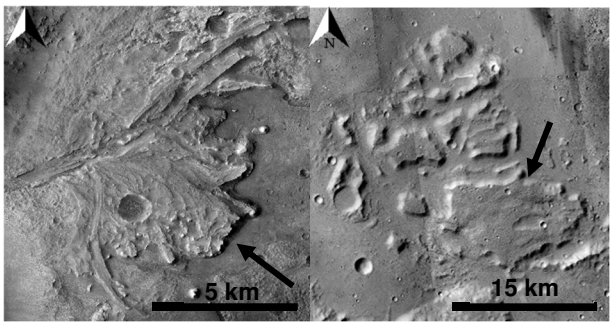


Figura 3. (A) Delta de cráter Jezero. (B) Delta de cráter Gusev. Podemos observar que el delta de Jezero es más complejo que el de Gusev, ya que el primero tiene una serie de ramificaciones y canalizaciones. Imágenes CTX (5m/píxel). Las flechas negras marcan el contacto entre el delta y el suelo de los cráteres, que se da mediante un escarpe.

Las unidades identificadas en este estudio coinciden en general con las identificadas en mapas publicados anteriormente. En Gusev se han identificado nuevas unidades cartográficas gracias a las imágenes CTX, ya que ofrecen más detalles de las características morfológicas de la superficie que los mapas basados en las imágenes de térmico visible utilizadas para los primeros mapas. En cráter Jezero no se ofrecen grandes cambios con respecto a los mapas publicados, pero hemos obtenido un mayor detalle de la zona E del cráter, donde los estudios para esta zona no son de gran detalle.

REFERENCIAS:

Anangonó-Tutasig, R.S., Fernández Menéndez, S., Rodríguez Rodríguez, J., Iglesias Álvarez, S., Pérez Fernández, S., Buendía Roca, A., Diez Alonso, E., De Cos Juez, F.J., 2023. *High Resolution Digital Elevation Models with Ctx Images of the Gusev Crater Surface.* Presented at the Seventh edition of the Spanish Meeting of Planetary Sciences and Exploration of the Solar System (7th CPESS).

Carter, J., Poulet, F., 2012. *Orbital identification of clays and carbonates in Gusev crater.* Icarus 219, 250–253. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.02.024

Grin, E.A., Cabrol, N.A., 1997. *Limnologic Analysis of Gusev Crater Paleolake, Mars.* Icarus 130, 461–474. https://doi.org/10.1006/icar.1997.5817

Horgan, B.H.N., Anderson, R.B., Dromart, G., Amador, E.S., Rice, M.S., 2019. *The mineral diversity of Jezero crater: Evidence for possible lacustrine carbonates on Mars.* Icarus 339, 113526. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113526

Kuzmin, R.O., Greeley, R., Landheim, R., Cabrol, N.A., Farmer, J.D., 2000. *Geologic map of the MTM-15182 and MTM-15187 quadrangles, Gusev Crater-Ma'adim Vallis region, Mars.* https://doi.org/10.3133/i2666

Laura, J., Fergason, R.L., 2016. *Modeling martianthermal inertia in a distributed memory high performance computing environment, in 2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data).* Presented at the 2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), pp. 2919–2928. https://doi.org/10.1109/BigData.2016.7840942

Milam, K.A., Stockstill, K.R., Moersch, J.E., McSween Jr., H.Y., Tornabene, L.L., Ghosh, A., Wyatt, M.B., Christensen, P.R., 2003. *THEMIS characterization of the MER Gusev crater landing site.* Journal of Geophysical Research: Planets 108. https://doi.org/10.1029/2002JE002023

Penasa, L., Frigeri, A., Pozzobon, R., Brandt, C.H., De Toffoli, B., Naß, A., Rossi, A.P., Massironi, M., 2020. *Constructing and deconstructing geological maps: a QGIS plugin for creating topologically consistent geological cartography (other).* oral. https://doi.org/10.5194/epsc2020-1057

Evolución del meteorito de Dhofar a partir de imagen por espectroscopía Raman

Evolution of the Dhofar meteorite using Raman imaging

A.I. Casado[1], V.G. Baonza[1, 2], M. Taravillo[1], J. Martínez-Frías[2] y A. Lobato[1]

1 Dpto. Química Física. Facultad de Ciencias Químicas. Univ. Complutense de Madrid. 28040 Madrid. acasadogomez@ucm.es, a.lobato@ucm.es, vgbaonza@quim.ucm.es, mtaravil@ucm.es
2 Instituto de Geociencias IGEO (UCM-CSIC). j.m.frias@igeo.ucm-csic.es

Palabras clave: condrita, mapa Raman, presión, olivino, espectroscopía vibracional.

Resumen

La espectroscopía Raman permite estudiar la composición y las condiciones de formación de los distintos minerales presentes en una muestra. Las variaciones que sufre la estructura cristalina debido a su evolución geológica modifican la posición y la intensidad de las bandas del espectro Raman. Cuando esta información se representa a través de una imagen, se facilita la interpretación mineralógica de manera visual.

En este trabajo, destacamos la utilidad de la imagen Raman para analizar el origen y las alteraciones sufridas por el meteorito de Dhofar (desierto de Zufar, Omán), descubierto en 2009 y caracterizado por primera vez en nuestra investigación. Mediante los mapas Raman generados para los seis tipos de cóndrulos identificados petrográficamente, hemos revelado los procesos geológicos primarios y secundarios que han afectado a cada uno de ellos durante su formación. Estos mapas proporcionan detalles sobre la cristalinidad de las fases minerales, su distribución morfológica y espacial, así como las condiciones mínimas de presión y temperatura en las que se formaron dichas fases.

Nuestro estudio permite clasificar el meteorito de Dhofar como una condrita H3, lo cual significa que está compuesto por cóndrulos formados en las primeras etapas del disco protoplanetario. Gracias a la información obtenida mediante el estudio por imagen Raman, se pueden determinar distintas condiciones para cada cóndrulo. La validación de este estudio por otras técnicas geoquímicas permite proponer la imagen Raman como una metodología aplicable no solo al estudio de meteoritos, sino también a otras rocas que han estado sujetas a cambios de presión y/o temperatura durante su historia geológica.

Abstract

Raman spectroscopy allows studying the composition and formation conditions of different minerals present in a sample. Variations in their crystal structure due to geological evolution alter the position and intensity of Raman spectrum bands. When this information is represented through an image, mineralogical interpretation is visually facilitated.

In this work, we highlight the utility of Raman imaging to analyze the origin and alterations undergone by the Dhofar meteorite (Zufar desert, Oman), discovered in 2009 and characterized for the first time in our research. Through Raman maps generated for the six types of chondrules identified petrographically, we have revealed the primary and secondary geological processes that have affected each of them during their formation. These maps provide details on the crystallinity of mineral phases, their morphological and spatial distribution, as well as the minimum pressure and temperature conditions under which formed such phases.

Our study allows classifying the Dhofar meteorite as an H3 chondrite, indicating that it is composed of chondrules formed in the early stages of the protoplanetary disk. Thanks to the information obtained through Raman imaging, different conditions can be determined for each chondrule. The validation of this study by other geochemical techniques suggests that Raman imaging is a methodology applicable not only to meteorite studies but also to other rocks subjected to changes in pressure and/or temperature throughout their geological history.

Análisis geológico y selección global de cuevas en Marte para su futura exploración.

Geological analysis and global selection of caves on Mars for future exploration.

A. Crisol[1] y L. M. Parro[2]

1 Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig – Alicante, albacrisolm@gmail.com
2 IUFACyT. Universidad de Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig – Alicante, laura.mparro@ua.es

Palabras clave: Marte, cuevas, cartografía, exploración, geomorfología

Resumen

Las formas planetarias denominadas "pit craters" son estructuras geológicas deprimidas principalmente generadas por la subsidencia del terreno que pueden ser detectadas en las superficies de los cuerpos rocosos. Diversos estudios han demostrado la importancia que pueden tener estas hondonadas naturales por ser posibles accesos a cuevas de gran interés científico para su exploración (p.ej. Wynne, *et al*., 2022). En Marte se han descubierto 1036 candidatos a este tipo de aberturas y cuevas (Cushing, 2015), situándose, la mayor parte de ellos, cerca de las dos provincias volcánicas más importantes del planeta, Tharsis y Elysium (Kearney, *et al.*, 2021). En este estudio buscamos realizar una primera selección de los mejores candidatos que puedan ser objetivo prioritario de una próxima misión de exploración al planeta Marte. Realizamos cartografías globales con diferentes programas de SIG (QGIS, JMARS, etc) con el objetivo de localizar estas características en toda la superficie del planeta y poder contrastar su ubicación con la abundancia de elementos ubicados en las primeras capas de la corteza (como hielo de agua u otros volátiles, tierras raras, entre otros). Además, se priorizará la selección de aquellos pits que estén en terrenos accesibles y con pendientes suaves, incluyendo su posible proximidad con estructuras tectónicas o formaciones volcánicas como tubos de lava.

Abstract

Planetary landforms called "pit craters" are depressed geological features mainly generated by the subsidence of the terrain that can be detected on the surfaces of rocky bodies. Several studies have demonstrated the importance of these natural depressions as possible entrances to caves of great scientific interest for exploration (e.g., Wynne et al., 2022). On Mars, 1036 candidates for such vents and caves have been discovered (Cushing, 2015), with most of them located near the planet's two most important volcanic provinces, Tharsis and Elysium (Kearney, et al., 2021). In this study, we seek to make a first selection of the best candidates that could be a priority target for an upcoming exploration mission to Mars. We performed global mapping with different GIS programs (QGIS, JMARS, etc) in order to locate these features on the entire surface of the planet and to contrast their location with the abundance of other elements located on the first layers of the crust (such as water ice or other volatiles, REE, and others). In addition, we will prioritize the selection of those pits that are accessible and with smooth slopes, including their possible proximity to tectonic structures or volcanic formations like lava tubes.

Referencias

Wynne, J. J., et al. (2022). Planetary caves: A solar system view of processes and products. Journal of Geophysical Research: Planets, 127, e2022JE007303. https://doi.org/10.1029/2022JE007303

Cushing, G.E. (2015). Mars Global Cave Candidate Catalog PDS4 Archive Bundle. PDS Cartography and Imaging Sciences Node (IMG). https://doi.org/10.17189/151922

Kearney, M. L., et al. (2021). Robotic exploration potential of Martian caves. 52nd Lunar and Planetary Science Conference 2021 (LPI Contrib. No. 2548) https://doi.org/10.177226/25252

Characterizing of K2-OjOS Exoplanets: a comprehensive analysis of size, mass, and volatile retention capacities

Caracterización de los Exoplanetas K2-OjOS: análisis completo de tamaño, masa capacidad de retención de volátiles

E. Dıez Alonso [1]; J. M. Recio[2]; F. Izquierdo-Ruiz[2], J. de Cos Juez[1], A. Castro-González[1], S.d C. Fernández[1]

1 ICTEA Instituto Universitario de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA) Universidad de Oviedo. C/ Independencia 13, Oviedo CP 33005. Spain (e-mail: fernandezmsusana@uniovi.es)
2 MALTA Consolider Team Universidad de Oviedo. C/ Julián Clavería 8, CP 33006, Oviedo, Spain

Key words: Exoplanets; Rocky Planets; Water Worlds; Hot Jupiters; Super Earths

Abstract

The initial results of K2-OjOS, a Pro-Am project designed to detect, characterize, and validate new extrasolar planets, were published in 2022 (Castro-González et al., 2022). To achieve this, 10 amateur astronomers inspected the 20,427 light curves of the K2 Campaign 18. They identified 42 planet candidates, 18 of which were new detections and 24 were previously discovered in the overlapping Campaign 5. As a result, they reported the discovery of 4 new planets, 11 candidates, and 3 false positives. Among them, K2-103 b, is within the habitable zone. The exoplanets presented cover a wide range of sizes and masses. Plotting the planet radius as a function of the orbital period, the planets primarily fall into two distinct clusters: the small planets cluster, which includes planets with a radius of less than 4 Earth radii and orbital periods that range from less than a day to hundreds of days, and the hot Jupiter's cluster, which comprises large planets (with a radius greater than 10 Earth radii) with short orbital periods (less than 10 days). Commonly, planets with high densities are considered rocky, while planets with low densities are often interpreted in the literature as gaseous dwarfs or water worlds.

Resumen

Los resultados iniciales de K2-OjOS, un proyecto Pro-Am diseñado para detectar, caracterizar y validar nuevos planetas extrasolares, se publicaron en 2022 (Castro-González et al., 2022). Para lograrlo, 10 astrónomos aficionados inspeccionaron las 20.427 curvas de luz de la campaña 18 de K2. Identificaron 42 candidatos a planetas, 18 de los cuales son nuevas detecciones. Presentamos como resultado el descubrimiento de 4 nuevos planetas, 11 candidatos y 3 falsos positivos. Uno de ellos, K2-103 b, se encuentra dentro de la zona habitable. Los exoplanetas presentados cubren una amplia gama de tamaños y masas. Cuando se presenta el radio del planeta en función del período orbital, los planetas se dividen en dos grupos diferenciados: el grupo de planetas pequeños, que incluye planetas con un radio inferior a 4 radios terrestres y períodos orbitales que van desde menos de un día hasta cientos de días, y el grupo de los Júpiter calientes, que comprende planetas grandes (con un radio superior a 10 radios terrestres) con períodos orbitales cortos (menos de 10 días). Usualmente, los planetas con altas densidades se consideran rocosos, mientras que los planetas con bajas densidades suelen interpretarse en la literatura como enanos gaseosos o mundos acuáticos.

Referencias

Castro-González, A. et al., (2022). The K2-OjOS Project: New and revisited planets and candidates in K2 campaigns 5, 16, & 18, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: 509, 1:1075–1095. https://doi.org/10.1093/mnras/stab2669.

Lunar Surface Resources Exploration: Tracing Lithium, 7 Li and Black Ice using Spectral Libraries and Apollo mission's samples.

Exploración de Recursos en la Superficie Lunar: Rastreo de Litio, 7 Li y Hielo Negro utilizando Bibliotecas Espectrales y muestras de la misión Apolo.

S. del Carmen Fernández[1]

1 Instituto Universitario de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA), Universidad de Oviedo, C. Independencia 13, 33004 Oviedo, España, fernandezmsusana@uniovi.es

Abstract: This is an exercise to explore the concentration of Lithium, Lithium-7 isotope and the possible presence of dirty ice in the lunar surface using spectral data obtained from the Clementine mission. The main interest in tracing the lithium and presence of dirty ice are closely related to future human settlement missions in the Moon. In this study, we use mosaics based on imagery from the 11 channels of the Clementine UV-VIS-NIR-SWIR image downloaded from the PSD Orbital Data Explorer. To calibrate the Clementine images for lithium composition (ground trough), we used chemical analyses of samples 12045, 15058, 15475, 15555, 70035, 74220, and 75075. Additionally, we used a spectral library RELAB (Reflectance Experiment Laboratory) from PDS Geosciences Node, which contains spectra of these eight lunar samples. To explore the possibility of find ice mixed with regolithe we used a spectral library (350-2500nm) form ices dirty with different concentration of volcanic particles. According to this first screening, the area's most likely to have ice mixed with regolithe are related to crater rims and impact-ejected material near to the South Pole of Moon. The application of linear regression models, GIS analysis, and spectral data interpretation prove to be powerful tools in lunar research.

Palabras clave: Lithium; Dirty ice; Lunar surface; Spectral data; Clementine mission

Resumen: *Este es un ejercicio para explorar la concentración de Litio, el isótopo Litio-7 y la posible presencia de hielo sucio en la superficie lunar utilizando datos espectrales obtenidos de la misión Clementine. El principal interés en trazar el litio y la presencia de hielo sucio está relacionado con futuras misiones de asentamiento humano en la Luna. En este estudio, utilizamos imágenes de los 11 canales de la imagen Clementine UV-VIS-NIR-SWIR del Explorador de Datos Orbitales PSD. Para calibrar las imágenes de Clementine usamos los valores de litio de las muestras 12045, 15058, 15475, 15555, 70035, 74220 y 75075. Además, usamos la biblioteca espectral RELAB del Nodo de Geociencias de PDS, que contiene espectros de estas ocho muestras lunares. Para explorar la posibilidad de encontrar hielo mezclado con regolito, utilizamos una biblioteca espectral propia (350-2500 nm) de hielos sucios con diferentes concentraciones de partículas volcánicas. De acuerdo con este primer estudio las áreas más propensas a tener hielo mezclado con regolito están relacionadas con bordes de cráteres y material eyectado por impactos cerca del Polo Sur de la Luna. La aplicación de modelos de regresión lineal, análisis GIS junto con datos espectrales demuestran ser herramientas poderosas en la investigación lunar.*

Key words: *Litio; Hielo sucio; Superficie lunar; Datos espectrales; Clementine misión*

INTRODUCTION

The main interest in tracing the lithium in lunar surface and also presence of black ice are closely related to future human settlement missions in the Moon. For long-term lunar bases or space missions, in-situ access to lithium for battery production could be crucial for energy sustainability and autonomy. Mining lithium on the Moon could further spur technological advancements in space exploration. The confirmation of water on the Moon has been a relatively recent. In 2009, NASA's Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) mission identified water in the form of ice within Cabeus crater near the lunar South Pole. Fisher et al., (2017) identified and mapped surfaces with reflectance so high as to be unlikely to be part of an ice-free population. In this south they found a similar distribution found by Hayne et al. (2015) based on UV properties. The majority of lunar water is found as ice in permanently shadowed craters at the poles, where temperatures are extremely low and sunlight is perpetually absent. But there are also indications of water in other regions of the Moon, albeit in significantly lower concentrations (Hayne et al., 2015). This work represents an exercise in the exploration for these resources on the lunar surface using remote sensing and spectroscopy techniques together with the information available in the PSD Orbital Data Explorer from JPL of NASA.

The research on the presence of lithium on the moon is not very abundant. Magna et al. (2006) analyzed lithium (ppm) and 7Li (‰) isotope in several rock and

regolithe samples from the solar system for astrophysical purposes, and eight of these samples were from the Moon. Lithium and 7Li in basaltic and ultramafic rocks from the Earth, Moon samples (Apollo 12, 15, 16 and 17 mission samples), Mars and Vesta were analysed yielding Li stable isotope compositions more less consistent with earth mantle (7Li~+4‰). Martian meteorites give distinct 7Li of 3, 9‰ (Zagami) and 5,0‰ (Nakhla). Eucrites from Vesta shows substantially higher Li abundances (8, 3–13,1 ppm) as do lunar rocks and glasses (6,0–13,3 ppm). In this way, 7Li isotope concentration in the lunar samples reaches + 8, 89‰, measured in the 62255-moon sample, which is compound by anorthosite. Mare moon basalts exhibit a large range of Li isotope compositions (7Li= +3,4‰ to +6,4‰) predominating high concentrations (e.g. 9.2 ppm with 6,39 ‰ of 7Li in sample 72255 or 10,3ppm and 5,48 ‰ in sample 75075 both from High-Ti mare basalts). These concentrations are more than double of the 7Li concentrations measured in samples of terrestrial basalts (MORB; Iceland and Hawaii basalts). Moreover, 74220 sample named as Orange and Glass from the four geological station of Apollo 17 mission, was considered a clod of friable material taken 6-8 cm deep in a trench from Station 4, on the rim of 120 meter Shorty crater. This sample are enrichment in lithium reaching 13, 3 ppm but only 4, 2‰ are 7Li, that suppose ratio of 7Li of 0,32 (7Li/Lithium ppm) (Table 1). In the other side, Anorthosite sample (62255) shows lowest concentration of lithium (0, 8) but the highest concentration of 7Li (8, 89 ‰) that suppose 11,11 value for 7Li/Lithium ratio. However, oxygen isotopes provide evidence that the Earth and Moon formed from the same raw material. The lithium concentrations measured in the lunar samples are in accordance with the Earth data, but the isotope lithium-7 ratios do not. In lunar samples, they are several orders of magnitude larger than in the Earth's crust and more than twice than in the rocks of terrestrial mantle. Therefore, the Li isotope compositions for the total Earth and Moon should be identical. We suspect that the apparent increments of 7Li on lunar surface could be related to possible surface exposure to solar wind particles. Spallation processes in cosmic rays is the primary means of nucleosynthesis for stable isotopes of lithium, beryllium, and boron. Throughout the long evolutionary history of the Moon, the composition of the most ancient substrates of the moon can be significantly altered by space weathering and impact processes compared to the source materials, such as lava flows or crystalline rocks as anorthosite, that is most abundant substratum in the lunar highlands (Ohtake et al, 2009; Lucey 2004).

Regarding the exploration of dirty ice, beyond ice, molecular water (H2O) and hydroxyl groups (OH) have been detected on the lunar surface. NASA's Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) has played a pivotal role in identifying water molecules on the Sunlit lunar surface. One hypothesis suggests that water was formed through the interaction of solar wind with lunar minerals, yielding hydroxyl and subsequently water Alternative theories propose that water was delivered via cometary and asteroidal impacts on the Moon (Colaprete et al., 2010). Current and forthcoming missions, including NASA's Artemis program, aim to further investigate lunar water. These studies will aid in better understanding the distribution, quantity, and potential extraction and utilization methods of lunar water.

MATERIALS AND METHODS

In this study, we use mosaics based on imagery from the 11 channels of the Clementine UV-VIS-NIR-SWIR image downloaded from the PSD Orbital Data Explorer. To calibrate the Clementine images for lithium composition (ground trough), we used chemical analyses of samples 12045, 15058, 15475, 15555, 70035, 74220, and 75075 (Table I).

Subtrata	Lithium(ppm)	7 Li	7Li/Lithium
Anortosite (62255)	**0,8**	**8,89**	**11,11**
Basalt (15058)	7,7	3,76	0,49
Basalt (1205)	9,5	4,43	0,47
Basalt (15475)	7,2	3,35	0,47
High-Ti Mare Basalt (70035)	8,6	5,09	0,59
High-Ti Mare Basalt (75075)	10,3	5,48	0,53
OlivineBasalt (15555)	6,0	4,32	0,72
Orange and GlassesSoil (74220)	**13,3**	**4,19**	**0,32**

TABLE I. *Eight samples used, concentration of lithium and 7 Li isotope and ratios of Lithium. Modified from (Magna et al., 2006).*

Additionally, we used a spectral library RELAB (Reflectance Experiment Laboratory) from PDS Geosciences Node, which contains spectra of these eight lunar samples. We found 18 spectra measured over the spectral range 300–2780 nm with 5 nm sampling resolution at a phase angle of 30º. By combining the RELAB spectra via Principal Component Analysis (PCA), we could identified five types of spectra (Fig. 1), which presenting 5 types of lunar samples: C1_Olivine-rich basalts, C2_Silica-rich basalts, C3_Hight_T Mare Basalts, C4_Anorthosite and C5_Orange and glasses soils. These materials shows the highest concentrations of lithium (13.3 ppm) but lowest 7 Li (4.19 ‰). In the other hand we can found the Anorthosite samples with have the lowest concentration of Lithium (0.8 ppm) but the highest 7Li ratio (8.89‰) more than double of 4‰ typical from the 7Li of the Earth rocks. It is important to highlight that Anorthosite is the rock that predominates in the most ancient areas of Moon with highest topography exposed to the solar wind.

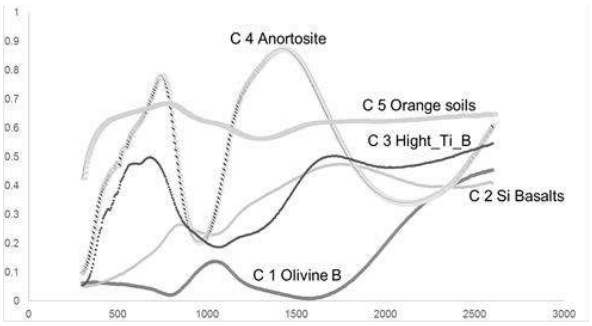


FIGURE 1. *Five spectra types obtained in PCA analysis.*

On the other hand, to explore the possibility of existence of ice mixed with regolithe with the same

techniques, we used a spectral library (350-2500nm) form ices dirty with different concentration of volcanic particles (0, 2, 4 and 6 ppm of very fine, <2mm, lapilli with andesitic composition). The ice library was taken for us in laboratory with ADS spectroradiometer. 30 ADS spectra have been taken for each of the types of ice.

To transfer the spectral information into Clementine image, spectral ratios for the five types of spectra (C1-C5) and for the four types of dirty ice were defined and calculated according to:

$$\text{Ratio} \times (\lambda\text{peack} - \lambda\text{valley}),$$

Where ratio is peack intensity /valley intensity, and λ corresponding to wavelengths. The specific wavelengths were identified in spectra using Spectroscopy Pro Tools 1.2 software.

To carry out this work, we also needed a GIS environment. We used Qgis 3.34 to create a georeferenced map of the 8 lunar samples. To explore the lithium presence on lunar surface, we translated the 5 ratios into the Clementine bands using raster calculator of Qgis. The 11 Clementine bands (UV-VIS-NIR-SWIR) plus the 5 ratios calculated were crossed with georeferenced 8 samples using the QGis Point Sampling Tool and we obtained the values of bands and ratios, 16 variables in total, for each of the 8 lunar sample. With these data, we completed a large number of Linear Regression Models analyses (LRM).

In the case of dirty ices, we don't have "ground truth" to compare or validate the results. The four ice ratios were regionalize to the entire Clementine image and visualize the results.

RESULTS AND DISCUSSION

As summary of lithium distribution models (Table II) *C4* Anortosite (positive coefficient) and *C5* spectral ratio corresponding to orange and glasses soils (negative coefficient) together with the blue band (*ClemVis1*) best explained the variability of the ‰ 7Li in a LRM (R^2 ~0.9). For lithium (ppm), the near-infrared bands (*ClemNir1* and *ClemNir2*) are the variables that best explain the variability of the element.

Regression Summary for Dependent Variable: 7 Li(‰) R= ,97333231 R^2= ,94737579 Adjusted R^2= ,90790763 p< 0,0051 Std.Err 0,526					
	Beta	Std.Err.	B	Std.Err	p-level
Intercept			2,615	2,010	0,263
C4	0,623	0,226	8,924	3,243	0,051
C5	-0,495	0,204	-7,468	3,082	0,073
ClemVis1	0,736	0,137	60,845	11,337	0,006
Lithium(ppm) R= ,95159092 R^2= ,90552528 Adjusted R^2= ,83466924 p<,01620 Std.Err: 1,4782					
	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	p-level
Intercept			64,760	20,821	0,036
ClemNir1	-7,233	3,581	-672,392	332,918	0,114
C5	-0,539	0,251	-74,410	34,623	0,098
ClemNir2	6,106	3,501	536,480	307,561	0,156

TABLE II *Summary of LRM analysis for lithium and 7Li selected to be extended to the entire Clementine image. The Adjusted R^2 represent the robustness of models.*

We translated the linear equations into the Clementine image using the QGIS raster calculator, resulting in two maps one for lithium and another for 7Li ‰ (Fig. 2). In this figure, we can see details of the maps near the Apollo 15 landing zone. The concentration of lithium is higher in relation to basaltic areas of the Moon. This distribution is consistent with a geogenetic origin of the lithium (Magna et al.,2006). On the other side, putting together the extended models of 7 Li and the LOLA_DEM, the image reveals that 7 Li appears to be more concentrated in the highly cratered highlands. Also by analysing the spatial patterns and their relationships with topography, we have come to believe that 7 Li (‰) may have a cosmogenic origin by space weathering. Space weathering refers to the processes by which the optical properties of airless bodies change due to exposure to solar wind and micrometeoroid impacts (Hemingway et al., 2015).

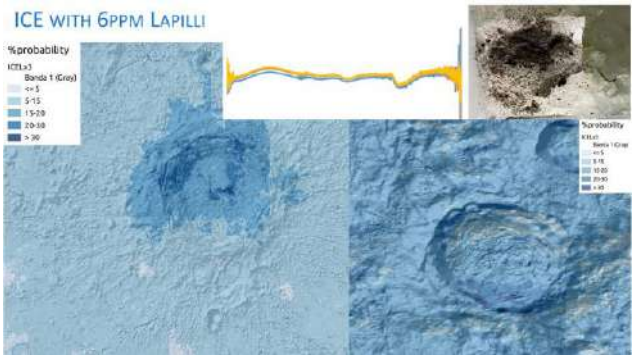


FIGURE 3 *Example of regolithe with ice probability distribution*

Regarding the possibility of finding ice in the lunar regolith, only one index, corresponding to ice with 6 ppm of lapilli, has shown any cartographic pattern that can be interpreted with geomorphological criteria. According to this first screening, the area's most likely to have ice mixed with regolith would be related to crater rims and impact-ejected material near to the South Pole of Moon. It's a suggestive proposition that we will continue to explore with high-resolution images from Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) (Ming et al., 2022), Chandrayaan-1 (Bhatt et al., 2018) or Chang'e Program (Li et al., 2021) from China missions.

CONCLUSIONS

The application of linear regression models, GIS analysis, and spectral data interpretation prove to be powerful tools in lunar research. These methods allow for a deeper and more detailed understanding of the distribution of elements and minerals on the Moon. Based on the results several important conclusions can be drawn about lunar geology and the distribution of lithium and its isotopes on the Moon's surface. The presence and distribution of lithium on Moon appears to have a geogenetic origin, with higher concentrations in Marias or basaltic areas. This suggests that lithium has accumulated in these regions due to specific geological processes of the Moon's past. Nevertheless, the models of distribution of isotope 7Li seems to indicate that this isotope might have a cosmogenic origin, influenced by

space weathering. Regarding the presence of dirty ice in rims and ejected material of craters located near the South Pole it's a suggestive proposition that we will continue to explore with high-resolution images from Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), Chandrayaan-1, Kaguya (SELENE) or Chang'e Program from China missions.

ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge the open-access data provided by the Orbital Data Explorer and RELAB. This valuable resource has significantly contributed to the research findings presented in this paper.

REFERENCES

Bhatt, M., Wöhler, C., Dhingra, D., Thangjam, G., Rommel, D., Mall, U., Bhardwaj, A. and Grumpe, A. (2018): Compositional studies of Mare Moscoviense: New perspectives from Chandrayaan-1 VIS-NIR data. *Icarus*. 303: 149-165. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.10.009.

Colaprete, A. (2010): Detection of water in the LCROSS Ejecta Plume. *Science*. 330: 463–468. https://doi.org/10.1126/science.1186986.

Fisher, E. A., Lucey, P. G., Lemelin, M., Greenhagen, B.T., Siegler, M. A., Mazarico, E., Aharonson, O., Williams, JP., Hayne, P. O., Neumann, G. A., Paige, D. A., Smith, D. E. and Zuber, M. T. (2017): Evidence for surface water ice in the lunar polar regions using reflectance measurements from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and temperature measurements from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Icarus*. 292: 74-85 , https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.03.023.

Hayne, P.O., Hendrix, A., Sefton-Nash, E., Siegler, M.A., Lucey, P.G., Retherford, K.D., Williams, J.-P., Greenhagen, B.T. and Paige, D.A. (2015): Evidence for exposed water ice in the Moon's south Polar Regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements. *Icarus*. 255: 58-69. 10.1016/j.icarus.2015.03.032

Hemingway, D.J., Garrick-Bethell, I. and Kreslavsky, M.A. (2015): Latitudinal variation in spectral properties of the lunar maria and implications for space weathering. *Icarus*. 261: 66-79. 10.1016/j.icarus.2015.08.004.

Li, C., Zuo, W., Wen, W., Zeng, X., Gao, X., Liu, Y. , Fu, Q., Zhang, Z., Su, Y., Ren, X., Wang, F. , Liu, J. , Yan, W., Tan, X., Liu, D., Liu, B., Zhang, H. and Ouyang, Z. (2021): Overview of the Chang'e-4 Mission: Opening the Frontier of Scientific Exploration of the Lunar Far Side. *Space Science Review*. 217: 35. https://doi.org/10.1007/s11214-021-00793-z.

Lucey, P. G. (2004): Mineral maps of the Moon. *Geophysical Research Letters*. 31: L08701

Magna T., Wiechert U. and Halliday A.N. (2006): New constraints on the lithium isotope compositions of the Moon and terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*. 243: 336–353.

Ming M. , Bingze L., Shengbo C., Tianqi L., Peng L., Yu L. and Qin J. (2022): Global estimates of lunar surface chemistry derived from LRO diviner data. *Icarus*. 371: 114697.

Ohtake, M., Matsunaga, T., Haruyama, J. (2009): The global distribution of pure anorthosite on the Moon. Nature 461, 236–240. Ohtake, M., Matsunaga, T., Haruyama, J. et al., 2009. https://doi.org/10.1038/nature08317

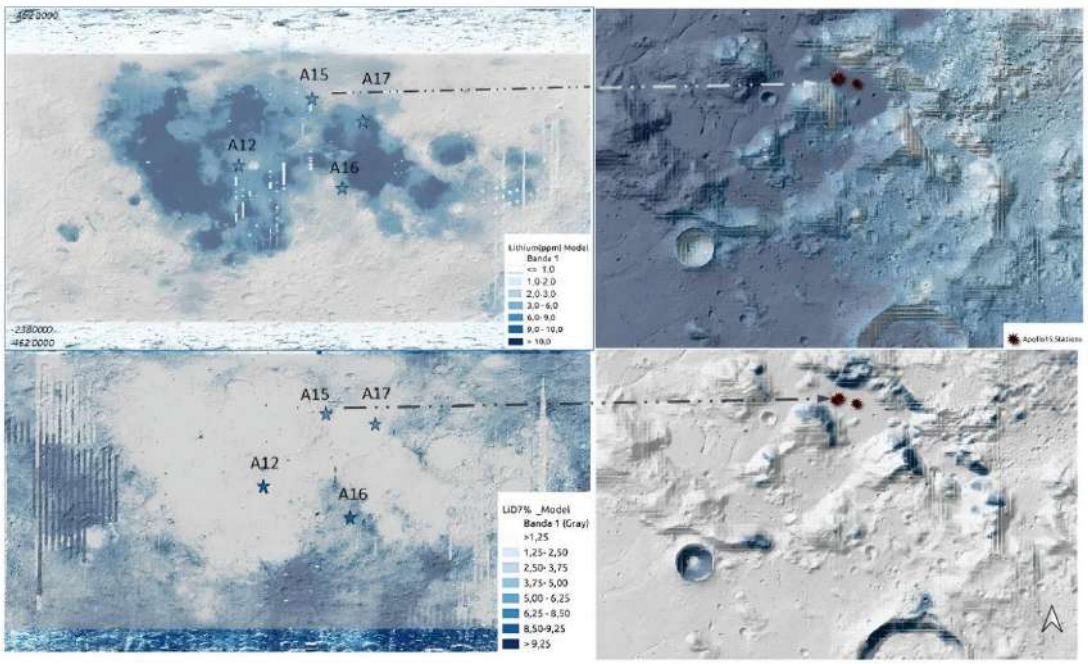


FIGURE 2. *Extended lithium (ppm) and 7Li‰ estimation models. Detailed mapping in the area of Apollo 15 landing site. The base maps are Clementine image (500m/pixel) and LOLA (50m/pixel). The projection system is GCS_moon_2000.*

Búsqueda de estructuras de impacto mediante el análisis de índices espectrales

Searching for impact structures through spectral index analysis

D. García de la Fuente y S. del Carmen Fernández

ICTEA. Instituto Universitario de Ciencias y Tecnologías Aeroespaciales de Asturias (Universidad de Oviedo). C/ Independencia 13, 33005, Oviedo, Principado de Asturias. uo256903@uniovi.es y fernandezmsusana@uniovi.es,

Resumen: La investigación se centra en emplear un nuevo método basado en teledetección que tenga utilidad en la búsqueda de estructuras de impacto. Para ello lo aplicaremos en la cuenca de Alhabia-Tabernas, en la provincia de Almería, donde recientemente se ha identificado una posible estructura de impacto. Mediante el uso de software libre concorde a la teledetección, se han analizado imágenes del óptico en el territorio en que se ubicaba el impacto. Se han aplicado varios índices espectrales relacionados con la composición geológica y mineralógica. El objetivo es comparar los valores de los índices dentro y fuera de la zona que ha sido marcada como afectada por el impacto. Se han usado descriptivos estadísticos y un t-test para valorar estadísticamente las poblaciones de índices para corroborar si existen indicios de alteración mineralógica compatible con la descrita en otras áreas mineralizadas por este fenómeno. Con el uso de imágenes de satélite se busca también ubicar con exactitud la zona posiblemente impactada y confirmar la viabilidad económica de la estructura, así como seguir investigando el área de estudio.

Palabras clave: Teledetección, impacto, índices espectroscópicos, mineralogía.

Abstract: *The research focuses on using a new method based on remote sensing that is useful in the search for impact structures. To do this, we will apply it in the Alhabia-Tabernas basin, in the province of Almeria, where a possible impact structure has recently been identified. Through the use of free software consistent with remote sensing, images from the optician in the territory where the impact was located were analyzed. Several spectral indices related to the geological and mineralogical composition have been applied. The objective is to compare the values of the indices inside and outside the area that has been marked as affected by the impact. Descriptive statistics and a t-test have been used to statistically evaluate the index populations to corroborate whether there are indications of mineralogical alteration compatible with that described in other areas mineralized by this phenomenon. The use of satellite images also seeks to accurately locate the possibly impacted area and confirm the economic viability of the discovery, as well as continue investigating the study area.*

Key words: *Remote sensing, impact, spectroscopy index mineralogy.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, de acuerdo con la EID (Earth Impact Database) se han identificado alrededor de 170 estructuras de impacto en la superficie terrestre, con diámetros de unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros. En España a día de hoy, no existen estructuras confirmadas de impacto (según la Earth Impact Database), aunque se sabe que ha habido impactos debido a que existe una capa del registro sedimentario que se ha demostrado de forma inequívoca que fue originada por impacto meteorítico (Smit y Hertogen, 1980). Esta es la capa de arcilla rica en Iridio del límite Cretácico-Terciario. El objetivo principal de este trabajo reside en la elaboración de un nuevo método que se puede emplear para la búsqueda de zonas que puedan tener interés mineralógico asociado a impactos de meteorito. Estos emplazamientos deberán ser áreas que, por su estructura, composición elemental y mineralógica puedan ser catalogadas como potencialmente originadas por impacto de meteoritos en la Península Ibérica. Para este estudio preliminar utilizaremos software libre. Además, se pretende rastrear zonas de rocas intensamente alteradas usando índices espectrales en imágenes de satélite Sentinel 2.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desde un punto de vista satelital, se catalogan emplazamientos geológicos que puedan ser catalogados como potenciales estructuras de impacto. Cada una de estas estructuras es analizada individualmente. En el caso de que se identifiquen evidencias petrográficas o geoquímicas contenidas en rocas provocadas por un metamorfismo de choque (French y Koeberl 2009), se procedería al siguiente paso que sería realizar un estudio mineralógico a través de índices espectrales calculados en las imágenes de satélite empleadas. Mediante el uso de la cartografía geológica del plan Magna (IGME), se ha tratado de identificar aquellas estructuras geológicas a lo largo de la Península Ibérica que presentaran algunos rasgos que las convirtiera en potenciales candidatos a ser interpretadas como estructuras de impacto. Algunas de estas características cartográficas son, por ejemplo, una geometría circular o una litología, la cual difiera significativamente en la edad geológica de las litologías

adyacentes mencionadas con anterioridad. Para llevar a cabo esta búsqueda, se han utilizado herramientas como el Visor cartográfico del IGME, así como los archivos con extensión kmz que el IGME tiene disponibles para la consulta de la cartografía geológica en Google Earth.

El análisis fue empleado en el posible descubrimiento de un cráter de impacto identificado (36º98'23.16"N, 2º55'95.61"O) en la provincia de Almería, más concretamente en la cuenca Alhabia-Tabernas (Sánchez-Garrido et al., 2022). En el estudio recogen que el posible descubrimiento del cráter provocado por impacto de meteorito, se encuentra enterrado aproximadamente a 1 km de profundidad. El cráter mediría 4 km de diámetro, aunque el borde de la estructura alcanzaría los 20 km donde el impacto provocó el colapso de los estratos sedimentarios. El posible meteorito pudo haber caído en la Tierra hace 8 millones de años. La investigación ha tenido en cuenta varios aspectos como la geología, mineralogía, geoquímica y geomorfología de la región. Las cuencas de Alhabia y Tabernas están llenas de sedimentos que datan de entre 5 y 23 millones de años, superponiéndose a rocas metamórficas más antiguas. Gran parte de la estructura de impacto está enterrada por sedimentos más modernos, pero la erosión la ha expuesto. La evidencia del cráter de impacto incluye varios ejemplos de granos de cuarzo deformados en brechas, aunque sólo se han encontrado hasta este momento 6 de los 20 granos de cuarzos deformados necesarios para poder hacer un examen estadístico. Además, este estudio también recoge el encuentro de shatter cones, estructuras de impacto terrestre, propuesto como criterio de impacto sin necesidad de usar microscopio. Sin embargo, es importante remarcar que de momento no se puede asegurar que el terreno que se está analizando en la provincia de Almería contenga dicho impacto. Necesitan reunir más datos para poder publicar el hallazgo y que se confirme que se trata de un cráter de impacto.

Para estudiar la posible existencia de indicadores geoquímicos en el entorno del posible impacto se utilizaron imágenes del satélite Sentinel 2A (fecha: 17 de octubre de 2022) del repositorio de la ESA/UE y mapas geológicos del área. Mediante el uso del programa llamado SNAP, las imágenes fueron recortadas para centrarse en el área del posible impacto. Posteriormente, se procedió al cálculo de índices espectrales relacionados con la geología y la geoquímica de las rocas. Estos índices sirven para identificar la presencia de minerales arcillosos, minerales ferrosos y óxidos de hierro entre otros.

En el programa QGis se crea una capa máscara circular que delimita la zona más directamente afectada por el posible impacto con un radio estimado de unos 4 kilómetros. El análisis que se ha realizado pretende comparar los valores de los índices espectrales dentro de un radio de 4 km del supuesto impacto, con los valores que tomarían estos índices en toda la zona**.** La capa máscara se ha usado para cortar los índices espectrales calculados en la imagen Sentinel con el programa Qgis y obtener dos poblaciones de valores de índices a comparar: 1- dentro del área afectada y 2- en una zona mucho más extensa. Para toda la zona y para la máscara se han generado mapas de puntos aleatorios con la herramienta vectorial que proporciona Qgis (véase Fig. 1). En el caso de la máscara la cantidad de puntos es de 1000 (blancos), mientras que, en el caso del mapa, el número de puntos asciende a 1050 (gris), al tener mayor superficie y así, evitar confusiones con los dígitos. Con los puntos generados aleatoriamente, se procede a extraer valores de cada índice para cada uno de los puntos con el uso de la herramienta Point Sampling Tool. Los valores de los índices en cada punto se han exportado a dos ficheros csv. El análisis estadístico se ha realizado con el entorno de desarrollo integrado dedicado a la computación estadística y gráfica RStudio. Principalmente se usan códigos para obtener gráficos descriptivos de las dos poblaciones de datos como histogramas, diagramas en caja y diagramas de dispersión. También se realiza un análisis estadístico descriptivo, obteniendo valores como los cuantiles, la media o la mediana. Finalmente, mediante el t-test, se analiza si los valores de los índices obtenidos para los puntos de la máscara y para el mapa entero representan poblaciones estadísticamente diferentes. En caso de haber algún individuo cuyos valores sean atípicos comparados con los demás, ese valor es omitido.

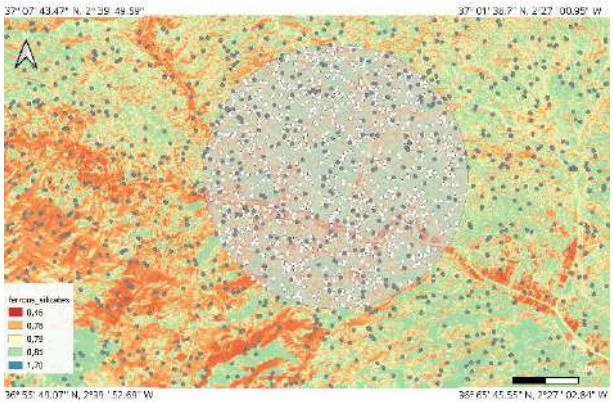
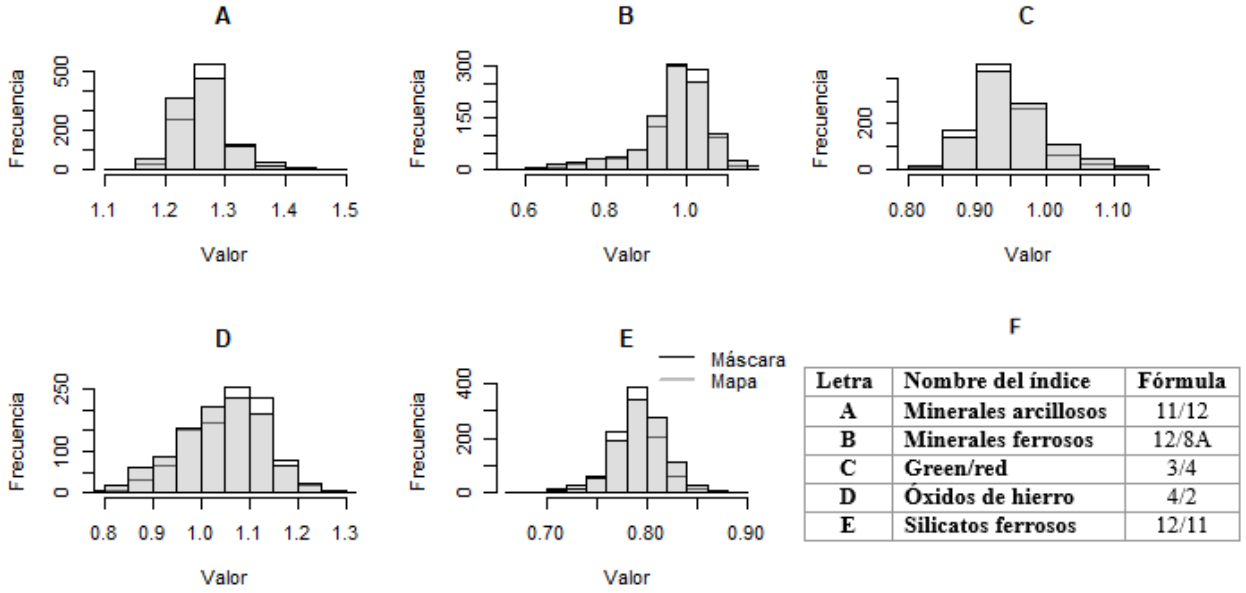


FIGURA 1. *Mapa de la zona del posible cráter de impacto, con una capa que representa un radio de 4 km desde el epicentro del impacto. Los puntos blancos representan los valores de los individuos de la máscara, mientras que los puntos grises los del mapa. El mapa representa el índice de silicatos ferrosos.*

Conociendo estos detalles del estudio de Sánchez-Garrido et al. (2022), se procede a realizar un análisis espectral del estado de alteración de la zona mediante el uso de varios índices de teledetección (véase Fig. 2F) con aplicaciones tanto en minería como en geología y agricultura. Estos índices son aplicados en las imágenes del satélite Sentinel 2A del programa Copérnico con fecha del 17 de octubre de 2022, mediante el uso de software de SNAP y Qgis. La interpretación de los índices consiste en una breve descripción del índice, la fórmula necesaria para calcularlo y el autor o el primer artículo científico donde fue mencionado dicho índice. El estudio estadístico descriptivo va acompañado de gráficos donde se comparan las poblaciones del interior de la máscara (color blanco) y del mapa (color gris), además de los resultados del t-test realizado.



Letra	Nombre del índice	Fórmula
A	Minerales arcillosos	11/12
B	Minerales ferrosos	12/8A
C	Green/red	3/4
D	Óxidos de hierro	4/2
E	Silicatos ferrosos	12/11

FIGURA 2. *Histogramas comparando las poblaciones de la máscara (en blanco) con los individuos de la población del mapa (gris) A) Histograma de los minerales arcillosos. B) Histograma de los minerales ferrosos. C) Histograma de la proporción Green/Red. D) Histograma de los óxidos de hierro. E) Histograma de los silicatos ferrosos. F) Tabla con los nombres de los índices y sus respectivas fórmulas.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Minerales arcillosos

La correspondencia de minerales arcillosos (Volesky et al, 2003) es una proporción entre las bandas de infrarrojo de banda corta 1 y 2 (SWIR1 y SWIR2). Esta relación aprovecha el hecho de que los minerales hídricos, como la arcilla, la alunita o la laterita, absorben la radiación en la parte de 2.0-2.3 micras del espectro. Este índice atenúa los cambios de iluminación debidos al terreno, tratándose de una proporción. También mide el nivel de alteración de la zona. Los individuos a partir del valor 1.25, son más frecuentes en la máscara que en la totalidad de la zona. Sin embargo, por debajo de este valor, la frecuencia es mayor en el mapa (véase Fig. 2A). Por último, los valores son muy similares en todos los rangos a excepción del rango de valores entre el 1.2 y el 1.3. El p-valor es menor de 0.05, por lo que hay una alta probabilidad de que exista una diferencia significativa entre las medias de ambas poblaciones.

Minerales ferrosos

Los minerales ferrosos (Segal, 1982) resultan de la proporción entre la banda de infrarrojo de banda corta 1 y la banda de infrarrojo cercano 1 (SWIR1 y NIR). También se puede calcular con la banda corta 2 en vez de la banda corta 1. Varios de los minerales que se pueden detectar con este índice son la magnetita, hematita, goethita o siderita entre otros, así como la proporción de hidróxido de hierro y de materia orgánica. Estos se encuentran en rocas ígneas y sedimentarias, teniendo implicaciones importantes en la exploración de recursos minerales. Los individuos que se encuentran en la máscara (véase Fig. 2B), presentan unos valores inferiores prácticamente en la totalidad de todos los rangos a excepción del rango entre el 0.75 y 0.8, así como en el rango situado entre el 0.95-1.05. La concentración de minerales ferrosos parece mayor y sus individuos tienen unos valores superiores en una distribución más amplia que en la región de la máscara. Ejecutando el t-test, el p-value es de 0.999. Hay una alta probabilidad de que no exista ninguna diferencia significativa entre las medias de ambas poblaciones. Se pueden considerar que ambas poblaciones de individuos pueden ser iguales.

Green/Red

La proporción Green/Red (Thenkabail et al., 2015) se calcula como la relación entre la reflectancia de la luz en la banda verde y la reflectancia en la banda roja. Es utilizado para estimar la salud y la densidad de la vegetación. La tendencia muestra (véase Fig. 2C), como los valores de los individuos del mapa es superior en casi todos los ámbitos salvo por la excepción del rango de valores 0.85-0.95 donde el predominio de los valores se encuentra dentro de la máscara. El p-value muestra un valor muy por debajo del 0.05, indicando una alta probabilidad de que exista una diferencia significativa entre las medias de ambas poblaciones.

Óxidos de hierro

El índice de los óxidos de hierro (Segal, 1982) consiste en una proporción entre las longitudes de onda roja y azul. La presencia de filosilicatos con contenido limonítico y una alteración del óxido de hierro limonítico provocan una absorción en la banda azul y reflectancia en la banda roja. De hecho, las áreas con una gran alteración de hierro brillan. La naturaleza de esta relación permite que el índice atenúe las diferencias de

iluminación causadas por las sombras del terreno. Este índice es un indicador importante a la hora de realizar cartografía geológica y explotación de recursos minerales, estando relacionado con los dos índices anteriores, el de óxidos férricos y minerales ferrosos, ya que la presencia de óxidos de hierro puede estar asociada con la presencia de minerales ferrosos como la magnetita, hematita, goethita o siderita. Se puede apreciar un mayor rango de valores en la extensión del mapa (véase Fig. 2D), además existe una mayor concentración de datos en todos los rangos, salvo la excepción del rango 1.05-1.2, donde predomina la distribución de los valores de la máscara. Elaborando el t-test el p-value muestra un valor muy por debajo del 0.05, revelando una alta posibilidad de que exista una diferencia significativa entre las medias de ambas poblaciones.

Silicatos ferrosos

El índice de silicatos ferrosos (Clark *et al.*, 1990), se define como la proporción entre la banda de infrarrojo de banda corta 1 y 2. Es una medida cuantitativa utilizada en petrología y geología para estimar la cantidad de silicatos ferrosos que contiene la roca como pueden ser olivino, piroxeno y anfíboles. Los individuos de la máscara (véase Fig. 2E) presentan unos valores superiores a los del mapa hasta el rango de valores de 0.8, donde la tendencia cambia y estos empiezan a ser superiores en la extensión del mapa. En los resultados del t-test, el p-value es muy inferior a 0.05, existiendo una alta probabilidad de que exista una diferencia significativa entre las medias de ambas poblaciones.

CONCLUSIONES

La literatura científica ha documentado la posible identificación del primer cráter en la Península. Se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de la región utilizando una amplia gama de índices espectrales para representar la mineralogía y características geológicas. Es crucial tener en cuenta que la interpretación de los datos de los índices debe realizarse con cautela y en combinación con información de campo y otros datos geológicos. Factores como la iluminación solar, la textura de la superficie y la presencia de materiales adicionales en la superficie de la Tierra pueden influir en los valores del índice. La región del supuesto cráter muestra una concentración similar de minerales arcillosos, minerales ferrosos, silicatos ferrosos y óxidos de hierro que sus alrededores. Además, la vegetación parece más saludable y densa en esta superficie. Para obtener un resultado más relevante y comprobar los datos de este análisis preliminar, se debería de hacer un estudio del relieve y un análisis geológico detallado junto con alguna otra técnica de teledetección exploratoria como por ejemplo el análisis del infrarrojo térmico, nocturno y diurno. Se recomienda llevar a cabo un estudio más detallado utilizando otras herramientas para corroborar estos resultados. Hay que recordar que este método se ha empleado sobre un cráter que se encuentra enterrado 1km por debajo de la superficie, por lo tanto, en caso de cráteres superficiales puede ser muy útil y ser de gran ayuda a la hora de buscar mineralogía producida por metamorfismo de contacto, o incluso buscando una mineralogía en específico en orden para desarrollar tecnologías como pueden ser los minerales de tierras raras. Asimismo, hay que resaltar el poder económico que puede tener para minas o canteras ya sea comprobando el potencial que tiene un territorio en específico.

REFERENCIAS

Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., y Vergo, N. (1990): High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B8), 12653-12680

Copernicus Browser (2015): Browser de Copernicus para visulaizar y descargar imágenes. https://browser.dataspace.copernicus.eu.

Earth Impact Database (2014): Mapa con todos los impactos de crateres confirmados en la Tierra. http://passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/World.html.

French, B.M. y Koeberl, C. (2009): The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What Works, what doesn´t and why. *Earth-Science Reviews*, 98, 123-170.

Sánchez Garrido, J. A., Ormö, J. O., Alwmark, C., Alwmark, S., Zachen, G., Lilljequist, R., y Sánchez Gómez, S. T. (2022): *A probable impact structure in Betic Cordillera, Almeria, SE Spain*, Europlanet Science Congress, Granada, Spain, 18–23 Sep 2022, EPSC2022-217.

Segal, D. (1982): TheoreticalBasis for Differentiation of Ferric-Iron BearingMinerals, Using Landsat MSS Data. *Proceedings of Symposium for Remote Sensing of Environment*, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology, Fort Worth, TX. 949-951.

Smit, J. y Hertogen, J. (1980): An extraterrestrial event at the Cretaceous–Tertiary boundary. *Nature*, 285, 198-200.

Thenkabail, P.S., Ojha, C., Tennesen, K.J., Lakshmi, V., Oliphant, L. y Gassert, E.D. (2015). Assessing agricultural drought in the Midwest United States using multi-scale remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 168, 311-326.

Visor Cartográfico del IGME (2018): Visor Cartográfico del Instituto Geológico y Minero de España. https://info.igme.es/visor/?Configuracion=igme.

Volesky, J.C., Stern, R.J. y Johnson, P.R. (2003). Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies. *Precambrian Research*, 123 (2-4), 235-24.

Desarrollo de un simulante lunar para la realización de estudios de aprovechamiento de recursos in situ.

Development of a lunar simulant for conducting in-situ resource utilization studies.

A.L. Marqués Sierra[1], R. Vázquez González[1], M. Favila Fernández[1], L.M. Rodríguez Terente[2]

1 Institute of Space Sciences and Technologies of Asturias (ICTEA), In Situ Resource Utilization Laboratory (ISRU LAB). C/ Independencia 13. 33004, Oviedo Spain. marquesantonio@uniovi.es
2 Institute of Space Sciences and Technologies of Asturias (ICTEA), Oviedo University Geological Museum, C/ Jesús Arias de Velasco, 33005 Oviedo, Spain. rodriguezluis@uniovi.es

Palabras clave: lunar samples, regolithe, simulants

Resumen

Las muestras de regolito y rocas traídas a la Tierra por las misiones Apolo, unos 285 kg, han sido estudiadas durante décadas y han servido como patrón para fabricar materiales similares que pudieran utilizarse para simular las propiedades geotécnicas de los suelos lunares. En la actualidad existen multitud de simulantes lunares, cada uno de ellos con características análogas a diferentes zonas de los suelos lunares. Dadas las misiones proyectadas a la Luna en los próximos años, es necesario disponer de simulantes que puedan utilizarse para investigar diferentes áreas, desde la construcción o abrasión de materiales hasta la extracción de oxígeno o los cultivos. En este punto, el ICTEA vio la necesidad de contar con un simulante de producción propia para investigar en diversas áreas dentro de las líneas de investigación actuales. La proximidad de varios afloramientos basálticos de los que se disponía de caracterización previa facilitó el desarrollo de este nuevo simulante denominado ICTEA-01. La fabricación de este material permite investigar en diversos aspectos cruciales para el aprovechamiento in situ de los recursos. En este trabajo se describirá el procedimiento seguido para la caracterización de potenciales materias primas para su producción y en base a los resultados obtenidos las características del simulante ICTEA 01.

Abstract

The samples of regolith and rocks brought back to Earth by the Apollo missions, around 285 kg, have been studied for decades and have served as a pattern to manufacture similar materials that could be used to simulate the geotechnical properties of lunar soils. Currently, there are numerous lunar simulants, each with characteristics analogous to different areas of the lunar soils. Given the missions projected to the Moon in the coming years, it is necessary to have simulants that can be used to investigate different areas, from construction or material abrasion to oxygen extraction or crops. At this point, the ICTEA saw the need to have its own production simulant to investigate in various areas within the current research lines. The proximity of several basaltic outcrops with prior characterization facilitated the development of this new simulant named ICTEA-01. The manufacturing of this material allows for research in various crucial aspects for the in-situ utilization of resources. This work will describe the procedure followed for the characterization of potential raw materials for its production and, based on the obtained results, the characteristics of the ICTEA 01 simulant.

Referencias

Giuseppe D., et al., (2022). The Potential for Lunar and Martian Regolith Simulants to Sustain Plant Growth: A Multidisciplinary Overview Astron. Space Sci., DOI=10.3389/fspas.2021.747821

Suescun-Florez, E., Roslyakov, S., Iskander, M., and Baamer, M. (2015). Geotechnical Properties of BP-1 Lunar Regolith Simulant. *J. Aerosp. Eng.* 28, 04014124. doi:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000462

Zheng, Y., Wang, S., Ouyang, Z., Zou, Y., Liu, J., Li, C., et al. (2009). CAS-1 Lunar Soil Simulant. Adv. Space Res. 43, 448–454. doi:10.1016/j.asr.2008.07.006

Reconstrucción hidrológica de un sistema valle-abanico en Coprates Catena, Marte.

Hydrological reconstruction of a valley-fan system in Coprates Catena, Mars.

A. Molina [1,2], I. Herreros [1,3], M.Á. de Pablo [2], D. Pascual [1], A. Caramanico [4], T. Martínez-Pérez [1], B. Gómez [1,2,5], M. Reboredo Prado [1], C. Haukes [1,2]

1 Centro de Astrobiología (CSIC/INTA) Ctra de Torrejón a Ajalvir, km 4 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid. España amolina@cab.inta-csic.es
2 Universidad de Alcalá Ctra. A-II km 33,600. 28805 Alcalá de Henares, Madrid. España.
3 Universidad Carlos III de Madrid, España.
4 Universitá degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara, Italia.
5 Afiliación actual: Cebreros Deep Space Satellite Tracking Station (ESA). Cebreros, Avila. España.

Resumen: La historia del agua en Marte es aún objeto de debate; actualmente, el agua se mantiene estable únicamente como hielo debido al frío extremo y baja presión atmosférica global. En Coprates Catena se puede observar un canal que desemboca en una estructura escalonada en forma de abanico situada sobre una depresión tectónica. El objetivo de este trabajo es simular el proceso completo de excavación del canal y la formación de estos relieves sedimentarios observados, así como determinar si la existencia de una lámina de agua rellenando la depresión tectónica antes mencionada es compatible con la forma y dimensiones del abanico. Bajo la hipótesis de que este abanico se formó en dos etapas diferenciadas, aquí reproducimos ambas fases para analizar sus condiciones. Nuestra simulación numérica utiliza un modelo de dos capas integrado en profundidad que proporciona nueva información sobre la composición de los sedimentos, el contenido de agua intersticial, la profundidad de la posible lámina de agua y el potencial para la conservación de biomarcadores en la zona. Nuestro estudio aporta nuevas pruebas de la existencia de una lámina de agua de larga duración, arrojando luz sobre el potencial de vida en el planeta rojo y su historia geológica.

Palabras clave: Geología planetaria, Habitabilidad, Teledetección, Modelización numérica, Deltas

Abstract: *The water history on Mars is still a subject of debate; currently, water remains stable only as ice due to global extreme cold and low pressure. In Coprates Catena, there is a channel that flows into a tectonic depression, carrying materials that form a stepped fan-shaped structure. The objective of this work is to simulate the complete process of excavation of the channel and the formation of these sedimentary reliefs, as well as to determine whether the existence of a water sheet filling the aforementioned tectonic depression is compatible with the shape and dimensions of the fan. Under the hypothesis that this fan was formed in two distinct stages, we reproduce both phases here to analyze their conditions. Our numerical simulation uses a depth-integrated two-layer model that provides new information on sediment composition, interstitial water content, depth of the possible water sheet, and the potential for the preservation of biomarkers in the area. Our procedure provides new evidence for the existence of a long-lived sheet of water, shedding light on the potential for life on the red planet and its geological history.*

Key words: *Planetary geology, Habitability, Remote sensing, Numerical modeling, Deltas*

INTRODUCCIÓN

La región de Coprates Catena (Figura 1), en Marte, se encuentra marcada por tectónica extensional. En ella destaca un sistema tipo valle-abanico, que cruza un horst hasta desembocar en un amplio graben. Trabajos previos (Di Achille, et al., 2006; Weitz et al., 2006, Grindrod et al., 2018) sugieren que esta estructura escalonada en forma de abanico indica que en el pasado existía una lámina de agua permanente que cubría el cañón. Según la morfotectónica local, los procesos relacionados con aguas subterráneas podrían haber estado activos desde el Hespérico hasta principios del Amazónico, lo que implica condiciones ambientales favorables para la aparición de flujos de lodo durante ese período. La práctica ausencia de erosión y meteorización en Marte, hace que una vez formados, este tipo de depósitos se conserven prácticamente inalterados durante millones de años, registrando en ellos las condiciones ambientales y geológicas pasadas.

El objetivo de este trabajo es simular el proceso completo de excavación del canal y la formación de estos relieves sedimentarios. Bajo la hipótesis de que este abanico aluvial se formó en diferentes etapas, con un lapso de tiempo intermedio, aquí reproducimos la fase inicial y la fase final para analizar las diferentes condiciones y determinar si se trata de abanicos aluviales (subaéreos) o deltas (subacuático). Mediante la combinación iterativa de reconstrucciones topográficas y modelización mecánica, podemos restringir las condiciones de formación de estos procesos superficiales que tuvieron lugar en el pasado de Marte.

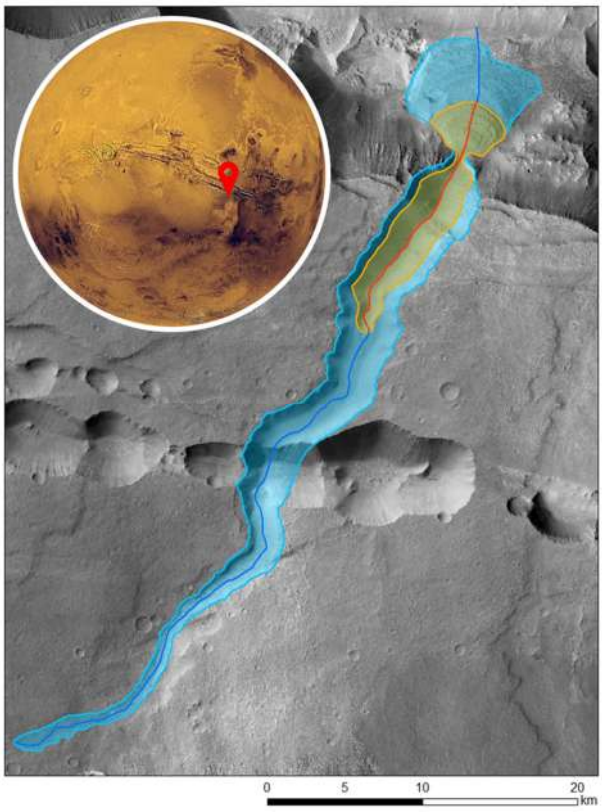


FIGURA 1. *Arriba a la izquierda, localización de Coprates Catena en el globo de Marte (14º 59' S; 60º15' W), al sur de Valles Marineris. Debajo, delimitación de los dos episodios considerados sobre un mosaico de imágenes CTX, el subacuático en azul y el subaéreo en naranja.*

METODOLOGÍA

Comenzamos realizando una reconstrucción "hacia atrás", modificando la topografía hasta aproximar las condiciones de la zona antes del evento desencadenante (Herreros et al., 2021; Molina et al., 2021). Sustraemos el volumen de material en forma de abanico, rellenando el canal con la masa equivalente (Figura 2). Mediante geología interpretativa identificamos que puntos de la topografía observada no ha sido modificados tras el evento y se reconstruyen las áreas alteradas utilizando un algoritmo de interpolación de tipo "thin plate spline" desarrollado en MATLAB (Figura 3). El material movilizado, condición inicial necesaria para alimentar el modelo numérico, se obtiene entonces con la diferencia entre ambas topografías reconstruidas, que luego se interpola en una malla computacional no estructurada.

Para la reconstrucción "hacia delante" del evento se realiza un estudio numérico sistemático utilizando un modelo de dos capas basado en las ecuaciones de Navier-Stokes integradas en profundidad (Pastor et al., 2009) con diferentes modelos constitutivos combinados con leyes de fricción con el fondo (Donea, 1984. Peraire et al., 1986, Zienkiewicz et al., 2005). El modelo resultante permite la simulación dinámica del deslizamiento del flujo en condiciones subaéreas y subacuáticas, proporcionando el tiempo de llegada y la distancia de escurrimiento del flujo, así como el volumen y la forma finales del depósito.

Dado que esta estructura en abanico se formó en varias fases, con un lapso de tiempo intermedio (Di Achille, et al., 2006; Weitz et al., 2006, Grindrod et al., 2018), hemos dividido el evento en dos episodios diferentes: El episodio más antiguo (Figura 2, en azul), que se asume como una deposición subacuática debido a la presencia de un lago profundo dentro del cañon (Grindrod et al., 2018); y el episodio más reciente (Figura 2, en naranja), que se considera un abanico aluvial que se depositó sobre el delta subacuático anterior (Weitz et al., 2006).

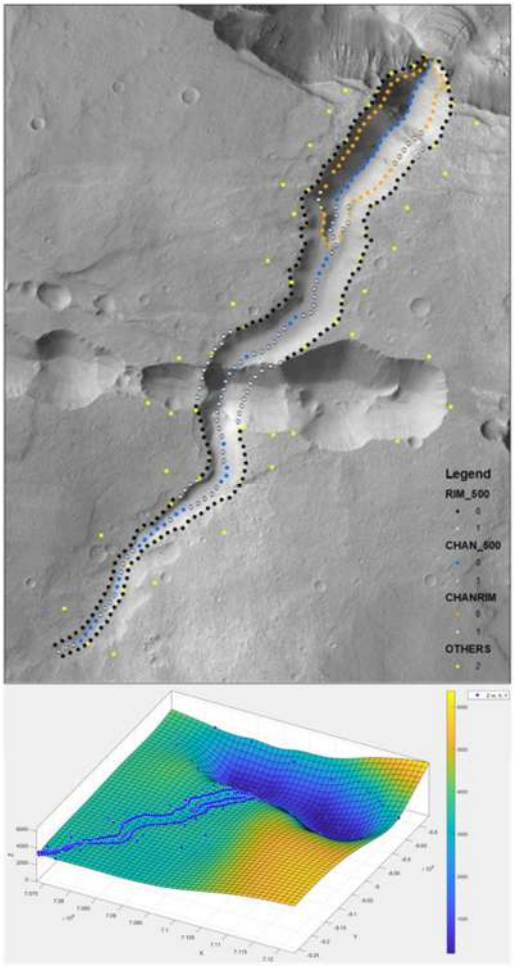


FIGURA 3. *Arriba, puntos utilizados para la reconstrucción topográfica del canal. (Naranja: episodio más joven; Negro: episodio más antiguo; Azul: thalweg; Amarillo: puntos de referencia fuera del canal; Blanco: puntos pertenecientes a zonas alteradas que deben calcularse). Abajo, reconstrucción del canal y el cañón utilizando una interpolación tipo "thin plate spline" en MATLAB.*

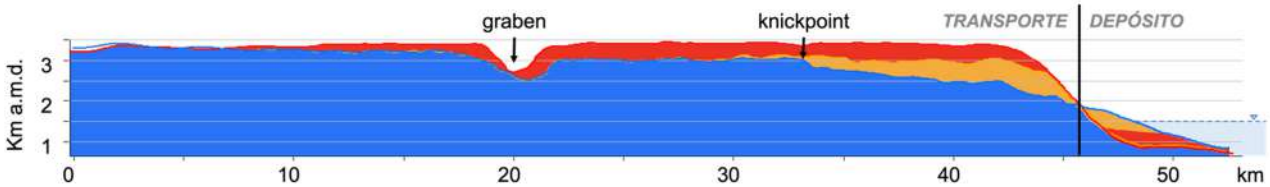


FIGURA 2. *Perfiles topográficos (ver Figura 1) para el thalweg (azul) y el borde del talud para ambos episodios, el más antiguo (rojo) y el más joven (naranja). La línea negra vertical marca el límite entre la deposición y el transporte. La línea azul discontinua muestra el nivel del paleolago*

RESULTADOS

La tectónica relacionada con el sistema horst/graben de Coprates se reactivó después de la creación del canal en el episodio más antiguo (Figura 4E y 4F), produciendo varias contracciones y fallas que alteran su forma. Como consecuencia, aplicando el modelo mecánico directamente a la topografía observada produce que el material no fluya adecuadamente. Por tanto, la reconstrucción "hacia atrás" requiere revertir modificaciones posteriores de esos rasgos sin alterar en exceso la forma original de la superficie a fin de proporcionar una entrada válida para el modelado mecánico. Gracias al método utilizado (Figura 3), obtuvimos las topografías del canal previas (Figura 4A y 4E) y posteriores (Figuras 4B y 4F) a los dos episodios, respetando la morfología del canal, pero eliminando los depósitos sedimentarios en su desembocadura.

Para la reconstrucción "hacia delante", realizamos múltiples simulaciones de la formación de estos depósitos utilizando distintas leyes reológicas de fluidos newtonianos, friccionales y de Bingham (Donea, 1984. Peraire et al., 1986). La densidad, la viscosidad y el límite elástico de la mezcla se relacionan mediante la ecuación constitutiva para un fluido de Bingham (Herreros et al., 2021). El contenido de agua intersticial se calcula a partir de la expresión empírica para mezclas agua-arcilla de tipo caolinita (Maciel et al., 2009). En la Tabla 1 se muestran los parámetros finales que mejor se ajustan a la morfología observada.

Respecto al episodio más moderno, nuestros resultados (Figura 4D, Tabla 1) es compatible con un flujo de lodo de mezcla de arcilla y agua de tipo caolinita, con un contenido de agua intersticial de aproximadamente el 55%. Para el episodio más antiguo, utilizando el mismo material y contenido de agua que en este episodio, la reconstrucción "hacia delante" del evento mediante simulación numérica no reproduce la forma final y la altura del depósito observadas. Con estos mismos parámetros y considerando la existencia de un paleolago que rellene el cañón con diferentes alturas, como se sugiere en Weitz et al., 2006, tampoco coincide con las observaciones. Sin embargo, al aumentar el contenido de agua intersticial de la masa deslizante al 62% y definir una lámina de agua de 1500 m de profundidad cubriendo el cañón, la reconstrucción del evento si se ajusta a las observaciones (Figura 4H, Tabla 1). Este hallazgo, apoya la hipótesis de dos episodios diferentes para la formación del abanico, con diferentes cantidades de agua, y la existencia de un paleolago de gran profundidad durante el episodio más antiguo estudiado.

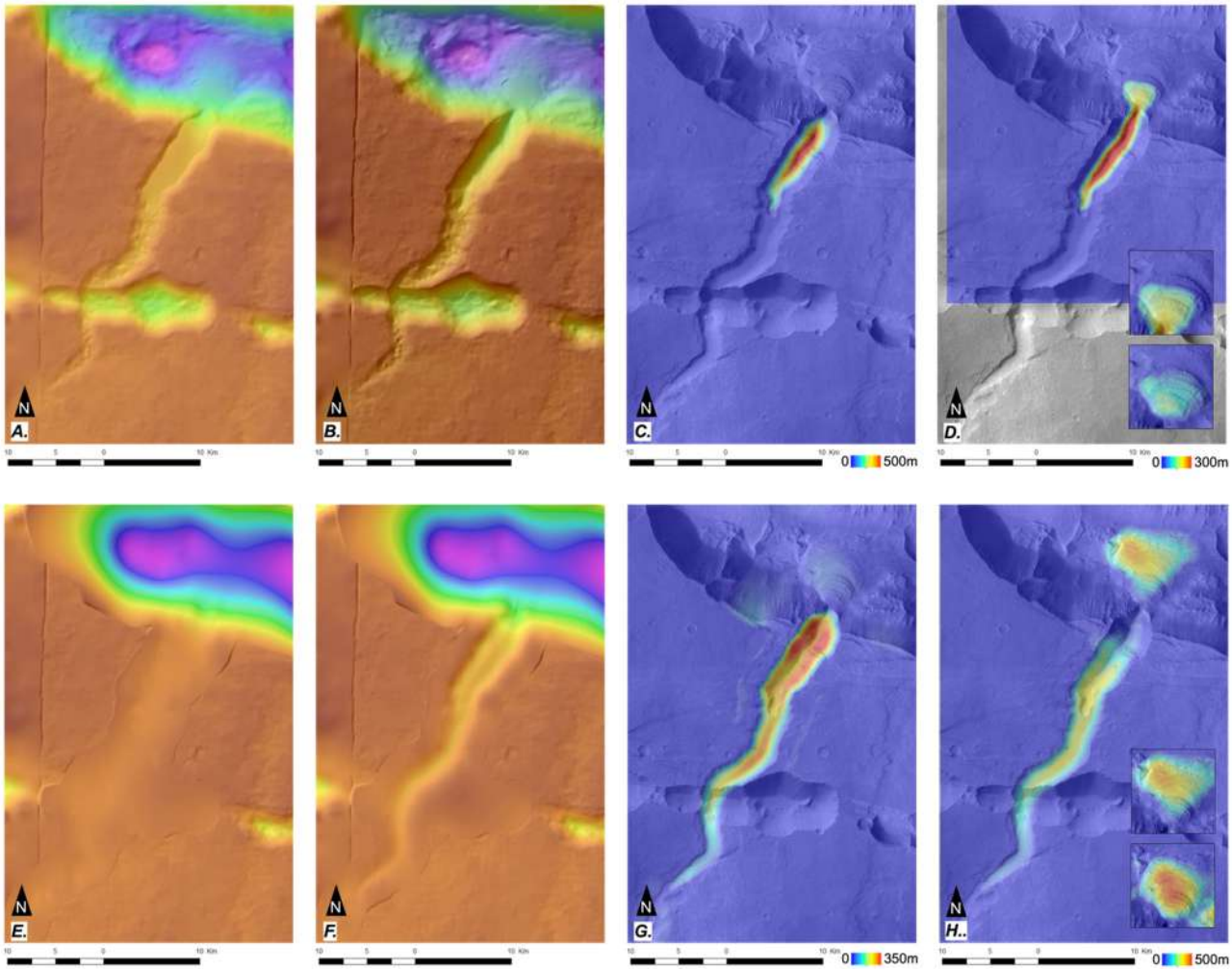


FIGURA 4. Reconstrucción "hacia delante" del episodio más joven (del A al D, naranja en las Figuras 1 y 2) y más antiguo (del E al H, azul y rojo respectivamente en las Figuras 1 y 2). Topografía antes (A y E), después (B y F) del evento y condición inicial obtenida con la diferencia entre ambas (C y G). El resultado del modelado numérico y comparación de la forma del abanico observado (abajo) y su reconstrucción (arriba) se muestran en D y H para el episodio más moderno y más antiguo, respectivamente.

CONCLUSIONES

El método propuesto permite la reconstrucción de la topografía previa de la superficie de estudio y la simulación dinámica del deslizamiento del flujo transicional, tanto subaéreo como subacuático, proporcionando el tiempo de llegada y la distancia recorrida, así como su volumen y forma deposicionales finales. Los resultados obtenidos arrojan nueva luz sobre la composición del sedimento, el contenido de agua intersticial y la profundidad del agua del lago, limitando así las condiciones ambientales y la naturaleza del proceso. Este exitoso resultado demuestra el gran interés de este procedimiento para la reconstrucción de procesos geológicos pasados, abriendo la puerta a su aplicación a otras zonas de Marte, u otros cuerpos planetarios, con el fin de estudiar diferentes procesos geológicos.

	Episodio joven	Episodio antiguo
Densidad (kg/m^3)	1722	1606
Viscosidad ($Pa{\cdot}s$)	0.114	0.958
Límite elástico (MPa)	1.53	0.07
Contenido en agua (%)	55	62

TABLA I. *Parámetros finales utilizados en el modelo mecánico para obtener los resultados que se muestran en las Figura 4D (episodio joven) y 4H (episodio antiguo).*

AGRADECIMIENTOS

A. Molina agradece al proyecto EDRIM (VAPC 202250I104), D. Pascual al programa JAE Intro 2022 (JAEINT_22_00950, JAEINT22_EX_0770), T. Martínez-Pérez al programa PEJ-2023-AI/COM-27246, y A. Caramanico al proyecto INTIME (Grant agreement ID: 823934; DOI 10.3030/823934).

REFERENCIAS

Di Achille, G., Ori, G. G., Reiss, D., Hauber, E., Gwinner, K., Michael, G., & Neukum, G. (2006). A steep fan at Coprates Catena, Valles Marineris, Mars, as seen by HRSC data. *Geophysical research letters*, 33(7).

Grindrod, P. M., Warner, N. H., Hobley, D. E. J., Schwartz, C., & Gupta, S. (2018). Stepped fans and facies-equivalent phyllosilicates in Coprates Catena, Mars. *Icarus*, *307*, 260-280.

Weitz, C. M., Irwin III, R. P., Chuang, F. C., Bourke, M. C., & Crown, D. A. (2006). Formation of a terraced fan deposit in Coprates Catena, Mars. *Icarus*, *184*(2), 436-451.

Herreros, I., Molina, A., Martínez-Pérez, T., Bacallado, A., Mata, S., & Gómez, B. (2021). Alluvial fan at Coprates Catena in Valles Marineris, Mars: new modeling insights (No. EPSC2021-116). *Copernicus Meetings*.

Molina, A., Herreros, I., Martínez-Pérez, T., Mata, S., & Gómez, B. (2021). Reconstructing a Martian channel-fan formation iteratively with mapping and mechanical modeling (No. EPSC2021-129). *Copernicus Meetings*.

Pastor, M., Herreros, I., Merodo, J. F., Mira, P., Haddad, B., Quecedo, M., ... & Drempetic, V. (2009). Modelling of fast catastrophic landslides and impulse waves induced by them in fjords, lakes and reservoirs. *Engineering Geology*, 109(1-2), 124-134.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). The finite element method for solid and structural mechanics. *Elsevier*.

Donea, J. (1984). A Taylor–Galerkin method for convective transport problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, *20*(1), 101-119.

Peraire, J., Zienkiewicz, O. C., & Morgan, K. (1986). Shallow water problems: a general explicit formulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 22(3), 547-574.

Maciel, G. D. F., Santos, H. K. D., & Ferreira, F. D. O. (2009). Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31, 64-74.

Características geológicas del sistema binario de asteroides Didymos.

Geological features on the Didymos binary asteroid system.

L. M. Parro[1], A. Campo Bagatin[1], N. Trógolo[1], S. R. Schwartz[1]

1 IUFACyT, Universidad de Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig – Alicante, laura.mparro@ua.es

Palabras clave: asteroides, superficie, cráteres, lineamientos, cartografía.

Resumen

El 26 de septiembre de 2022, la misión DART (Double Asteroid Redirection Test), NASA, realizó la primera demostración de una desviación intencionada con fines de defensa planetaria, y mediante un impacto cinético contra el asteroide de tipo S, Dimorphos (~160 m), satélite y cuerpo secundario del asteroide binario cercano a la Tierra (65803) Didymos (780 m de tamaño). Antes y después del impacto, DART, junto con la nave espacial LICIAcube, proporcionó excepcionales imágenes en detalle tanto de Didymos como de Dimorphos, revelando formas oblatas y superficies rocosas para ambos asteroides (Daly *et al.*, 2023). Durante los últimos minutos, y hasta dos segundos antes del impacto, la cámara DRACO a bordo de DART captó imágenes de alta resolución de Dimorphos a diferentes escalas espaciales. La resolución máxima oscila entre ~3,9 m/píxel para Didymos y ~0,055 m/píxel para Dimorphos en el lugar del impacto. Presentamos evaluaciones actuales de las superficies y características de los asteroides Didymos y Dimorphos, y exploramos los posibles procesos responsables de su formación y evolución geológica. Distinguimos diferentes regiones geológicas en Didymos según su rugosidad (Barnouin *et al.*, 2023), y describimos movimientos de masas y lineamientos, los cuales buscamos replicar mediante simulaciones numéricas. También analizamos la distribución y localización de grandes acumulaciones de bloques y partículas en superficie (entre decenas de cm hasta ~16 m), y decenas de cráteres en ambos asteroides. Por último, comparamos la geología de sus superficies con la de otros asteroides tipo pila de escombros o con abultamientos ecuatoriales.

Abstract

On September 26th, 2022, NASA's DART (Double Asteroid Redirection Test) mission performed the first demonstration of a kinetic impact deflection for planetary defense purposes by impacting the ~160 m S-type asteroid Dimorphos, the secondary body of the near-Earth binary asteroid (65803) Didymos (780 m-size). Before and after impact, DART, along with the LICIAcube spacecraft, provided exceptional close-up images of both Didymos and Dimorphos, revealing oblate shapes and rocky surfaces for both asteroids (Daly *et al.*, 2023). During the last minutes and up to two seconds before the impact, the DRACO camera aboard DART captured high-resolution images of Dimorphos at different spatial scales. Peak resolution ranges from ~3.9 m/pixel for Didymos and ~0.055 m/pixel for Dimorphos at the impact site. We present current assessments of the surfaces and features of Didymos and Dimorphos asteroids and explore the possible processes responsible for their geological formation and evolution. We distinguished different geological regions (Barnouin *et al.*, 2023) and described mass movements and lineaments, which we aim to replicate by numerical simulations. We also analyzed the distribution and location of great quantities of boulders (between tens of cm up to ~16 m) and tens of craters in both Didymos and Dimorphos. Finally, we compare their surface configuration with other rubble-pile or top-shape asteroids.

Referencias

Daly, R.T., *et al.* (2023). Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence. *Nature* 616, 443–447, doi.org/10.1038/s41586-023-05810-5.

Barnouin, O. *et al.* (2023). The geology and evolution of a the Near-Earth binary asteroid system (65803) Didymos., 11 October 2023, *PREPRINT (Version 1) available at Research Square*, doi.org/10.21203/rs.3.rs-3399230/v1

Classification, analysis and exploration of planetary caves and pits across the Solar System.

Clasificación, análisis y exploración de cuevas planetarias y cráteres de hundimiento en el Sistema Solar.

L. M. Parro[1], G. López-Martinez[2] M. de Luis[3] y A. Crisol[1]

1 Universidad de Alicante. 03690 Sant Vicent del Raspeig, Alicante. laura.mparro@ua.es
2 Valencian International University, Spain
3 Universidad de Alcalá de Henares. 28801 - Alcalá de Henares, Madrid.

Abstract: Across the solar system, whether on planets, satellites, or even small bodies (asteroids, comets), have been described collapsing structures reminiscent of various geological terrestrial morphologies such as caves. There are several theories and mechanisms described to explain their origin, which may be different according to the nature, composition, and maximum size of each planetary body. On the Moon or Mars, these sinkholes may be related to subsurface cavities that give access to a lava tube. As on our planet, due to the properties to preserve their own microclimate, these pits, and possible associated caves, are very promising astrobiological regions. In addition, the surroundings of these geological features could host the first human exploration settlements. The goal of this work is to begin to define a global classification of "pits" for each individual planetary body in order to select the best candidates suitable for sending future missions to study it in detail. Here, we show an example of a lunar pit crater selection of the best candidates using data from the LROC atlas, Kaguya (SELENE) mission maps, or LOLA LRO lunar maps. The different criteria could change to adopt the main objectives of each mission and the specific parameters of each rocky/icy object.

Key words: caves, pit crater, planetary surfaces, geomorphology, exploration.

Resumen: *Por todo el sistema solar, ya sea en planetas, satélites o cuerpos más pequeños (asteroides o cometas), se han encontrado estructuras de hundimiento o colapso que recuerdan a varias morfologías geológicas terrestres. Existen varias teorías y mecanismos descritos para explicar su origen que, además, puede ser diferente según la naturaleza, composición y tamaño máximo de cada cuerpo planetario. En la Luna o Marte, se han identificado cientos de estos hundimientos que pueden estar relacionados con cavidades subsuperficiales que da acceso a un tubo de lava. Al igual que en nuestro planeta, debido a las propiedades para preservar su propio microclima, estas aberturas, y las posibles cuevas asociadas, son regiones astrobiológicas muy prometedoras. Además, los alrededores de estos accidentes geológicos podrían acoger los primeros asentamientos humanos de exploración. El objetivo de este trabajo es comenzar a definir una clasificación global de estos "pits" para cada cuerpo planetario individual, con el fin de seleccionar las mejores escenarios para enviar futuras misiones que lo estudien en detalle. También mostramos un ejemplo de selección de los mejores candidatos de cuevas lunares usando datos del atlas LROC, mapas de la misión Kaguya (SELENE), o mapas lunares de LOLA LRO. Los diferentes criterios podrían cambiar para adoptar los objetivos principales de cada misión y los parámetros específicos de los cuerpos del sistema solar.*

Palabras clave: *cuevas, cráteres de subsidencia, superficies planetarias, geomorfología, exploración.*

INTRODUCTION

Pit craters are geological subsidence or collapse features found on various planets, satellites, and small bodies, including our planet (Figure 1). They are essentially circular-cylindrical spots, holes, or depressions that lack raised rims or ejecta blankets typically seen in impact craters. Several theories and processes attempt to explain their origins, and many of these pits may be related to subsurface cavities or at least subsurface access points (e.g., Wynne et al., 2022).

Similar to how lava tubes-skylights are formed on the Earth, on Moon and Mars, pits could be the entrance to underground spaces created when lava tube ceilings are not resistant enough to support their weight and collapse (Hong et al., 2014; Okubo and Martel, 1998). Some could even be interconnected if their origin is the same volcanic tube through which lava flowed in the past.

Due to their properties to preserve their own microclimate, planetary pit craters, and potential subsurface caves are promising astrobiological regions (Phillips-Lander et al., 2020). Furthermore, the

surroundings of these geological features could host the first human settlements on Mars and the Moon, offering not only a possible natural shelter from radiation (Titus et al., 2021; Figure 2) but also access to natural resources (e.g. ice water) or the study of materials more pristine than those found at the surface.

Studying the morphology, distribution, composition, and formation process of pit craters on various planetary bodies can provide insights into their own geologic history and evolution, including the potential for subsurface habitable environments. After decades of remote sensing planetary exploration, hundreds of possible subsurface entrances have been identified on the Moon and Mars. Meanwhile, in icy or partially ice bodies, whether moons or smaller bodies such as Europa, Ganymede, Enceladus, Vesta, or Ceres, pits are related mainly to tectonic fracturing or cryovolcanism (Wynne et al., 2022). In turn, in some asteroids, we identify chains of pit craters probably formed by the drainage of regolith in subsurface extensional fractures (Martin et al., 2017). The aim of this work is starting to define a global classification of pits on each individual planetary body to select the best candidates suitable for establishing a scientific exploration base.

Future planetary missions can benefit from this information. The different criteria could change to adopt the main goals of each mission and the specific parameters of the solar system bodies.

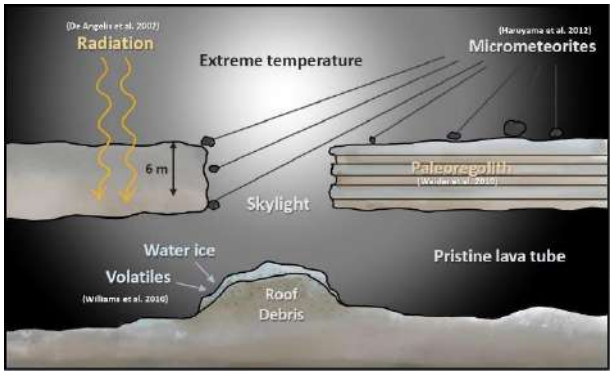


FIGURE 2. The internal representation of the cavity below the pit crater.

CATEGORIZATION

Categorizing pit craters on different planetary bodies is done in different ways, depending on the scientific objectives and the available data. Some possible approaches include:

- By morphology: Pit craters can have various shapes and sizes, including the possible inner spaces beneath them.
- By type of the processes that created them [e.g., 8, 9, table I].
- By location: Their distribution can be based on the host terrain or related to different geological events or other geological features such as impact craters, volcanic regions, or faults.
- By age or degradation stage: Pit craters can be dated using various methods, such as counting impact craters in the host terrain or in the floor of the inner voice.

Dominant Process	*Examples on Earth*	*Potential Locations in the Solar System*
Rock dissolution	Karstic caves (halite, gypsum, carbonate)	Mars, Titan, Ceres
Erosion or mechanical abrasion	Sea caves, aeolian rock shelters	Mars, Venus, Titan
Tectonism, fracturing from internal or external movements	Tectonic caves	Moon, Mars, Titan, Europa, Enceladus, Ganymede, Vesta, Asteroids
Volcanism	Colpase lava tubes or magma chambers	Moon, Mars, Venus, Io
Sublimation	Glacial caves, ice caves (i.e., ice in bedrock)	Vesta, comets, Icy bodies

TABLE I. *Cave Classification by Process. Modified from Titus et al. (2020).*

METHODOLOGY

By analyzing the Lunar atlas with 278 pit craters (Wagner and Robinson, 2021) we plan a selection of the most optimal candidates (Figure 3) for habitability, giving priority to candidates that could be the entrance to possible underground caves formed by lava tubes (Wagner and Robinson, 2021), figure 2) and considering different selection criteria:

1) Morphological characteristics. The depth should be greater than 6 m to obtain radiation protection and the entrance type to be considered (vertical or lateral).
2) Proximity to other cave candidates and possible internal connections.
3) Relations with various geological structures (such as lobate scarps, wrinkle ridges, maria, or impact craters).
4) Origin and formation.
5) Proximity to areas more suitable for landing on the Moon.
6) Geological units (access to pristine subsurface stratigraphy) and their proximity areas abundant in resources (water ice or REE).

	Abundance Fe-Ti	**Magnetic anomaly**	**Thermal signature**	**Volcanic features**	**D (m)**	**Inner space (m)**
LMP	poor	yes		Colindant with rime	60	
MTP	rich	yes	yes	Near to collapsed lava tube	105	Ceilin: 47 Space: 20
MIP	rich	yes	yes		55	Ceilin: 50 Space: 10-20
MHP	rich	yes		On a volcanic channel	49	Ceilin: 23 Space: 12

TABLE II. *Resume of the parameters of our selected Lunar cavities.*

RESULTS: Example selection on the Moon

Following our selection criteria, these are the 4 most promising cave entrances, including GRAIL gravity anomaly maps in each case:

1) LMP is located at a latitude of 45°, near the Bürg rille, which is not cataloged as a volcanic channel but whose beginning is near two ancient volcanoes. The terrain is very poor in iron and titanium. The LMP is located in a magnetic anomaly.
2) The location of MIP makes it somewhat isolated, on the far side of the Moon, but it is located above a swirl (strong magnetic anomaly). Also coincides with a region of lower gravity detected by GRAIL.
3) MTP is right next to a collapsed lava tube that is aligned with a sublunar hole detected in a lower gravity area and in a terrain rich in iron and titanium.
4) MHP has the most promising potential for Skylight. MHP is located right on a volcanic channel in Marius Hills, one of the most diverse volcanic regions on the Moon, a very rich terrain in Ti-Fe [13], which would lead to less viscous lavas (bigger lava tubes). Also situated above a lower gravity area, where subsurface hollow structures have been detected using Kaguya LRS data (Kaku et al., 2017).

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

After decades of remote sensing planetary exploration, thousands of possible subsurface entrances, cavities, or pits have been identified across our solar system. Pit craters vary depending on their size, morphology, and the process involved in their creation.

There is a linear correlation in the diameters of the pits between some planetary bodies according to their size. On the Moon and Mars, our knowledge about these features and the presumed ancient lava tubes or cavities to which they would give access can still be improved.

Related to Lunar selection (Table II), we applied our selection criteria and scored each pit registered in the atlas. We determined that the most suitable candidate could be MHP, followed by MTP, MIP, and finally, LMP. Future work encompasses a detailed investigation using the data from the Lunar Radar Sounder of Kaguya to ensure there are sublunarean voids related to the proposed lunar skylights.

Future planetary missions can benefit from this information. The different criteria of selection could change to adopt the main goals of each mission and the specific parameters of the solar system bodies.

ACKNOWLEDGMENTS

LMP acknowledges support from the Margarita Salas UCM postdoctoral grants funded by the Spanish Ministry of Universities with European Union funds – NextGenerationEU and the CIAPOS/2022/066 postdoctoral grant Generalitat Valenciana (European Social Fund).

REFERENCIAS

Hong, I-S., et. al. (2014): Investigation of the Characteristic Nighttime Temperature of Potential Caves on Mars. *J. Astron. Space Sci.* 31(2), 131-140.

Kaku, T., et al. (2017): Detection of Intact Lava Tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder. *Geo. Res. Letters* 44(20), 10155.

Martin et al. (2017): Pit chains on Enceladus signal the recent tectonic dissection of the ancient cratered terrains. *Icarus*, 294, 209–217

Okubo, C. H., and Martel, S.J. (1998): Pit crater formation on Kilauea volcano, Hawaii. *J. of Volc. and Geothermal Res.* 86, 1–18.

Phillips-Lander, C., et al. (2020): Mars Astrobiological Cave and Internal habitability Explorer (MACIE): A New Frontiers Mission Concept. *MACIE Decadal Survey white paper*.

Titus et al. (2020): Planetary Cave Exploration Progresses. *Eos*, 101.

Titus, T.N., et al. (2021): A roadmap for planetary caves science and exploration. *Nature Astronomy* 5, 524-525.

Wagner and Robinson (2022): Lunar Pit Morphology: Implications for Exploration. *JGR Planets* 127.

Wynne et al. (2022): Fundamental Science and Engineering Questions in Planetary Cave Exploration. *JGR Planets* 127

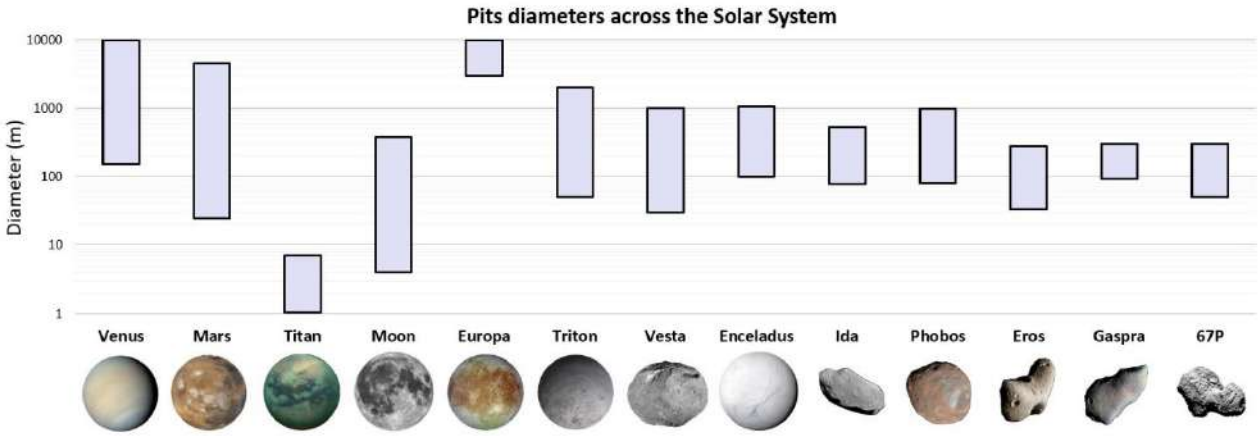


FIGURE 1. *Possible pits craters and caves sizes across the Solar System in many planetary bodies.*

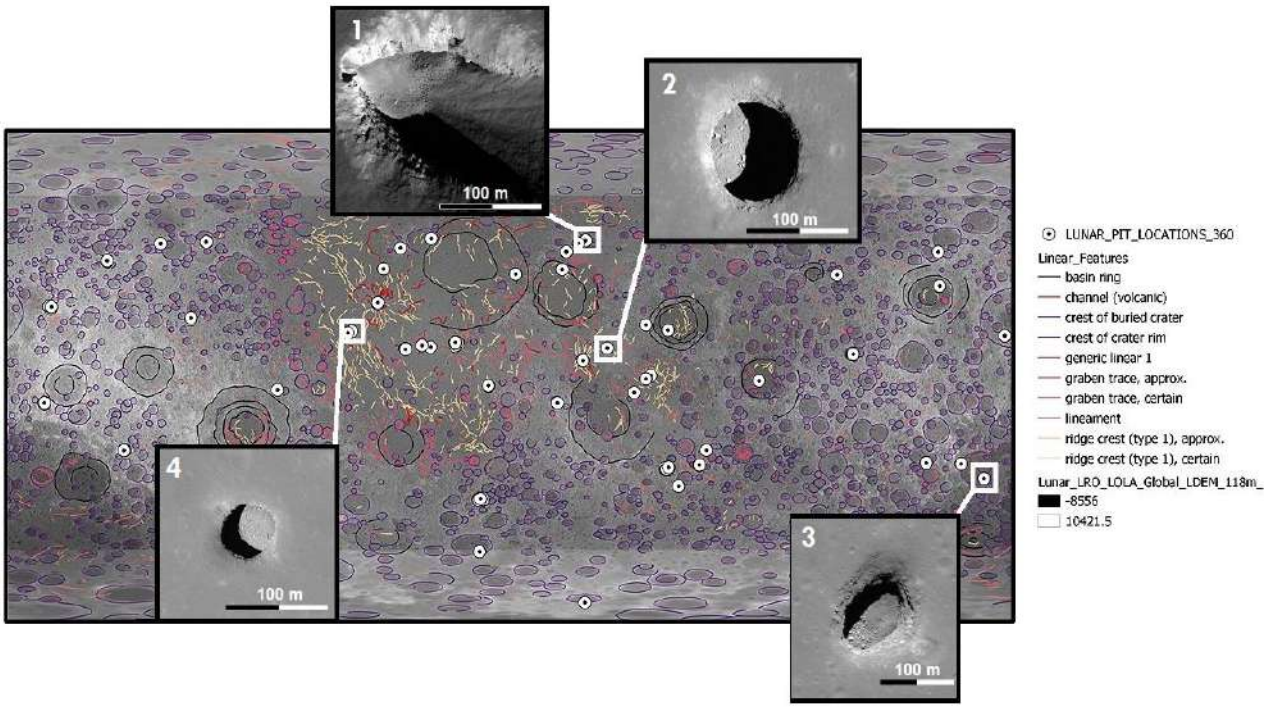


FIGURE 3. *Location of all possible Lunar caves' entrances (white dots) over the LOLA-LRO (NASA) elevation model, including some geologic structures (basin rings, volcanic channels, ridges, grabens, lineaments ridges) [12], and the selection of our last four best candidates for future exploration and habitability: (1) Lacus Mortis Pit (LMP); (2) Mare Tranquilitatis Pit (MTP); (3) Mare Ingenii Pit (MIP); and (4) Marius Hills Pit (MHP).*

Texturas y geoquímica de tectitas del límite Cretácico-Paleógeno de la sección de Zumaia (Guipuzkoa).

Textures and geochemistry of tektites from the Cretaceous-Paleogene boundary of the Zumaia section (Guipuzkoa).

A. Rodríguez Pérez[1], S. Roces Heres[1], P. García Monte[1], G. Bernaola[2] y O. García-Moreno[1,3]

1 Dpto. Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005, Oviedo (Asturias) garciaolga@uniovi.es
2 Dpto. Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, UPV/EHU, Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao
3 Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología, UO-CSIC-PA. Av. la Vega, 4, 6, 33940 El Entrego (Asturias)

Palabras clave: tectitas, Zumaia, límite K/T, extinción, impacto.

Resumen

La sección de Zumaia (Gipuzkoa) es bien conocida por ser una de las secciones auxiliares del GSSP de la base del Daniense (*Molina et al., 2009*). En dicha sección se encuentra el límite Cretácico-Paleógneo (KPB) representado por una capa de arcilla. De las muestras de esta capa de arcilla se han separado 38 microesférulas, que pueden definirse como esferulitas "tipo tectitas". El tamaño de las tectitas estudiadas es de, al menos 75 micras, estableciendo para el estudio una categoría de 75-212 micras y otra de tamaños mayores a 212 micras. Entre ellas se han identificado dos principales tipos por separación magnética, y dentro de las no magnéticas, otros dos subtipos en función de la naturaleza de la matriz, silicatada o carbonatada. La principal característica de las tectitas estudiadas radica en su composición, mayoritariamente compuestas de cristales de pirita con distintas texturas en una matriz de diferente naturaleza según los tipos definidos. En este trabajo se presenta la caracterización textural de las distintas tipologías de microesférulas encontradas en esta sección, así como una caracterización geoquímica de los cristales y la matriz presentes en las mismas. Las composiciones encontradas en las microesférulas de este estudio difieren tanto en su química total como mineral con respecto a estudiadas en otras localidades donde se encuentra definido este bien estudiado límite (*James et al., 2023*).

Abstract

The Zumaia section (Gipuzkoa) is well known for being an auxiliary section for the (GSSP) for the base of the Danian (*Molina et al., 2009*). This section contains the Cretaceous-Paleogene (KPB) boundary represented by a clay layer. From the samples of this clay layer, 38 microspherules have been separated, which can be defined as "tektite-type" spherulites. The size of the studied tektites is, at least 75 microns, establishing for the study a category of 75-212 microns and another one of larger than 212 microns. Among them, two main types have been identified by magnetic separation, and within the non-magnetic ones, two other subtypes: silicate or carbonate, depending on the matrix nature. The main characteristic of the studied tektites lies in their composition, mostly composed of pyrite crystals with different textures in a matrix of different nature according to the defined types. In this work, we present the textural characterization of the different types of microspherules found in this section, as well as a geochemical characterization of the crystals and matrix present in them. The compositions found in the microspherules in this study differ in both their total and mineral chemistry from those studied in other localities where this well-studied boundary is defined (*James et al., 2023).*

Referencias

Molina, E., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J.A., Gallala, N., Grajales-Nishimura, J.M., Murillo-Muñetón, G., and Zaghbib-Turki, D., 2009, The GSSP for the base of the Danian Stage (Paleocene, Paleogene, "Tertiary", Cenozoic): Auxiliary sections and correlation. *Episodes*, 32, 84–95.

James, S., Chandran, S. R., Aswathi, J., Padmakumar, D., & Sajinkumar, K. (2023). Geologic, geomorphic, tectonic, and paleoclimatic controls on the distribution and preservation of Chicxulub distal ejecta: A global perspective. *Earth-Science Reviews*, 104545.

Metodología para el estudio del subsuelo de estructuras en Zona Circumpolar Norte de Marte con radar SHARAD (Shallow Radar en Mars Reconnaissance Orbiter).

Methodology for the study of the subsurface of structures in the North Circumpolar Zone of Mars with radar SHARAD (Shallow Radar on Mars Reconnaissance Orbiter).

M. Sánchez-Bayton[1], M. Herraiz[2,3] , B. Sánchez-Cano[4] y P. Martin[5].

1. Dpto de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas. UCM. 28040. Plaza de Ciencias 1. Madrid. marinasanchezbayton@ucm.es.
2. Dpto de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas. UCM. 28040. Plaza de Ciencias, 1. Madrid. mherraiz@fis.ucm.es
3. Instituto de Matemática Interdisciplinar, Facultad de Matemáticas, UCM, 28040, Plaza de Ciencias, 1. Madrid. mherraiz@fis.ucm.es
4. STFC Ernest Rutherford Fellow, Lecturer, School of Physics and Astronomy, Planetary Science groupUniversity of Leicester, University Road, LE1 7RH &Space Park Leicester, 92 Corporation Rd, LE4 5SP. Leicester, United Kingdom. bscmdr1@leicester.ac.uk.
5. European Space Astronomy Centre, Camino Bajo del Castillo s/n, Villanueva de la Cañada, 28692 Madrid. patrick.martin@esa.int

Resumen:
Se presenta un estudio de estructuras geológicas ubicadas en la región circumpolar norte de Marte que se está llevando a cabo en la actualidad, utilizando datos de subsuperficie obtenidos del radar SHARAD (Shallow Radar en Mars Reconnaissance Orbiter). Aunque el área de estudio incluye las regiones de Olympia Undae y Scandia Cavi, en esta comunicación solo se comentan las estructuras situadas en la primera área que es el campo de dunas continuo de yeso más grande de Marte. El objetivo es complementar estudios geomorfológicos previos con el enfoque en profundidad, así como la posibilidad de medir y visualizar estas pequeñas estructuras en comparación con el resto del área de dunas. El uso conjunto de datos de elevación obtenidos de MOLA (Mars Global Surveyor) e información proporcionada por SHARAD ofrece una buena manera de obtener información completa de estos edificios tanto en elevación como en subsuperficie. Esta comunicación presenta los principales puntos de la metodología utilizada y algunos de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Marte, Polo Norte, Olympia Undae, radar, subsuperficie.

Abstract:
A new study of structures located in the northern circumpolar region of Mars is presently being conducted by using the subsurface radar, SHARAD (Shallow Radar on Mars Reconnaissance Orbiter). Although the study area includes Olympia Undae and Scandia Cavi regions, in this Communication only structures situated in the first area are commented. This area is the largest continuous dune field on Mars and one of its biggest gypsum deposits. The objective is to complement previous geomorphological studies with the approach to their shape in depth, as well as the possibility of measuring and visualizing these small structures compared to the rest of the dune area. The joint use of elevation data obtained from MOLA (Mars Global surveyor) and information given by Sharad offers a good way to get the shape of these buildings both in elevation and subsurface. This Communication presents the main points of the used methodology and some of the obtained results.

Key words: Mars *Northern circumpolar region, Olympia Undae, SHARAD radar.*

INTRODUCCIÓN

Se presenta un estudio en curso que aborda el análisis de la subsuperficie de edificios de pequeño y medio tamaño localizados en el mar de dunas de Olympia Undae y en Scandia Cavi, zona circumpolar norte de Marte. Para poder realizar este análisis ha sido necesario basarnos en el estudio llevado a cabo previamente que permite detectar y analizar un grupo de 200 estructuras situadas entre 72°-80° N y 150°-230° E (Sánchez-Bayton et al., 2022a, Sánchez-Bayton et al., 2022b).

Para presentar la metodología seguida se ha elegido como ejemplo del estudio realizado de edificios geológícos en subsuperficie como pueden ser los domos, conos, pequeños volcanes y cráteres de impacto, se elige uno de tamaño pequeño y parcialmente cubierto en el mar de dunas de Olympia Undae, perteneciente a la clasificación de *Irregular Structures (IS)* (Sánchez-Bayton et al., 2022a, Sánchez-Bayton et al., 2022b).

Estos edificios IS, son semejantes a los Tholis (Tanaka et al., 2003) estudiados en Scandia Cavi, pero de menor tamaño en superficie. Para completar el conocimiento de estas estructuras, parcialmente enterradas en el mar de dunas, hemos buscado la forma de estudiarlas en subsuperficie. Para ello hemos utilizado los datos de radar proporcionados por SHARAD, debido a su mejor resolución en bajas profundidades.

METODOLOGÍA

Con este objetivo se ha seguido la siguiente metodología:

1- Elección de las estructuras que pueden ser analizadas en subsuperficie.

2- Búsqueda y selección de radargramas que pasan por nuestros edificios.

3- Visualización y elección de varios radargramas que crucen nuestros edificios que presenten buena calidad de datos y crucen el edificio en diferentes secciones.

4- Dibujo de perfiles de los edificios en radargramas. Para ello se utiliza el programa JMARS (Christensen et al., 2009).

5- Procesado de los datos de subsuperficie correspondientes.

6- Análisis en superficie de los perfiles procesados mediante el uso de datos de elevación MOLA, sobre imágenes Context Camera (CTX) de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO).

7- Obtención de datos e información sobre las estructuras.

Las figuras 1, 2 y 3 presentan la metodología seguida y los datos obtenidos con este método sobre el edificio IS-03 (radargrama S_0131940). La figura 1 contiene el perfil del radargrama y elevación que lo cruza sobre una imagen CTX. A continuación, figura 2, se muestra el radargrama y un zoom en la parte que corresponde a este edificio. La figura 3 presenta los perfiles de resultados.

RESULTADOS

En el estudio realizado se ha podido comprobar que las estructuras mayores de 20 km de diámetro que se encuentran situadas en Olympia Undae y Scandia Cavi, pueden ser observables en los radargramas que las cruzan, siendo posible medirlas a través de datos de radar.

Estas estructuras no habían sido nunca estudiadas con tanto detalle y profundidad tanto con datos topográficos como de radar. Su mejor conocimiento aporta información sobre su estructura, posible naturaleza y su composición interna.

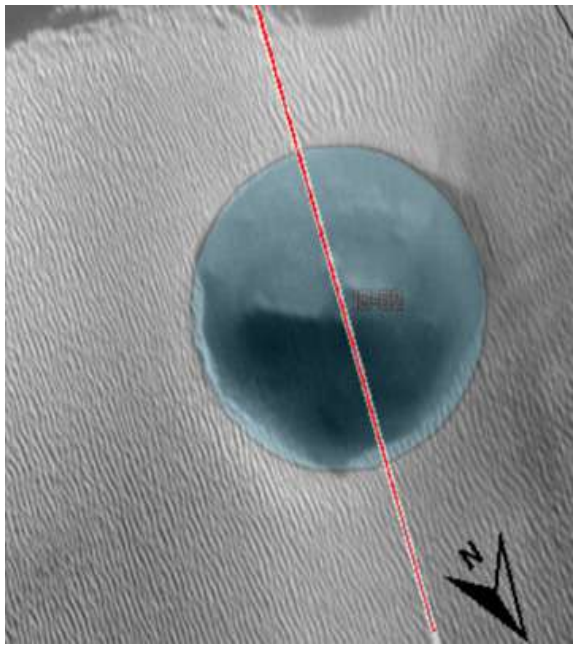


FIGURA 1. *Edificio IS-02 marcado en azul, sobre el que se observa en blanco el cruce del radargrama S_02334701 que se presenta en la parte inferior de la figura 3, y en rojo los perfiles en superficie y radar correspondientes en elevación que se presenta en la parte superior de la figura 3 y radar en la parte inferior, sobre imagen CTX.*

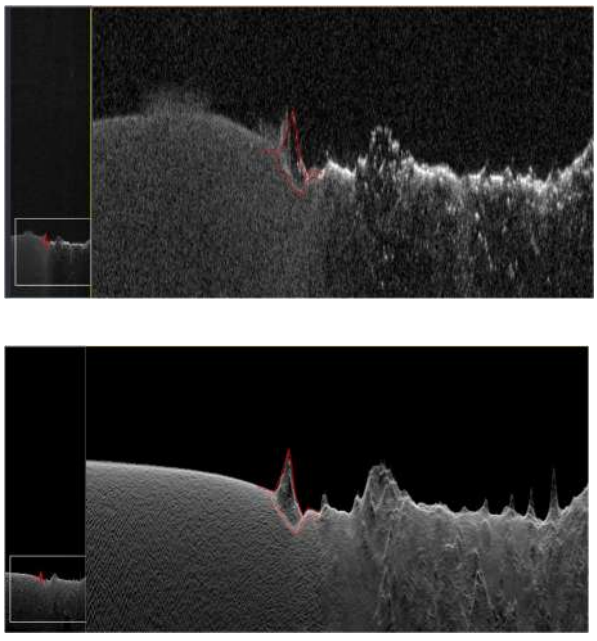


FIGURA 2. *Radargrama Sharad S_02334701, En la parte* superior se *presenta el radargrama completo y con un cuadro blanco en zoom el edificio IS-02 donde se ve la estructura estudiada así como su influencia en profundidad sobre la zona circundante, dibujadas en rojo, y cuyos datos se presentan en la parte inferior de la figura 3. En el panel inferior se presenta el cuttergram correspondiente que ayuda a la interpretación de la composición del edificio.*

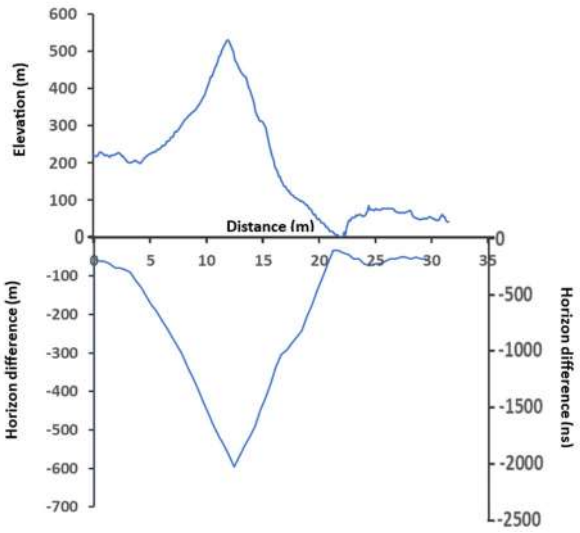


FIGURA 3. *Perfil superior: Datos de elevación en metros (figura 1), Perfil inferior: Datos de radar sobre subsuelo obtenidos a partir de la diferencia entre los perfiles superior e inferior dibujados y marcados en figura 2. Las Unidades utilizadas son nanosegundos.*

REFERENCIAS

Christensen, P. R. Engle, E. Anwar, S. Dickenshied, S. Noss, D. Gorelick, N. Weiss-Malik, M. (2009): JMARS - A Planetary GIS. American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract id.IN22A-06.

Sánchez-Bayton, M. Herraiz, M. Martin, P. Sánchez-Cano, B. Tréguier, E. Kerezsturi, A. (2022): Morphological analyses of small and medium size landforms in Scandia Cavi and Olympia Undae, Northern circumpolar region of mars. Planetary and Space Science. Vol 210. https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105389

Sánchez-Bayton, M. Herraiz, M. Martin, P. Sánchez-Cano, B. Tréguier, E. Kerezsturi, A. (2022): Morphometric and topographic data of small and medium size landforms in the Northern Circumpolar Region of Mars. Data in Brief, vol 43. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108417

Tanaka, K. L. Skinner Jr, J. A. Hare, T. M. Joyal, T. and Wenker, A. (2003): Resurfacing history of the Northern Plains of Mars based on geologic mapping of Mars Global Surveyor data, J. Geophys. Res., 108,GDS 24-1–GDS 24-32, https://doi.org/10.1029/2002J

Límites de detección de minerales comunes en la superficie de Marte a partir de datos de espectroscopía VNIR-SWIR.

Detection limits of common minerals on the surface of Mars from VNIR-SWIR spectroscopy data.

A. Santamaría-López[1], M. Suárez[1]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca. a.santamaria@usal.es, msuarez@usal.es

Resumen: En los últimos años la identificación de minerales en la superficie de Marte se ha visto impulsada por la aplicación de la espectroscopía en el rango de longitudes de onda del espectro visible, el infrarrojo de cercano y el infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR). La identificación mediante esta técnica puede verse limitada cuando las superficies estudiadas presentan varios minerales mezclados. En este estudio se han establecido límites de detección de minerales descritos en el planeta a partir de mezclas ternarias preparadas en el laboratorio. Los resultados indican que se precisa al menos un 15% de esmectita para su identificación en muestras con augita o yeso; y un 5% en las que incluyen olivino. Augita, olivino y yeso precisan un 15%. La normalización mediante *continuum removal* y la segunda derivada mejora estos límites en el caso de esmectita y yeso (5%). En el caso de augita y olivino, el *continuum removal* limita su identificación en muestras con alta proporción de esmectita. La segunda derivada impide la identificación de augita y olivino independientemente de su porcentaje en la muestra.

Palabras clave: espectroscopía VNIR-SWIR, Marte, teledetección, esmectitas, yeso, augita, olivino.

Abstract: *In recent years the identification of minerals on the surface of Mars has been improved by the application of spectroscopy in the visible, near-infrared, and short-wave infrared (VNIR-SWIR) wavelength range. Identification using this technique could be limited in surfaces including several mixed minerals. In this study, the detection limits for minerals described on the planet have been established from ternary mixtures prepared in the laboratory. The results indicate that at least 15% smectite is required for its identification in samples with augite or gypsum; and 5% in those that include olivine. Augite, olivine, and gypsum require 15%. Normalization by continuum removal and the second derivative improves these limits in the case of smectite and gypsum (5%). In the case of augite and olivine, continuum removal limits their identification in samples with a high proportion of smectite. The second derivative prevents the identification of augite and olivine regardless of their percentage in the sample.*

Key words: *VNIR-SWIR spectroscopy, Mars, remote sensing, smectites, gypsum, augite, olivine*

INTRODUCCIÓN

La identificación de materiales geológicos mediante teledetección ha cobrado interés en las últimas décadas gracias a la implementación de técnicas hiperespectrales como la espectroscopía en el rango de longitudes de onda del espectro visible, infrarrojo cercano y de onda corta (VNIR-SWIR por sus siglas en inglés). Esta técnica permite caracterizar materiales en base al análisis de sus espectros de reflectancia. Estos últimos muestran bandas de absorción cuya disposición y morfología es característica de las fases minerales presentes en muestras poliminerálicas o en la superficie del terreno. Además, estos equipos son fácilmente transportables en drones o aeronaves, incluyendo satélites artificiales. Esto ha supuesto un impulso considerable para la exploración de cuerpos extraterrestres, incluyendo el planeta Marte. (e.g. Bishop et al., 2011). No obstante, la interpretación de los datos puede resultar difícil debido a la complejidad de los espectros obtenidos a partir de terrenos con alta diversidad mineralógica.

El mayor inconveniente radica en la superposición de las bandas de absorción de diferentes minerales. En consecuencia, es común obtener espectros cuyos rasgos divergen de los de las fases minerales por separado (Robertson et al., 2016). Esta dificultad puede verse agravada si la proporción de un componente es baja y la intensidad de sus bandas características queda atenuada o completamente obscurecida. En otros casos, determinadas mezclas frecuentes en materiales geológicos pueden incluir minerales no detectables aun siendo mayoritarios (Santamaría et al., 2024). En consecuencia, la comparación de estos datos con bibliotecas espectrales puede ser equívoca y es de interés establecer límites de detección de los minerales mediante esta metodología, por ejemplo, mediante la preparación de mezclas representativas en laboratorio. Puesto que resultaría inabarcable establecer límites de detección de

cada fase mineral existente, tanto más si estos límites están condicionados por las interacciones entre huellas espectrales individuales, esta aproximación metodológica debe acotarse a casos concretos de estudio.

La caracterización mineralógica de la superficie de marte se conoce cada vez mejor gracias a la aplicación de esta técnica. Ha permitido la identificación de varios minerales comunes incluyendo augita, olivino (Carrozzo et al., 2012), plagioclasa (Barthez et al., 2023), carbonatos (Cloutis et al., 2010), arcilla (Poulet et al., 2005), y yeso (Das et al., 2022). Mientras la augita, el olivino y la plagioclasa son minerales de origen ígneo habituales en antiguas coladas de lava marcianas, las esmectitas son minerales comunes que pueden resultar de la alteración de los anteriores. El yeso por su parte es un mineral crítico para el estudio de la vida en este planeta, en tanto que requiere agua para su formación.

El objetivo de este estudio es identificar los límites de detección mediante espectroscopía VNIR-SWIR de estos minerales cuando se encuentran combinados. Para ello se han preparado mezclas de estos minerales en el laboratorio y obtenidos sus espectros.

METODOLOGÍA

Los minerales mezclados fueron previamente pulverizados en mortero de ágata, y a continuación mezclados en diferentes proporciones para preparar muestras ternarias con un peso total de 2 g. Finalmente, las muestras se agitaron para obtener una distribución homogénea de granos minerales.

Los espectros se adquirieron con un espectrorradiómetro VNIR-SWIR ASD FieldSpec 4 High-Res que opera con tres detectores para cubrir en rango de longitudes de onda entre 350 y 2500 nm (3 nm y 8 nm de resolución espectral para los rangos VNIR y SWIR, respectivamente). Se utilizó Spectralon© como referencia blanca. Cada espectro final es el promedio de 25 espectros. Las muestras se prepararon en un porta muestras metálico y se midieron en contacto directo con la sonda, protegida con vidrio sin respuesta.

Para facilitar la comparación entre espectros y el establecimiento de límites de detección se utilizaron dos técnicas de normalización habituales en este tipo de estudios y de fácil implementación: el *continuum removal* (que modifica los espectros para definir una línea base común) y la obtención de la segunda derivada. Anteriormente se ha descrito que ambos tipos de normalización acentúan los rasgos de absorción de los minerales, y por tanto facilitan su identificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La disposición y morfología de los rasgos de absorción de los espectros depende de las proporciones de los minerales mezclados. Así, como era de esperar, el espectro de una mezcla tiende a asemejarse al del mineral con mayor proporción. No obstante, en todos los casos se observaron divergencias con respecto a los espectros de partida (Fig. 1).

Los dobletes de las esmectitas a ~1400 nm y ~2300 nm, y la banda a ~1900 nm, se ven atenuadas cuando las proporciones de augita y olivino son elevadas. No obstante, la posición de estos rasgos de absorción no se ve modificada. En particular, en la mezcla con 5% de esmectita y 80% de augita la esmectita es difícilmente identificable. Por ejemplo, se puede ver como las bandas a ~1413 nm y ~2290 nm se han convertido en hombreras tenuemente definidas. En el espectro con 15% de esmectita y 70% de augita, todas las bandas de esmectita, aunque atenuadas, todavía se pueden distinguir. La banda a ~1907 nm y el doblete a ~2300 nm, por otro lado, se preservan considerablemente bien en las mezclas con olivino, incluso con solo un 5% de arcilla, constituyendo, por tanto, buenos indicadores de la presencia de esmectita. La identificación de augita y olivino es por lo general sencilla debido a la presencia de bandas anchas a ~1050 nm. Sin embargo, en las muestras con un 80% de arcilla y 5% de augita (u olivino) su identificación no es posible. En las mezclas con yeso el impacto sobre la huella espectral de la esmectita es todavía más acusado debido a la coincidencia de bandas de esmectita y yeso en varias regiones del espectro. La huella espectral del sulfato es, además, más dominante que la de la arcilla (i.e. las bandas del yeso opacan a las de la esmectita). Así, la morfología del doblete a ~1400 nm es modificada por la banda a ~1445 nm del yeso; y la banda a ~1907 nm queda superpuesta por la del yeso a ~1940 nm. Las bandas a ~1391 nm y ~2312 nm de la esmectita, aunque muy disminuidas en la muestra con 15% de arcilla y 70% de yeso, permiten su identificación con este porcentaje.

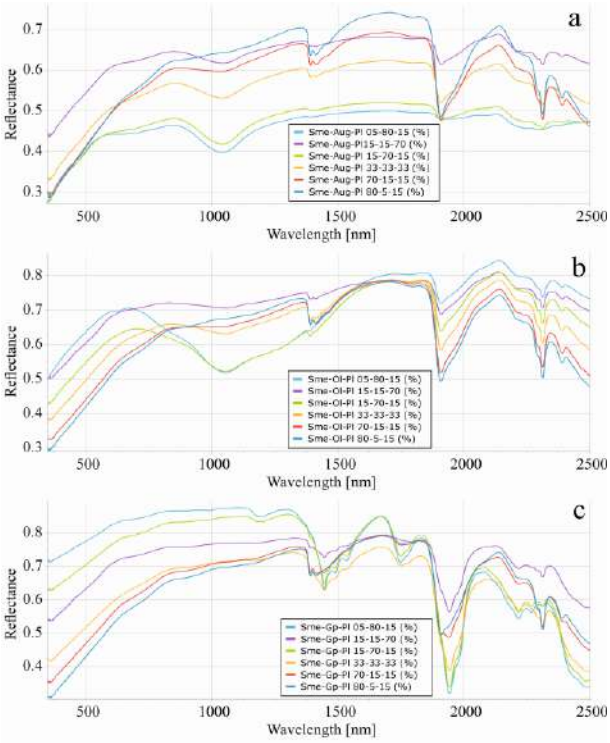


FIGURA 1. *Espectros de las mezclas de esmectita-augita-plagioclasa (a),* esmectita-olivino-plagioclasa (b) y esmectita-yeso-plagioclasa (c).

La implementación del *continuum removal* conlleva una mejora general de la identificación de la arcilla en las muestras con augita y olivino (Fig. 2). En particular consigue una mejor definición de las bandas a ~1391 nm, ~1413 nm y ~2290 nm, en comparación con los espectros sin tratar. El aumento del contenido en esmectita conlleva un desplazamiento hacia mayores longitudes de onda de las bandas características de augita y olivino (a ~1050 nm), de hasta 120-155 nm en las muestras con 80% de esmectita. Esta modificación ocurre incluso aunque la arcilla no presenta bandas en esta región. En las mezclas con yeso, el *continuum removal* acentúa la presencia de las bandas de esmectita a ~1391 nm y ~2312 nm, pero como en el caso de los espectros sin tratar, las bandas a ~1413 nm y ~1907 nm son opacadas por las del sulfato en estas regiones.

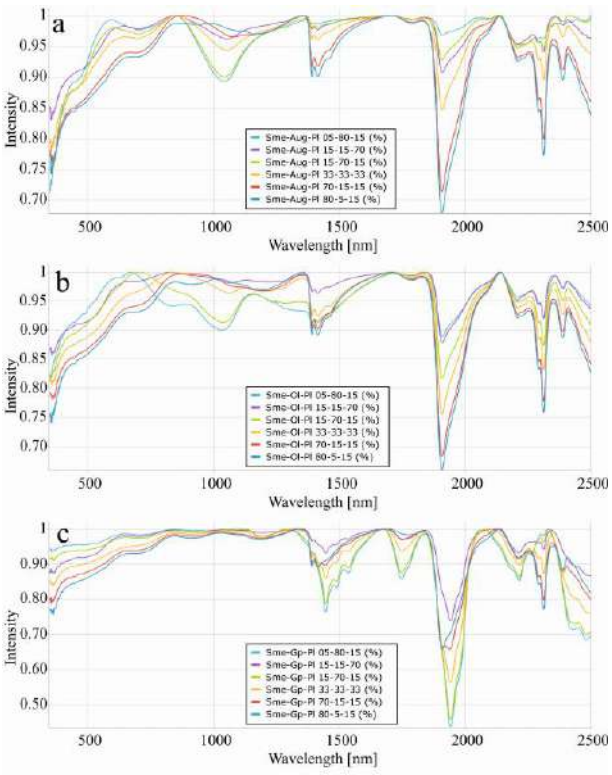


FIGURA 2. *Espectros de las mezclas de esmectita-augita-plagioclasa (a),* esmectita-olivino-plagioclasa (b) y esmectita-yeso-plagioclasa (c). *Los espectros han sido normalizados con continuum removal.*

La segunda derivada de los espectros permite una identificación más exitosa de la esmectita al resaltar sus picos característicos incluso en las muestras con solo un 5% de arcilla (e.g. a ~1390 nm, ~1900 nm y ~2311 nm) (Fig. 3). Esto ocurre también en las muestras con 80% de yeso, mejorando la identificación en comparación con los espectros sin tratar y los normalizados con el *continuum removal*. La proporción mínima para identificar yeso se sitúa también en el 5%. Sin embargo, la implementación de la segunda derivada falla a la hora de destacar las bandas más importantes de augita y olivino a ~1050 nm que, por el contrario, desaparecen.

La identificación de la plagioclasa no es posible, independientemente de los preprocesados utilizados, debido a la ausencia de rasgos de absorción en este rango de longitudes de onda. Este es un problema bien conocido cuya solución normalmente requiere la utilización de otros rangos de longitud de onda, donde los tectosilicatos pueden presentar rasgos de absorción identificativos. Por otro lado, si bien este mineral carece de rasgos de absorción, su presencia en las mezclas conlleva un efecto negativo en la identificación del resto de minerales al producir una disminución en la intensidad de sus rasgos de absorción y picos de segunda derivada (ver Figs. 1, 2, 3).

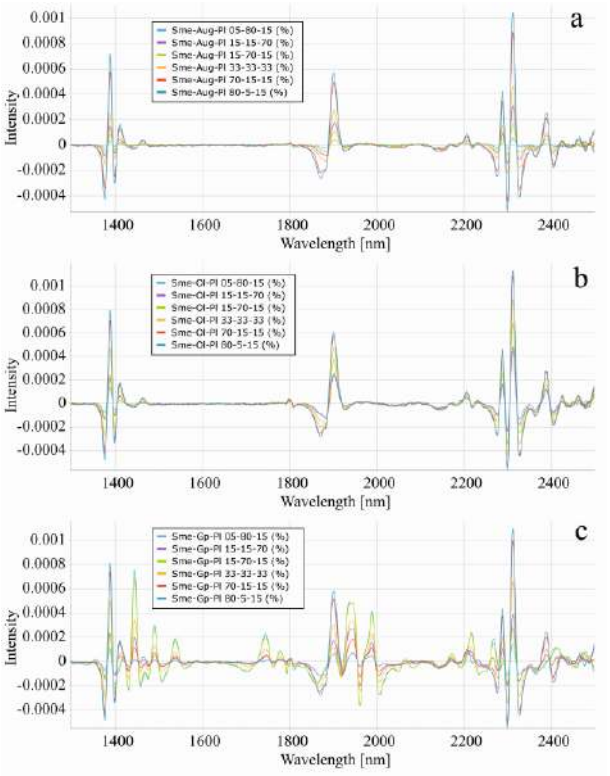


FIGURA 3. *Espectros de las mezclas de esmectita-augita-plagioclasa (a),* esmectita-olivino-plagioclasa (b) y esmectita-yeso-plagioclasa (c). *Los espectros han sido normalizados con la segunda derivada.*

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Las limitaciones en la detección de minerales en las muestras estudiadas ponen de relieve las problemáticas que pueden afectar a la espectroscopia VNIR-SWIR. Se precisa al menos un 15% de esmectita para su identificación en muestras con augita o yeso; y un 5% en las de olivino. Estos porcentajes se sitúan en el 5% tras aplicar la segunda derivada. Augita y olivino son identificables con al menos un contenido del 15% en los espectros sin normalizar. Pero en los espectros con contenido alto en esmectita, y normalizados con el *continuum removal*, sus límites de identificación empeoran hasta el 33%. La utilización de las segundas derivadas previene la determinación de augita y olivino. Por último, el yeso precisa de un 15% para ser identificable tanto en los espectros originales como en los normalizados.

Las dos técnicas de preprocesado utilizadas son habituales y en ocasiones se llevan a cabo de manera sistemática en este tipo de estudios. Por ello destaca que las improntas de la augita y el olivino se hayan visto mermadas tras la implementación del *continuum removal*, y su identificación imposibilitada con la segunda derivada. Hasta nuestro conocimiento, esto no se había descrito con anterioridad, y supone un riesgo para la correcta identificación de estos minerales en presencia de arcillas.

Por otro lado, este estudio constituye un primer paso para el establecimiento de nuevos límites de detección, a partir de mezclas preparas en laboratorio, de otros minerales de interés en la superficie marciana. Un ejemplo de ello son los carbonatos (Cloutis et al., 2010), que en el caso de la calcita y la dolomita presentan huellas espectrales que son fácilmente opacadas por la presencia de minerales de la arcilla (Santamaría-López et al., 2024).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el proyecto SA0107P20 de la Junta de Castilla y León y FEDER.

REFERENCIAS

Barthez, M., Flahaut, J., Guitreau, M., Ito, G. y Pik, R. (2023): Understanding VNIR plagioclase signatures on Mars through petrographic, geochemical, and spectral characterization of terrestrial feldspar-bearing igneous rocks. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128: e2022JE007680.

Bishop, J.L., Gates, W.P., Makarewicz, H.D., McKeown, N.K. y Hiroi, T. (2011): Reflectance spectroscopy of beidellites and their importance for mars. *Clays and Clay Minerals*, 59: 378–399.

Carrozzo, F. G., Altieri, F., Bellucci, G., Poulet, F., D'Aversa, E., y Bibring, J.-P. (2012): Iron mineralogy of the surface of Mars from the 1 μm band spectral properties. *Journal of Geophysical Research*, 117: E00J17.

Cloutis, E.A., Grasby, S.E., Last, W.M., Léveillé, R., Osinski, G.R. y Sherriff, B.L. (2010): Spectral reflectance properties of carbonates from terrestrial analogue environments: Implications for Mars. *Planetary and Space Science*, 58: 522–537.

Das, E., Mustard, J.F., Tarnas, J.D., Pascuzzo, A.C. y Kremer, C.H. (2022): Investigating the origin of gypsum in Olympia Undae: characterizing the mineralogy of the basal unit. *Icarus*, 372: 114720.

Poulet, F., Bibring, J.P., Mustard, J.F., Gendrin, A., Mangold, N., Langevin, Y., Arvidson, R.E., Gondet, B., Gomez, C., Berthe, M., Erard, S., Forni, O., Manaud, N., Poulleau, G., Soufflot, A., Combes, M., Drossart, P., Encrenaz, T., Fouchet, T., Melchiorri, R., Bellucci, G., Altieri, F., Formisano, V., Fonti, S., Capaccioni, F., Cerroni, P., Coradini, A., Korablev, O., Kottsov, V., Ignatiev, N., Titov, D., Zasova, L., Pinet, P., Schmitt, B., Sotin, C., Hauber, E., Hoffmann, H., Jaumann, R., Keller, U. y Forget, F., (2005): Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate. *Nature*, 438: 623–627.

Robertson, K.M., Milliken, R.E. y Li, S. (2016): Estimating mineral abundances of clay and gypsum mixtures using radiative transfer models applied to visible-near infrared reflectance spectra. *Icarus*, 277: 171–186.

Santamaría-López, A., Suárez, M., y García-Romero, E. (2024): Detection limits of kaolinites and some common minerals in binary mixtures by short-wave infrared spectroscopy. *Applied Clay Science*, 250: 107269.

Gamificando el Geolodía de Ávila, experiencias en el campo y en entorno cerrado

Gamifying Geolodía, Ávila, experiences in field and indoor.

A.I. Casado[1], P. Melón[2], J. Pérez-Tarruella[3], T. S. Canesin[4], T.M. Béjard[3], F. Muñoz[5], D. Díez-Canseco[6], J. Cuevas[6], A. Claro[7], G. Castilla-Cañamero[8], A. Cuerva[9] y J. Élez[3]

1 Dpto. Química Física. Facultad de Ciencias Químicas. Univ. Complutense de Madrid. 28040 Madrid. acasadogomez@ucm.es
2 Dpto. Ciencias de la Educación, Univ. Rey Juan Carlos, 28942 Fuenlabrada. pmelonjimenez@gmail.com
3 Dpto. Geología, Univ. Salamanca, 37008 Salamanca. javierpereztar@gmail.com, thibauld.bejard@usal.es, j.elez@usal.es
4 Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad de Minho, Campus Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal. thaissiqueirac@yahoo.com.br
5 Docente independiente. 42004, Soria. fina.munoz@gmail.com
6 Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Univ. Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig. davinia.diezcanseco@ua.es, jaime.cuevas@ua.es
7 Geóloga independiente. 06220 Villafranca de los Barros. aclaromo@gmail.com
8 Dpto. Biología y Geología, Centro de Estudios Díaz-Balaguer, 28015 Madrid. gabrielplanetas@yahoo.es
9 Consultora independiente. 45710 Madridejos. acuerva@gmail.com

Resumen: En la edición de 2022, buscando mejorar la experiencia de los distintos perfiles que acuden como público al Geolodía de Ávila y atendiendo a las sugerencias propuestas en las encuestas de ediciones anteriores, el equipo organizador planteó la gamificación de esta actividad. Esto supuso utilizar elementos de juegos en una situación que no es propiamente un juego. Tras el éxito de la propuesta en el campo, el equipo compitió en Ciencia en Acción con esta actividad gamificada adaptada a un entorno cerrado, como pudiera ser un aula, ganando el primer premio del Laboratorio de Geología. En este trabajo se analizan los elementos dinámicos, mecánicos y componentes que estructuran la gamificación aplicada en esta actividad tanto en el campo como en el aula, comparando ambos escenarios. El carácter lúdico que aportan estos elementos, junto con la importancia de la historia que rodea a la propuesta, incrementa la diversión de quienes participan al tiempo que disminuye el abandono y mejora la experiencia y el aprendizaje. La experiencia de gamificar el Geolodía de Ávila ha mostrado ser una buena estrategia para satisfacer al heterogéneo público que acude a esta actividad, independientemente de sus edades y sus intereses intrínsecos.

Palabras clave: geología, gamificación, juego, divulgación, narración de historias.

Abstract: *In the 2022 edition of Geolodía Ávila, the organizers set out to gamify this activity to enhance the experience for the diverse attenders, taking into account feedback from previous editions´surveys. Thus, game elements were incorporated into a situation that is not inherently a game. After the success of the proposal in the field, the organizers participated in the conquest "Ciencia en Acción"introducing the activity adapted to an indoor experience (e.g. a classroom) and winning the first prize in the category Laboratory of Geology. In this work, dynamical, mechanical and component elements that structure the gamification of this activity are analyzed, and compared in the field and the classroom context. The playful nature provided and the significance of the narrative surrouding the proposal, enhances the enjoyment of the participants while reducing abandonment and improving the overall experience and learning. The experience of gamifying Geolodía Ávila has proven to be a successful strategy to develop an activity with attenders of diverse ages and intrinsic interests.*

Key words: *geology, gamification, game, divulgation, storytelling.*

ANTECEDENTES

En el año 2016, se asumió la organización del Geolodía de Ávila por el equipo actual. Desde el principio, se consideró el formato de ruta autoguiada con profesionales de la geología en cada parada (Élez *et al.*, 2018), siguiendo la recomendación de la Sociedad Geológica de España (SGE) para Geolodías de grupos numerosos (Crespo-Blanc *et al*., 2016). En el caso de Ávila, la elección de esta modalidad de ruta no se ha debido a una alta afluencia de público, ya que Ávila es una de las provincias más deshabitadas de España, sino a considerar que es la opción más atractiva y flexible tanto para la organización como para asistentes, por no requerir inscripción previa y contar con una hora de inicio flexible dentro de la franja de horario propuesta.

En el contexto de nuestra propuesta, el nivel de contenidos y la exigencia física de la propia actividad condiciona el perfil del público objetivo a personas adultas o adolescentes sin conocimientos previos de geología ni altas capacidades físicas. Junto con este perfil objetivo, se identifican otros dos que no se contemplaron inicialmente y que resultan recurrentes edición tras edición:

- **Docentes de educación secundaria**. En su mayoría con formación en biología, ciencias ambientales o

similares que imparten la asignatura de geología en sus centros y que necesitan ampliar sus conocimientos y sus recursos didácticos para trabajarlos en clase y poder trasladarlos a su alumnado.

- **Familias con menores de 12 años**. No se debe pasar por alto el interés que una actividad gratuita al aire libre despierta en las familias con menores, independientemente de la temática. La dificultad de llegar al público de corta edad con el modelo de divulgación del Geolodía de Ávila planteado hasta el año 2022, se refleja en las encuestas post-actividad donde muchas sugerencias giran en torno a esto.

GAMIFICACIÓN, EL APRENDIZAJE DIVERTIDO

En la edición de 2022 del Geolodía de Ávila desarrollado en Villaflor (Villaflor, Ávila) (Pérez-Tarruella *et al*., 2022), se planteó abandonar el modelo de organización empleado hasta el momento, basado en una ruta fija, unidireccional y con una concepción más seria. El objetivo principal fue generar una actividad divertida tanto para asistentes como para la organización, que atrajese a los distintos perfiles asistentes, manteniendo al mismo tiempo el rigor científico de los contenidos explicados.

Se optó por una de las metodologías de enseñanza que ha ganado mayor popularidad en los últimos años debido a su carácter lúdico, la gamificación (Ortiz-Colón *et al.*, 2018). Esta técnica de aprendizaje introduce mecánicas y componentes de juegos en escenarios y situaciones que no son propiamente juegos (Robson *et al*., 2015) con el fin de involucrar de manera activa a quienes participan manteniéndose en un estado de plena atención por la tarea a realizar, tal y como plantean Nakamura y Csikszentmihalyi (2009) en su "Teoría del flujo".

Además de su uso en el ámbito educativo (Cornellà *et al*., 2020), la gamificación se ha extendido cada vez más en el ámbito profesional y en el de la divulgación científica. El carácter lúdico que aporta una actividad gamificada favorece la interiorización de conocimientos, generando así una experiencia más positiva. Al mismo tiempo, las personas se involucran más en la actividad, se sienten más predispuestas a aprender y mejoran su motivación intrínseca.

ELEMENTOS DE LA GAMIFICACIÓN

Para gamificar cualquier situación que no es concretamente un juego, Werbach y Hunter (2012) proponen identificar distintos elementos clasificados como dinámicos, mecánicos y componentes. Los elementos dinámicos son los aspectos generales que hacen funcionar la actividad; los mecánicos aquellos que provocan el desarrollo del juego, mientras que los componentes son los medios por los que se ejecutan los elementos mecánicos y los dinámicos. De esta forma, se establece una jerarquía entre elementos, donde los inferiores condicionan a los que están por encima (Fig. 1) en la pirámide de Werbach y Hunter (2012). Los elementos identificados en la actividad propuesta se pueden ver en la tabla 1.

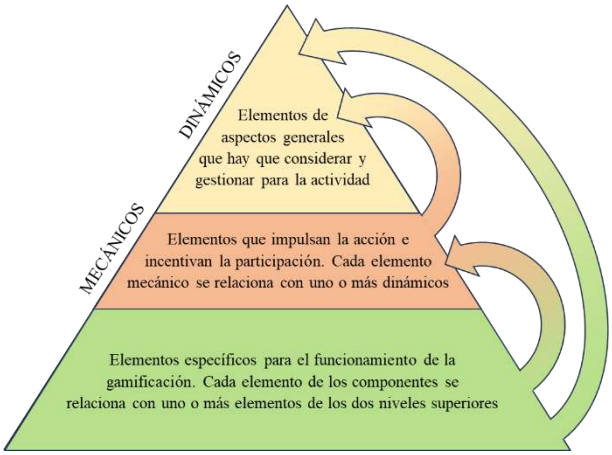


FIGURA 1. *Pirámide de elementos de gamificación para el Geolodía de Ávila de Villaflor. Los mecanismos y elementos concretos se encuentran en la tabla 1. Adaptada de Werbach y Hunter (2012).*

Kapp (2012) mantiene que si una buena historia subyace al juego, le otorga sentido y ayuda a quienes participan a alcanzar una buena curva de interés que se mantenga durante toda la actividad aumentando las posibilidades de completarla y reduciendo los abandonos. Por ello, en la primera parada se plantea la historia que rodea a la actividad junto con las normas de ésta, reforzando los elementos mecánicos y dinámicos a partir de los componentes. Aprovechando la geomorfología del sistema de drenaje del entorno de Villaflor, con cárcavas poco desarrolladas, y sirviéndonos de los distintos canales como parte de un laberinto, se narra la historia (o *storytelling*) donde completar todas las paradas significa conseguir las pistas para resolver el desafío final y lograr salir del laberinto.

Una vez aceptado el desafío geológico de Villaflor, las personas participantes deben buscar las paradas de manera autónoma y con ayuda del mapa de las hojas interiores de la guía (Fig. 2). Poner a prueba su



FIGURA 2. *Mapa de la actividad en las hojas centrales de la guía. Pérez-Tarruella et al., (2022). La línea roja limita la zona de desarrollo de la actividad, con las paradas marcadas. A la izquierda se puede ver el espacio reservado para pegar las pistas y al pie de la hoja derecha la frase del desafío final que debe completarse para conseguir el premio.*

	ELEMENTOS	MECANISMOS	CAMPO	AULA
DINÁMICOS	Emociones	Curiosidad, competitividad, frustración, felicidad	X	X
	Narración	Una historia continuada es la base del proceso de aprendizaje	X	X
	Progresión	Evolución y desarrollo del juego	X	X
	Relaciones	Interacciones sociales, compañerismo, altruismo	X	
	Restricciones	Limitaciones o componentes forzosos		X
MECÁNICOS	Colaboración	Trabajar en grupo para conseguir un objetivo	X	
	Competición	Competición personal o contra el resto de participantes	X	X
	Desafíos	Tareas que implican esfuerzo, que supongan un reto	X	X
	Recompensas	Beneficios por logros	X	X
	Retroalimentación	Cómo lo estamos haciendo	X	X
	Suerte	El azar influye		X
	Turnos	Participación secuencial, equitatividad y alternancia		X
COMPONENTES	Instrucciones	Familiarizarse con el juego, adquisición de normas y estrategias	X	X
	Equipos	Trabajo en grupo con un objetivo común	X	
	Búsqueda	Elementos escondidos que deben buscarse	X	
	Tablero	Desarrollo en un escenario simbólico		X
	Misiones	Desafíos predeterminados con objetivos y recompensas	X	X
	Colecciones	Elementos que pueden acumularse	X	X
	Insignias	Representación visual de los logros y progresión	X	X
	Premio	Regalo al completar el desafío final	X	X

TABLA 1. *Elementos de gamificación y sus mecanismos identificados para la gamificación del Geolodía de Villaflor en el campo y en el aula*

orientación aporta a quienes participan una sensación de felicidad añadida cada vez que encuentran una nueva parada. Para lograr encontrarlas, pueden colaborar en grupo o ponerse a prueba de manera individual.

Cada parada tiene su propia metodología de enseñanza (exposición magistral participativa, narración de historias, aprendizaje basado en el juego y debate, entre otras) que es independiente de la gamificación de la actividad, y que contribuye a mantener el interés del público. Las explicaciones de las paradas no tienen un orden determinado salvo la última de culminación de la prueba. Los videos resumen de las explicaciones de las paradas pueden verse en geolodiaavila.com/geolodia-avila-22-villaflor/

En cada parada, los grupos reciben una insignia a modo de pegatina que hace las veces de recompensa por la localización de la propia parada; y aporta una pista para resolver la frase final. La colección de estas pegatinas sirve al mismo tiempo de retroalimentación para valorar la progresión dentro de la actividad y como representación de un logro, lo que mantiene la motivación en el juego y contribuye a focalizar el interés en la resolución del resto de retos.

Completadas las paradas y con todas las insignias recolectadas, la actividad finaliza con la resolución de la frase final. Tras la narración de cierre de la historia, se otorga un premio a cada participante. El uso de premios se ha confirmado como un potente motivador para completar la actividad y evitar el desinterés.

La encuesta general de la SGE realizada por el público tras la actividad destacó aspectos de interés que confirman la buena acogida de la gamificación:

- "Super divertido el laberinto"
- "Muy interesante, una actividad para repetir"
- "Me ha aparecido espectacular"

Por otra parte, a pesar del entusiasmo mostrado por el público más joven en conseguir las pegatinas, también se recogieron comentarios en cuanto a que el recorrido resultaba demasiado largo para menores de 6 años.

ADAPTACIÓN DE LA ACTIVIDAD GAMIFICADA A ESPACIOS CERRADOS

Tras la experiencia de la gamificación del Geolodía en el campo, se planteó adaptar esta actividad para un espacio cerrado. Para ello, se sustituyó el espacio del entorno geológico de Villaflor por un soporte físico sobre el que poder narrar la historia ya creada para la experiencia de campo. De esta forma, el mapa utilizado para la orientación y localización de las paradas se propone como tablero, consiguiendo al mismo tiempo la representación tanto del entorno geológico como de las paradas-explicaciones por las que se debe pasar para completar el desafío.

Recorrer las distintas paradas del tablero (elemento componente) depende de la suerte (elemento mecánico) mediante el uso de un dado. El dado además permite incluir nuevas acciones de dinamización de la gamificación modificando algunos de los elementos dinámicos y mecánicos en el espacio cerrado con

respecto a la versión en el campo. También es necesario adaptar los mecanismos de colaboración (elementos dinámicos) de quienes participan, ya que no se puede atender a grandes grupos a la vez y debe desarrollarse de manera individual y por turnos. En la tabla 1, en las columnas de la derecha, se comparan los elementos de gamificación empleados en esta actividad tanto en campo como en el aula o espacios cerrados. Se puede ver que la mayoría de estos elementos son comunes y se mantiene la calidad de la propuesta.

La propuesta gamificada para interior se presentó al concurso internacional de Ciencia en Acción celebrado en Viladecans (Barcelona), del 27 al 29 de octubre de 2023 (Casado *et al.*, 2023). En la figura 3 puede verse una imagen del *stand* montado para la feria. Se pudo poner en práctica esta propuesta con un público con perfil similar al que acude a los geolodías presenciales de Ávila, pero con una representación mucho mayor de menores y docentes de secundaria. La actividad fue reconocida con el primer premio Ciencia en Acción 2023, en la modalidad de Laboratorio de Geología, por su didáctica, su capacidad de comunicación y sus contenidos.



FIGURA 3. *Actividad de gamificación del Geolodía de Villaflor adaptada a un entorno cerrado como el aula.*

Todas las personas participantes, con edades comprendidas entre 6 y 64 años, superaron con éxito la actividad. Al finalizarla, respondieron una encuesta informal puntuando del 1 al 5 su aprendizaje en esta actividad gamificada, siendo 1 no haber aprendido nada y 5 haber aprendido mucho. El 84% respondieron a ésta con un 5, el 13% con un 4 y el 1% con un 3.

CONCLUSIONES

Se ha gamificado la actividad de divulgación Geolodía de Ávila celebrada en Villaflor en la edición de 2022, con el objetivo de aumentar su atractivo y lograr un mayor interés del público asistente, sin perder su carácter divulgativo. La heterogeneidad del público, compuesto tanto por personas adultas y adolescentes como por familias con menores y por docentes de secundaria, es una dificultad notable a la hora de desarrollar las dinámicas de esta actividad.

Tras el análisis de los elementos de gamificación y sus mecanismos, se pudo examinar el funcionamiento de la actividad tanto en el campo como en un espacio cerrado para ajustarse a un perfil más amplio de edad y de variabilidad de objetivos.

Al poner a prueba esta propuesta, se ha podido comprobar que el interés general aumenta al contar con componentes que guíen los elementos mecánicos al tiempo que se desarrollan las dinámicas. El carácter lúdico que adquiere la actividad con la gamificación se refuerza con la recopilación de pistas, las cuales son necesarias para resolver del desafío final y conseguir el premio. Las encuestas, a pesar de su carácter informal, reafirman la buena acogida por las personas participantes de distintas edades y condiciones, destacando el caso de menores de 6 años que frente a la actividad de campo que les supone una dificultad de resistencia física, en el espacio cerrado lo superan como el resto de participantes.

El reconocimiento recibido por Ciencia en Acción reafirma el importante carácter didáctico y divulgativo de los elementos de la gamificación en actividades como el Geolodía de Ávila.

REFERENCIAS

Casado, A.I.; Pérez-Tarruella, J.; Melón, P.; Cuevas, J.; Díez-Canseco, D.; Claro-Moreno, A.; Élez, J.; Muñoz-Sanz, F.; Castilla-Cañamero, G. y Cuerva, A. (2023): El laberinto de las tormentas. Un desafío geológico en Villaflor (Ávila). Laboratorio de Geología. *Actas de la XXIV Edición de Ciencia en Acción*: 67. Viladecans (Barcelona).

Cornellà, P., Estebanell, M. y Brusi, D. (2020): Gamificación y aprendizaje basado en juegos: Consideraciones generales y algunos ejemplos para la Enseñanza de la Geología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 28(1): 5-19.

Crespo-Blanc, A., Alfaro, P., Alonso-Zarza, A.M., Aurell, M., Calonge, A., Carcavilla, L. y Corral Fernández, I. (2016): Geolodía para un público numeroso: claves para su organización. *Geogaceta*, 59: 79-82.

Élez, J.; Casado, A.I., Pérez-Tarruella, J.; Melón, P., Cuevas, J., Díez-Canseco, D., Castilla-Cañamero, G., Muñoz, F.; Martín Herráez, A. y Cuerva, A. (2018): Líneas de organización de los Geolodías de Ávila (2016-2020). *Geo-Temas*, 18: 659 p.

Kapp, K.M. (2012): *The gamification of learning and instruction*. San Francisco: Wiley, 302 p.

Nakamura, J. y Csikszentmihalyi, M. (2009): Flow theory and research. En: *The Oxford Handbook of Positive Psychology* (S.J. Lopez y C.R. Snyder, eds.). Oxford University Press, New York, 195-206.

Ortiz-Colón, A.M., Jordán, J., y Agredal, M. (2018): Gamificación en educación: una panorámica sobre el estado de la cuestión. *Educação e pesquisa*, 44:1-17.

Pérez-Tarruella, J., Melón, P., Casado, A.I., Cuevas, J., Díez Canseco, D., Claro Moreno, Á., Elez Villar, J., Muñoz, F., Castilla Cañamero, G., Cuerva, A. (2022): *El laberinto de las tormentas. Un desafío geológico en Villaflor (Ávila).* Colección Geolodía. SGE, Salamanca, 8 p.

Robson, K., Plangger, K., Kietzmann, J.H., McCarthy, I., y Pitt, L. (2015): Is it all a game? Understanding the principles of gamification. *Business Horizons*, 58(4): 411–420.

Werbach, K. y Hunter, D. (2012): *For the win: how game thinking can revolutionize your business*. Philadelphia, PA: Wharton Digital Press. 146 p.

Enseñando Geología en el programa STEAM de enriquecimiento educativo para alumnado de altas capacidades.

Teaching Geology in a STEAM educational enrichment program for gifted students.

A. Calonge García[1], M. D. López Carrillo[1] y G. Ros Magán[2]

1 Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Facultad de Educación. UAH. C/ Madrid 1. 19001 Guadalajara (España). a.calonge@uah.es; mariadolores.lopez@uah.es

2 Departamento de Física y Matemáticas. Facultad de Educación. UAH. C/ Madrid 1. 19001 Guadalajara (España). german.ros@uah.es

Resumen: Esta comunicación aborda una propuesta STEAM para el alumnado con altas capacidades a través del diseño, implementación y evaluación de un programa de enriquecimiento educativo extracurricular. Actualmente se reconoce ampliamente la contribución de la formación científica, tecnológica, artística, matemática y en ingeniería (STEAM) para el ejercicio pleno de la ciudadanía e interactuar con sociedades cada vez más complejas e interconectadas. Así, la investigación educativa propone seguir enfoques STEAM como vía para integrar el conocimiento de las áreas ya mencionadas, y contribuir al desarrollo de actitudes positivas hacia las mismas. En este escenario se implementó una experiencia piloto de este programa en el Colegio Sagrado Corazón de Guadalajara (Agustinos Recoletos) en Educación Primaria durante el curso 2022/23. También se desarrolló, parcialmente, una propuesta educativa similar en el IES Antonio Machado (Alcalá de Henares) durante dos cursos académicos (2021/22 y 2022/23) con alumnado de este tipo procedente de la provincia de Madrid. En ambos casos estuvo dirigido a la etapa de Educación Primaria (9 a 11 años). Los resultados obtenidos antes de la intervención indicaron percepciones superficiales sobre la Geología, pero después de la intervención hubo una profundización de los conocimientos. Esto se evidenció en las sesiones realizadas por los niños/as, que abordaron temas sobre riesgos naturales y sobre la importancia de los fósiles y la fosilización. En este contexto, se constató que el programa de enriquecimiento educativo favoreció el acercamiento a las ciencias geológicas.

Palabras clave: STEAM, programa de enriquecimiento educativo, altas capacidades, enseñanza de la geología.

Abstract: *This paper addresses a STEAM proposal for gifted students through the design, implementation and evaluation of an extracurricular educational enrichment program. The contribution of scientific, technological, artistic, mathematical and engineering (STEAM) education to the full exercise of citizenship and to interact with increasingly complex and interconnected societies is now widely recognized. In this context, educational research proposes to follow STEAM approaches as a way to integrate knowledge of the aforementioned areas and contribute to the development of positive attitudes towards them. During the 2022/23 school year, a pilot of this program was being partially implemented in the Colegio Sagrado Corazón de Guadalajara (Augustinian Recollects) in Primary School. A similar educational proposal was also partially developed in the IES Antonio Machado (Alcalá de Henares) for two years (2021/22 and 2022/23) with these students from the province of Madrid. In both cases it was aimed at the Primary School level (9 to 11 years). The results obtained prior to the intervention indicated superficial perceptions about Geology, but after the intervention, there was a deepening of knowledge. This was evidenced by the classes carried out by the students, who covered subjects as natural risk and the importance of fossils and fossilization. In this context, it was found that the educational enrichment program helped the approach to geology sciences'.*

Key words: *STEAM, educational enrichment program, gifted students, Teaching Geology*

INTRODUCCIÓN

El alumnado de altas capacidades no ha recibido tradicionalmente atención adecuada en los centros escolares españoles, en parte debido a su escasa detección. Sin embargo, en los últimos años esta tendencia se está modificando debido a la creciente demanda por parte de las familias de este tipo de alumnado, pero también por el mayor interés generado al respecto tanto en los centros educativos, como en las propias instituciones y en la investigación educativa (Tourón, 2008). Una prueba de ello es el creciente interés en esta cuestión por parte de las Consejerías de Educación de los diferentes gobiernos autonómicos. A título de ejemplo, el Gobierno de Castilla-La Mancha aprobó el Decreto 92/2022 de 16 de agosto, por el que se regula la organización de la orientación académica, educativa y profesional en Castilla-La Mancha, donde se

incluye como uno de los objetivos prioritarios potenciar la respuesta educativa del alumnado con altas capacidades. En esta línea, esta comunicación aborda una propuesta STEAM para el alumnado con altas capacidades a través del diseño, implementación y evaluación de un programa de enriquecimiento educativo extracurricular.

CONTEXTUALIZACIÓN

Los programas de enriquecimiento educativo destinados al alumnado de altas capacidades constituyen una actividad relativamente joven, en plena etapa de crecimiento, tal y como lo refleja el aumento continuo de centros en los cuales se están implementando y de comunidades autónomas involucradas.

De acuerdo con el modelo de Renzulli, nuestra propuesta se desarrolla desde una perspectiva inclusiva. Este modelo considera alumnado de altas capacidades a aquel que destaca en alguno de estos aspectos: (1) alta capacidad intelectual (sería el estudiante típicamente superdotado), (2) la creatividad o (3) la perseverancia en la tarea (Renzulli, 1999). Hay que indicar que estos 3 elementos no son el punto de partida en todo alumnado de altas capacidades, sino el punto final que se trata de alcanzar.

Con nuestra propuesta pretendemos dar cabida a un alumnado diverso con el objetivo de fomentar sus múltiples capacidades. Así, consideramos el enriquecimiento como una actuación educativa encaminada a ofrecer aprendizajes más ricos y variados a través de la modificación en la profundidad y en la extensión del contenido y de la metodología a emplear en la enseñanza. De hecho, el propio Renzulli, en su modelo triádico (Renzulli, 1976), establece 3 tipos de enriquecimiento. En nuestro caso, la propuesta se sitúa en el nivel III puesto que está dirigido al alumnado ya seleccionado por los equipos de orientación de los centros educativos con un perfil de altas capacidades.

Para nuestra propuesta hemos optado por el enfoque STEAM (acrónimo en inglés de ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas) por considerarlo idóneo para lograr un aprendizaje más integrador y global del conocimiento. Desde nuestra perspectiva, entendemos la integración disciplinar y su orientación a la resolución de retos y problemas, como pilares de este enfoque (de aquí en adelante, STEAM).

Con la mirada puesta en los programas de enriquecimiento para alumnado con altas capacidades, la alfabetización STEAM no significa lograr la alfabetización en ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas por separado. Es decir, STEAM no es un acrónimo que represente cinco áreas de conocimiento independientes, sino más bien, un acercamiento transdisciplinario donde rigurosos conceptos académicos de ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas se aplican en contextos reales que permiten generar conexiones entre la escuela, la sociedad, el trabajo y la empresa global. En esta línea, la alfabetización STEAM implica correlacionar los conocimientos, los procedimientos y las actitudes que caracterizan a cada una de las disciplinas para la creación de una metadisciplina basada en la integración de las otras.

ANTECEDENTES

Existen diversos estudios que avalan los beneficios de este tipo de programas de enriquecimiento. Así, después de analizar 26 programas de enriquecimiento se confirmó un impacto positivo tanto en el rendimiento académico de los alumnos superdotados como en su desarrollo socioemocional (Kim, 2016). Este aspecto es especialmente significativo ya que es donde este tipo de alumnado suelen presentar más dificultades. En el caso de España, García Perales y Almeida (2019) obtienen beneficios en la adaptación de este alumnado tanto en el colegio como en su entorno social y, en algunos casos, mejoras en su rendimiento académico.

En cuanto al enfoque STEAM, varias investigaciones demuestran que aumenta la motivación, el interés y la efectividad del proceso enseñanza-aprendizaje en las disciplinas consideradas (Henrkisen et al. 2015). Igualmente lo confirman programas completos desarrollados en Estados Unidos a lo largo de 2 años con formación de profesores, asesoramiento, seguimiento, evaluación de estos incluyendo evaluadores externos, etc. (Bush et al. 2015).

Este enfoque también se está aplicando al alumnado de altas capacidades. En este sentido Wilson (2018) propone las claves del éxito en STEAM para este tipo de estudiantes, los cuales son objeto de estudio de nuestra propuesta: (1) prácticas diversas para descubrir las preferencias individuales; (2) proporcionar tiempo y flexibilidad para que los estudiantes exploren y desarrollen su interés; (3) contextualizar el contenido con prácticas de profesionales expertos; (4) las lecciones STEAM tienen el potencial de desarrollar el pensamiento profundo, así como desarrollar la creatividad y las habilidades visuales-espaciales que son necesarias en las disciplinas STEM.

En esta línea los resultados de un enfoque STEAM transdisciplinar en un programa de enriquecimiento, demostraron beneficios a nivel de integración de conocimientos y de la construcción de experiencias significativas, así como un alto grado de satisfacción y motivación (Lage-Gómez y Ros, 2021). También se ha demostrado una correlación positiva y significativa entre la motivación, la creatividad y la integración disciplinar (Lage-Gómez y Ros, 2023).

Igualmente se ha demostrado que las prácticas de integración curricular en la educación de este alumnado incrementan el razonamiento conceptual, el pensamiento crítico y el aprendizaje de contenidos, estableciendo un marco que favorece el compromiso del alumno en la exploración activa, el análisis y la discusión de materiales y temas avanzados. Así, Tucker et al. (1997) consideran que un currículo integrado-temático es apropiado para el alumnado de altas capacidades teniendo en cuenta su mayor facilidad para establecer relaciones. Por otro lado, Dieker et al. (2012) encuentran que este enfoque integrador logra fomentar la autoconfianza de los estudiantes.

En base a las consideraciones anteriores nuestra comunicación presenta algunos de los resultados en esta línea de investigación emergente.

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

El principal objetivo de esta propuesta es implementar y valorar los resultados de programas de enriquecimiento para alumnado con altas capacidades basado en los enfoques STEAM con un sesgo interdisciplinario. Se ha constatado que esta metodología, combinada con la Geología, permitió a los niños/as profundizar sus conocimientos sobre los temas geológicos que se trabajaron.

Primera sesión: "El mundo de los fósiles"

En esta sesión introducimos los conceptos de fósil y fosilización. Para ello se trabajó con diferentes ejemplares fósiles y claves dicotómicas. A cada grupo de alumnos les proporcionamos una colección de fósiles para que estudiaran sus características y con la ayuda de las claves dicotómicas determinaron los fósiles a nivel de grupo. Además, realizaron, mediante dibujos y descripciones en detalle, un estudio de cada uno de ellos.

Una vez identificados los fósiles se procedió a realizar moldes y réplicas de estos. Cada grupo usó una pastilla de arcilla o plastilina y sobre esta colocaron su fósil presionando levemente para después retirarlo. Posteriormente obtuvieron la mezcla de escayola con la que cubrieron sobradamente los espacios. Cuando la escayola se secó, separaron la escayola de la arcilla o de la plastilina. Así obtuvieron las réplicas de los fósiles iniciales.

Esta actividad se completó con una presentación en PowerPoint sobre la historia de la vida en la Tierra.

Con la arcilla que sobró se representó una erupción volcánica con un envase de yogur líquido (50 cl), vinagre, pimentón y bicarbonato (Fig. 1). Algunos alumnos realizaron también moldes de dinosaurios, mamuts u otros fósiles con la arcilla sobrante.



FIGURA 1. *Alumnado del Programa de Enriquecimiento Educativo para Alumnos con Altas Capacidades (Consejería de Educación y Universidades de la Comunidad de Madrid) realizando volcanes con arcilla.*

En este contexto, se pudo verificar que los niños/as ampliaron su comprensión sobre saberes básicos paleontológicos tales como fósil o fosilización, demostrando una comprensión de los fósiles, lo que les permitió valorar su función social. Además, se evidenció la comprensión de la Paleontología como una ciencia interdisciplinaria, que tiene el potencial de ayudar en la planificación/abordaje del tema, según se identificó en las cuestiones planteadas al final de las sesiones.

Segunda sesión: "La Tierra, nuestro hogar"

En primer lugar, proponemos realizar una maqueta sobre las capas de la Tierra. En esta actividad los alumnos tienen libertad y pueden ayudarse de las TICs. Continuaremos explicado las placas tectónicas y los movimientos que estas han sufrido a lo largo del tiempo. A continuación, organizamos grupos de 2 o 3 niños/as para la actividad "Puzle de Placas", ya que requiere recortar las figuras en forma de placas tectónicas para después posicionarla en un folio Dina-3 (Fig. 2).

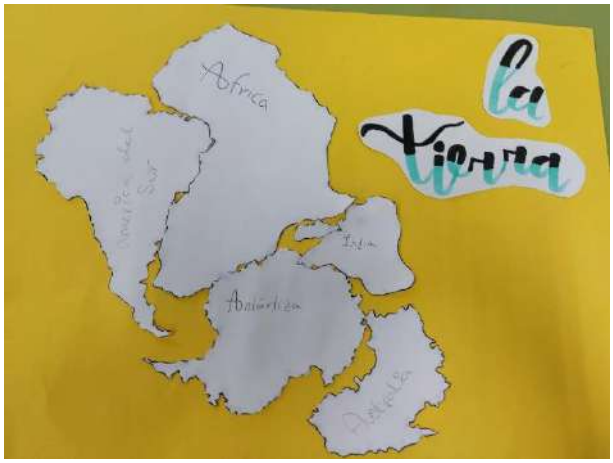


FIGURA 2. *El puzle de los continentes realizado por niños/as de 10 años del grupo de Alta Capacidades.*

Los alumnos finalmente grabaron un video de 30 segundos mostrando el movimiento de las placas desde el inicio de Pangea hasta situarlas en el lugar geográfico que ocupan en la actualidad.

Por último, se propone este taller porque ofrece un marco teórico y sugiere actividades sobre cómo gestionar los riesgos naturales de forma eficiente, con el objetivo de poner en valor y sacar el máximo provecho de un recurso libre y gratuito existente en la red: https://www.stopdisastersgame.org/. ¡Alto a los desastres! es un juego de simulación creado por la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) de las Naciones Unidas. La actividad se ha enfocado para trabajar la parte más preventiva y operacional de los riesgos naturales, sin dejar de lado el fenómeno natural, ya que entender el mecanismo que lo produce, ayudará a gestionarlo de forma adecuada. Así, a partir de la introducción del riesgo se explican los conceptos que forman parte de su definición. Para realizar la actividad se ha preparado una plantilla (González et al., 2014) que ayuda a ordenar y a discutir los distintos componentes que forman parte de un sistema de gestión del riesgo (prevención, mitigación, emergencia y reconstrucción). Ganar la partida significa, por una parte, entender que no se puede impedir que ocurran inundaciones, terremotos, tsunamis, huracanes y otros fenómenos naturales. Y por otra, que este hecho hace que las únicas estrategias posibles para reducir sus efectos y protegernos de ellos sean a través de la prevención, de la mitigación y de la preparación ante el desastre. ¿Cómo? Actuando sobre los daños que éstos pueden producir: mediante estudios detallados del

fenómeno, con mapas de peligrosidad; mediante una buena ordenación del territorio que permita alejarnos de zonas donde los mapas de peligrosidad indican que hay riesgo; protegiendo nuestros edificios, nuestras infraestructuras, nuestras vidas en esas zonas con las herramientas disponibles (como las normativas frente a los diferentes fenómenos o con obras de protección), etc.

En base a nuestra experiencia, animamos a colaborar con programas de enriquecimiento para alumnado con altas capacidades para que amplíen el abordaje de la Geología y sus relaciones con la realidad, con el fin de aproximarse a esta ciencia que les permitirá conocer mejor el planeta donde viven, la Tierra.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en la implementación de esta iniciativa a lo largo de las 3 ediciones realizadas, queremos destacar la alta motivación encontrada en los niños/as, al tiempo que favorece el aprendizaje significativo de los contenidos y el desarrollo de habilidades.

En el caso particular de la temática geológica, llama la atención la gran importancia de realizar actividades en las que el alumnado sea partícipe activo y relacione la teoría con la práctica para facilitar el proceso de enseñanza – aprendizaje. En este sentido, a través de contenidos curriculares geocientíficos tales como la deriva continental, los riesgos naturales (terremotos, tsunamis, volcanes, etc.) y el mundo de los fósiles los niños/as con altas capacidades han adquirido nuevos conocimientos o han complementado y entendido el porqué de algunos fenómenos naturales.

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo han participado activamente varios miembros del grupo de investigación “Investiga, Construye y Crea” registrado en la UAH con la referencia CS2019/563.

REFERENCIAS

Bush, S. B., Cookb, K. L., Ronauc, R. N., Rakesd, C. R., Mohr-Schroedere, M. J., y Saderholmf, J. (2015): *A Highly Structured Collaborative STEAM Program: Enacting a Professional Development Framework*. Editorial Board, 106 p.

Dieker, L., Grillo, K., y Ramlakhan, N. (2012): The use of virtual and simulated teaching and learning environments: Inviting gifted students into science, technology, engineering, and mathematics careers (STEM) through summer partnerships. *Gifted Education International*, 28(1): 96-106. https://doi.org/10.1177/0261429411427

García Perales, R., y Almeida, L. D. S. (2019): Programa de enriquecimiento para alumnado con alta capacidad: Efectos positivos para el currículum. *Revista científica iberoamericana de comunicación y educación*, 60: 39-47. https://doi.org/10.3916/C60-2019-04

González, M., Calonge, A., Brusi, D., y Alfaro, P. (2014): ¡Prevenir las catástrofes! Simulando la gestión de los riesgos naturales. En: *Libro de Actas de la XV edición del Programa Ciencia en Acción*, 169 - 170.

Henrkisen, D., De Schryver, M., Mishra, P., Cain, W., Fahnoe, C., Good, J., Henriksen, D., Keenan, S., Mehta, R., Richardson, C. y Terry, C. (2015): Rethinking technology & creativity in the 21st century transform and transcend: synthesis as a trans-disciplinary approach to thinking and learning. *TechTrends*, 59. 5-9. https://doi.org/10.1007/s11528-015-0863-9

Kim, M. (2016): A Meta-Analysis of the Effects of Enrichment Programs on Gifted Students. *Gifted Child Quarterly*, 60 (2): 102–116. https://doi.org/10.1177/0016986216630607

Lage-Gómez, C., y Ros, G. (2021): Transdisciplinary integration and its implementation in primary education through two STEAM projects. *Journal for the Study of Education and Development*, 44 (4): 801-837.https://doi.org/10.1080/02103702.2021.1925474

Lage-Gómez, C. y Ros, G. (2023): How transdisciplinary integration, creativity and student motivation interact in three STEAM projects for gifted education*? Gifted Education International*. Accepted in February 2023. In Press.

Renzulli, J. (1976): The Enrichment Triad Model: a Guide for Developing Defensible Programs for the Gifted and Talented. *Gifted Child Quarterly*, 20: 303-326.

Renzulli, J. S. (1999): What is this thing called giftedness, and how do we developed it? A twenty – five year perspective. *Journal for the education of the gifted*, 23 (1): 3-54.

Tourón, J. (2008): La educación de los más capaces: un reto educativo y social. *Revista Española de Pedagogía*, 240: 197-202.

Tucker, B., Norma Lu Hafenstein, N.L., Shannon Jones, S., Bernick, R. y Haines, K. (1997): An integrated-thematic curriculum for gifted learners. *Roeper Review*, 19 (4): 196-199. https://doi.org/10.1080/02783199709553828

Wilson, H. E. (2018): Integrating the Arts and STEM for Gifted Learners. *Roeper Review*, 40 (2): 108-120. https://doi.org/10.1080/02783193.2018.143471

Paleontología en el instituto: una experiencia investigadora y didáctica

Palaeontology in high school: a research and didactic experience

J. Cortés-Sammoudi[1] y J. Mañani-Pérez[1]

1 Dpto. Biología y Geología, Instituto de Enseñanza Secundaria Domenico Scarlatti. C/ Valeras, 28300 Aranjuez, Madrid. josecortessam@gmail.com, joseprofebiogeo@gmail.com

Palabras clave: Ammonoidea, Ciencias Naturales, Didáctica, Interdisciplinariedad, Investigación científica.

Resumen

En el presente trabajo describe el progreso de un proyecto a largo plazo en el que el alumnado desarrolla una investigación científica tutorizada centrada en una disciplina de las ciencias naturales de su elección: la paleontología (Ammonoidea). Mediante esta experiencia de enseñanza-aprendizaje el alumnado reforzará contenidos y habilidades propias de la materia de Biología y Geología (Decreto 64/2022 de 20 de julio de 2022; Decreto 65/2022 de 20 de julio de 2022) como la diversidad biológica y el método científico, así como de otras asignaturas, a saber, cómo redactar un artículo científico y qué léxico emplear (Lengua Castellana y Literatura) y estudiar las variables para extraer conclusiones, además de saber plasmar los datos en gráficos (Matemáticas).

Como resultado, el alumnado habrá participado en una experiencia de la que destaca su carácter interdisciplinar (Llano Arana *et al.*, 2016), formativo, didáctico y motivador. Se propone esta actividad como refuerzo curricular de la asignatura presente en Primero de Bachillerato de Biología, Geología y Ciencias Ambientales.

Abstract

This work showcases the progress of a long-term project by which the student conducts a mentored scientific research focused in a branch of natural sciences of his choice: palaentology (Ammonoidea). Via this didactic experience, the student will strengthen concepts and skills associated with the subject of Biology and Geology (Decreto 64/2022 de 20 de julio de 2022; Decreto 65/2022 de 20 de julio de 2022) such as biological diversity and the scientific method. Moreover, other subjects will play an important role. For instance, writing skills required to write a scientific report and how to adapt the lexicon to it (Spanish Language) or the knowledge on how to study variables and to draw conclusions from the results, as well as the methods to display the data using graphs (Mathematics) will be reinforced.

As a result, the student will have participated in an experience whose interdisciplinary (Llano Arana *et al.*, 2016), instructive, didactic and motivating character should be highlighted. This activity is recommended for 16-17 year-old students to enhance the curriculum of the subject Biology, Geology and Environmental Sciences.

Referencias

Decreto 64/2022, de 20 de julio de 2022, del Consejo de Gobierno, por el que se establecen para la Comunidad de Madrid la ordenación y el currículo del Bachillerato. Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid, núm. 176 § 1.

Decreto 65/2022, de 20 de julio de 2022, del Consejo de Gobierno, por el que se establecen para la Comunidad de Madrid la ordenación y el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria. Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid, núm. 176 § 2.

Llano Arana, L., Gutiérrez Escobar, M., Stable Rodríguez, A., Núñez Martínez, M., Masó Rivero, R. y Rojas Rivero, B. (2016). *Medisur* 14(3), 320-327.

Visualizando afloramientos con aplicaciones de geolocalización geográfica.

Reviewing outcrops with geographic geolocation tools.

C. Giraldo Ceballos[1]

1 Ingeoexpert, C. de Velázquez 157, 28002 Madrid, cgiraldoc1958@gmail.com

Resumen: *Se quiere destacar la fundamental importancia de realizar un análisis exhaustivo de los afloramientos, como parte de un reconocimiento geológico idóneo. Gracias a las imágenes satelitales de carácter público, que permiten geolocalizar los afloramientos o zonas de interés, se pueden analizar a distancia zonas remotas y optimizar misiones de campo. Además, en algunos casos se pueden describir afloramientos con cierto nivel de detalle, gracias a las imágenes a "pie de calle". Se muestran varios afloramientos en las cuales además de realizar labores de campo, se complementan las observaciones con imágenes que permiten afinar los posibles modelos geológicos. Los afloramientos evaluados están en: Kota Kinabalu (Malasia), Guayllabamba (Ecuador), Venezuela oriental y en la Cuenca de Madrid.*

Palabras clave: Afloramientos, Borneo, Ecuador, Venezuela, Cuenca de Madrid.

Abstract: *The fundamental importance of conducting an exhaustive analysis of the outcrops is highlighted, as part of an ideal geological reconnaissance. Thanks to public satellite images, which allow outcrops or areas of interest to be geolocated, remote areas can be analysed, and field missions can be optimised. Furthermore, in some cases outcrops are described with a certain level of detail, thanks to "Street View" images. Several outcrops are shown in which, in addition to conducting field work, the observations are complemented with images that allow the possible geological models to be refined. The evaluated outcrops are in: Kota Kinabalu (Malaysia), Guayllabamba (Ecuador), Eastern Venezuela, and Madrid Basin.*

Key words: *Outcrops, Borneo, Ecuador, Venezuela, Madrid Basin.*

INTRODUCCIÓN

A principios de 2020 el autor decidió ubicar algunos afloramientos en mapas actualizados, como son aquellos disponibles en las aplicaciones "*Google Maps*" y "*Google Earth*". Al mismo tiempo, la navegación virtual a lo largo de carreteras y autovías le ha permitido generar interesantes vistas panorámicas. Este es el caso de varios afloramientos ubicados en Malasia, Ecuador y Venezuela (Fig.1); en este último país no está activa la opción del visualizador "a pie de calle" ("*Street-View*"). Igualmente, esta metodología de reconocimiento geológico a distancia ha permitido documentar espectaculares deformaciones miocenas, del tipo "*soft - sediment deformations"* que afloran en los alrededores de los distritos de Vallecas y Vicálvaro (Madrid).

La idea de este trabajo es la de destacar la importancia de actualizar y documentar la ubicación de nuestros afloramientos, actividad básica para divulgación, planificación de misiones de campo y otras actividades importantes relacionadas con las geociencias. Durante la presentación oral, se añadirán detalles relacionados con la geología regional y con la evolución tectónica.

Para más detalles didácticos, se recomienda consultar Alfaro et al. (2007) y Fleming (2022). Por otro lado, se hará especial énfasis en la importancia de validar las observaciones virtuales, con las aquellas realizadas durante las salidas de campo.

MALASIA (KOTA KINABALU)

Durante una excursión al campo realizada en enero del 2020 (Fig. 2) en Kota Kinabalu (Malasia, isla de

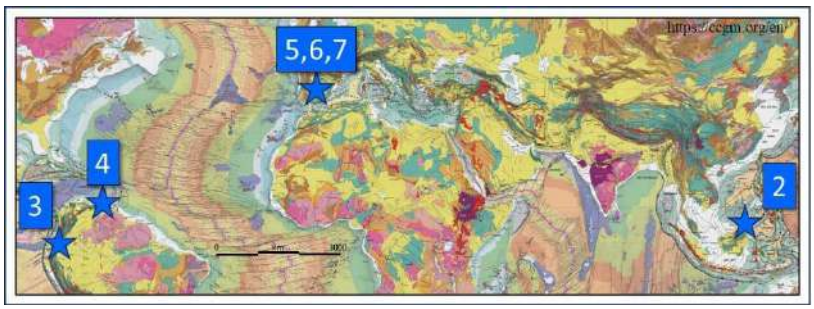


FIGURA 1. Ubicación de las figuras. Las coordenadas geográficas de los afloramientos se indican en las leyendas respectivas. Mapa geológico de Bouysse (2014)).

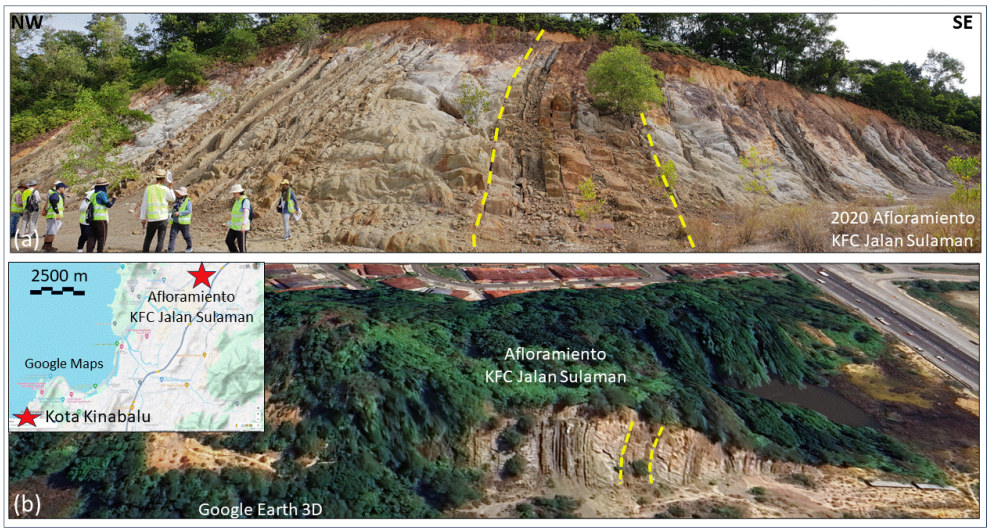


FIGURA 2. *(a) Capas volcadas de la Fm. Crocker (Oligoceno) en Kota Kinabalu (Malasia); (b) Vista oblicua*..Coordenadas geográficas*: 6º02'26"N y 116º08'36"E.*

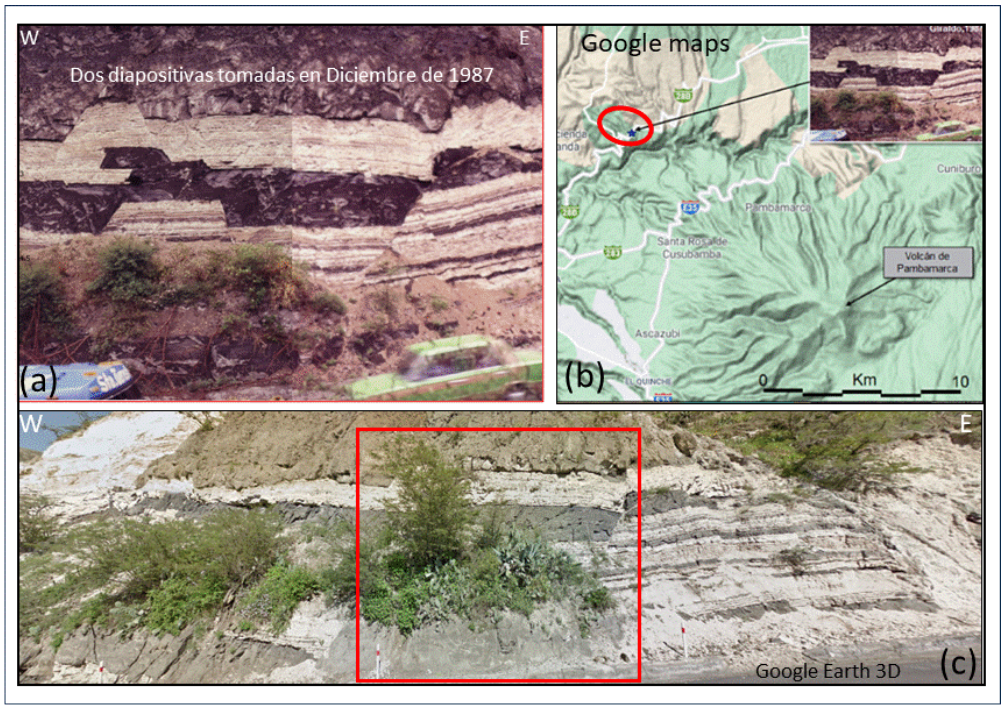


FIGURA 3. *(a) Afloramiento de Guayllabamba en 1987; (b): Ubicación geográfica; (c) Vista "Street-View". Coordenadas geográficas: 0º01'17"N y 78º19'51"W.*

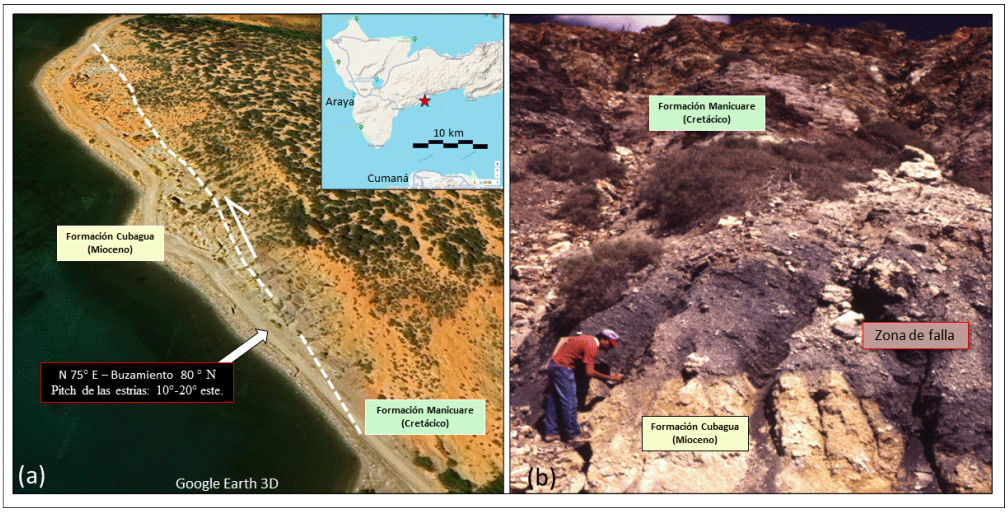


FIGURA 4. *La falla de Laguna Grande (Estado de Sucre, Venezuela): (a) Vista oblicua;(b) Afloramiento en 1988. Coordenadas geográficas: 10º33'36"N y 64º10'47"W.*



FIGURA 5. *Deformaciones tipo "soft-sediments" (Giraldo, 2023) en capas miocenas (entre autovías A-3 y R-3). El talud sub- vertical corres- ponde a la vía del AVE. Se indican coordenadas geográficas en la parte central del talud: 40º22'49"N y 3º33'13"W. Observe las trazas de las capas en el terreno (Fig. 6 para detalles de la vista en planta).*

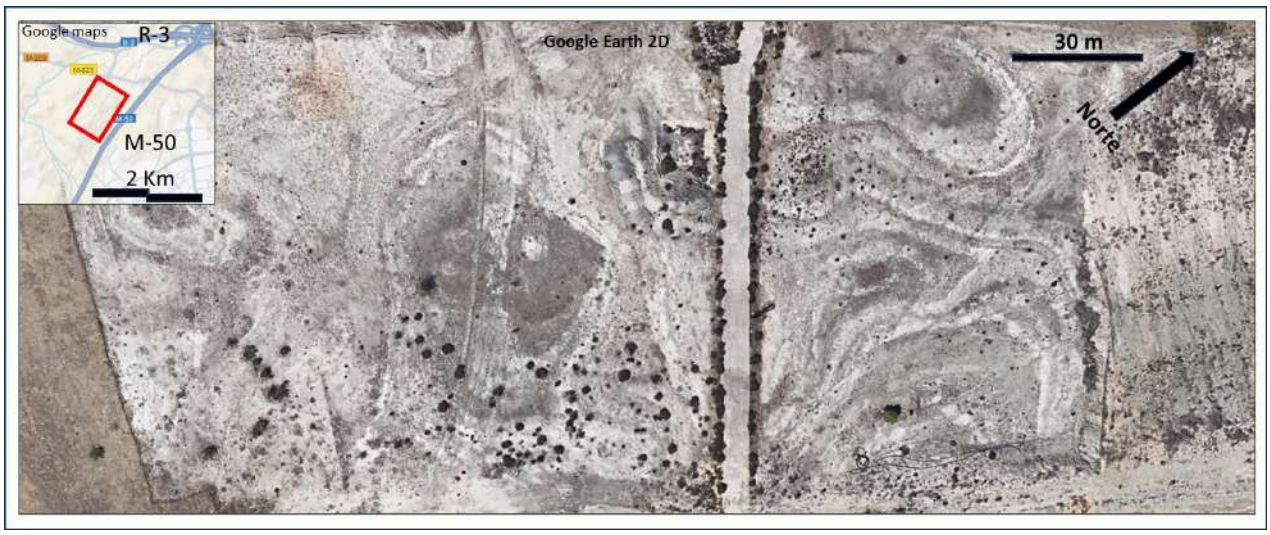


FIGURA 6. *Vista en planta de capas miocenas intensamente deformadas (Fig. 5 para vista oblicua). Se indican las coordenadas geográficas en el centro de la imagen: 40º22'50"N y 3º33'17"W.*

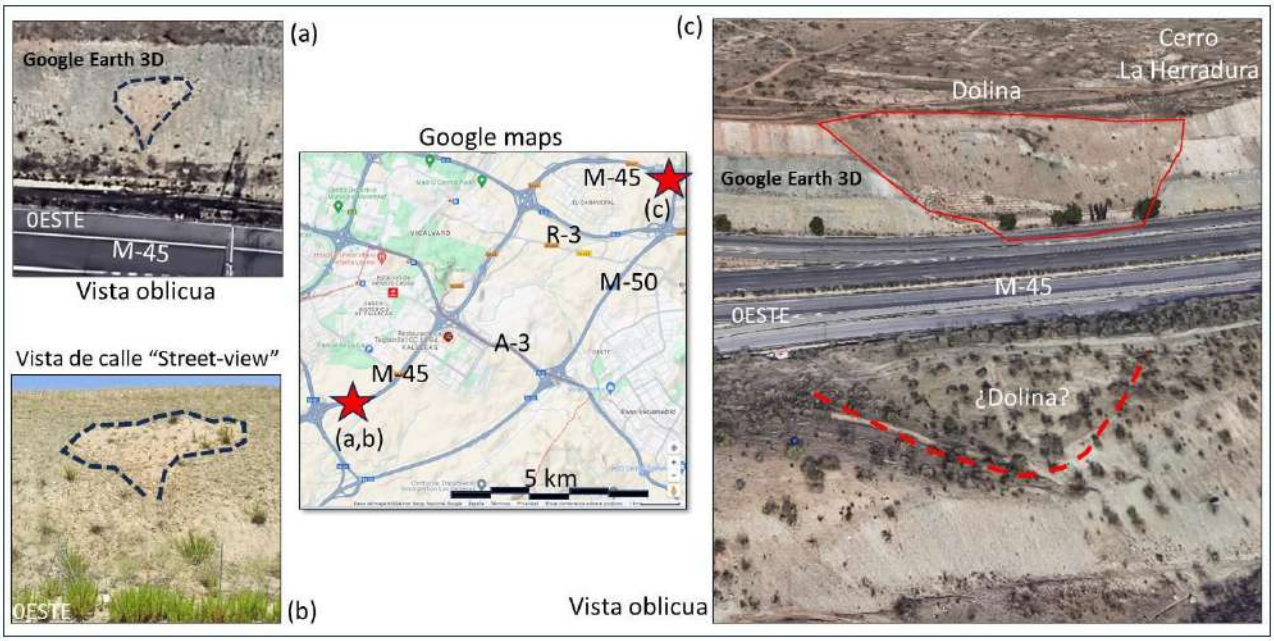


FIGURA 7. (a) *Vista oblicua de posible estructura de escape de agua. Coordenadas 40º21'13"N y 3º37'59"W.; (b) Vista a pie de calle (igual afloramiento que 7a); (c) Dolina expuesta en la autovía M-45 (Giraldo, 2023; coordenadas geográficas 40º24'31" N y 3º31'41"W).*

Borneo), se visitó un afloramiento de la Formación Crocker (Oligoceno, de aguas profundas). Este primer ejemplo es para comparar la foto realizada en el sitio y la imagen satelital oblicua de "*Google Earth 3D*", que permite tener una visión panorámica. La vista oblicua ayuda a observar la continuidad de las capas y refinar la interpretación geológica a lo largo del paisaje urbano.

ECUADOR (GUAYLLABAMBA)

Este afloramiento altamente deformado (Fig. 3) está ubicado inmediatamente al noreste de la ciudad de Guayllabamba (al este de Quito), en el sistema central andino. Gracias a la imagen "a pie de calle", se pudo finalmente geolocalizar con precisión, después de haber sido fotografiado por el autor en 1987. El afloramiento contiene sedimentos lacustres pleistocenos y cenizas volcánicas intercaladas (Villagómez, 2003); se observan importantes deformaciones extensionales y ejemplos clásicos de desplazamientos paralelos a la estratificación. Se invita al lector a "conducir virtualmente" por la carretera panamericana ya que hay más afloramientos con interesantes deformaciones gravitacionales a lo largo de la misma (Giraldo, 2021). Se recomienda también, usar la opción relieve del "*Google maps*", en la cual se destaca la geomorfología del volcán de Pambamarca, situado al sureste (Fig. 3).

VENEZUELA (ESTADO DE SUCRE)

El afloramiento de la falla de desgarre sinistra de Laguna Grande fue visitado en 1988 (Fig. 4). El plano de falla es sub-vertical, con estrías sub-horizontales y pone en contacto capas miocenas por debajo de rocas cretácicas (Giraldo y Beltrán, 1989). La imagen oblicua ("*Google Earth 3D*") muestra la posición del afloramiento y la traza de la falla en el paisaje.

ESPAÑA (CUENCA DE MADRID)

Durante el Mioceno parte del centro de la península ibérica estuvo ocupada por lagos intra-continentales salados. Más detalles sobre la geología regional aparecen en Sanz-Montero y Rodríguez-Aranda (2022). En la región también hay relieves kársticos y cavernas en las cuales se han preservado fósiles de gran interés para diversos campos de las geociencias. A lo largo de varias autovías y redes ferroviarias, hay expuestos espectaculares afloramientos miocenos (Fig. 5) que tradicionalmente se han asociado a colapsos por procesos kársticos. En el distrito de Vicálvaro se visualizan las deformaciones tanto en taludes, como en planta (Fig. 6; Giraldo, 2023). Dicho sector presenta importantes problemas geotécnicos asociados al nivel freático local (Sanz de Ojeda, et al., 2021).

Hay posibles evidencias de figuras de escapes de agua que podrían asociarse a licuefacción debido a la actividad sísmica durante el Mioceno (Fig. 7); la alta saturación de agua y la baja compactación de los sedimentos podría haber favorecido este proceso. Por otro lado, Sanz - Montero y Rodríguez - Aranda (2022) han documentado "sismitas" miocenas más al sur de la región. La edad de estas deformaciones se restringiría al Mioceno medio – superior, aunque no se descarta que, a nivel de la cuenca de Madrid, hayan ocurrido también durante el Plioceno o inclusive durante el Cuaternario.

CONCLUSIONES

Se recomienda el uso sistemático de estas aplicaciones a nivel de Educación Secundaria, así como en plataformas educativas afines, para incentivar el interés por las Ciencias Geológicas en la comunidad estudiantil. Visitar los afloramientos miocenos de Madrid es una actividad recomendada para fines divulgativos y también para promover la investigación aplicada.

AGRADECIMIENTOS

A los Profesores M. Esther Sanz-Montero y J. Pablo Rodríguez-Aranda (U.C.M.) por su valioso tiempo. Al colega Diego Villagómez por su apoyo para ubicar "virtualmente" el afloramiento de Guayllabamba.

REFERENCIAS

Alfaro, P., Espinoza, J., Falces, S., García-Tortosa, F. y Jiménez-Espinoza, R. (2007): Actividades didácticas con Google Earth. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 15.1: 2-15*.

Bouysse, Ph. (2014): Geological Map of the World at 1:35 *M 3rd edition, revised*, C.G.M.W.

Fleming, Z., (2022): Using virtual outcrop models and google earth to teach structural geology concepts, Journal of Structural Geology, V.156, 104537.

Giraldo, C. (2023): Structural deformations above a Miocene karst system (Madrid, Spain), *ResearchGate*, 14 p.

Giraldo, C. (2021): Deformaciones estructurales pleistocenas en la cuenca de Guayllabamba (Ecuador), *Revista Maya de Geociencias*, Noviembre, 49-53.

Giraldo, C. y Shah, J. (2018): Deciphering structural deformations along overturned strata of Crocker Fm., Sabah onshore (Malaysia). En: *EAGE Reservoir Congress*, Diciembre, Kuala Lumpur, 4 p.

Giraldo, C. y Beltrán, C. (1989): La Falla de Laguna Grande (Edo. Sucre): Tectónica cuaternaria y campo de esfuerzos asociado, *Boletín GEOS* 29: 195-204.

Sanz de Ojeda, J.; Sanz, E.; Elorza, F.J.; Riaguas, C. y Liaño, M.d.P. (2021): Simulation of Groundwater Flow in an Aquiclude for Designing a Drainage System during Urban Construction: A Case Study in Madrid, Spain. *Sustainability*, 13, 1526.

Sanz-Montero, M.E. y Rodríguez-Aranda, J.P. (2022): Seismites in Miocene gypsum microbialites: Multiproxy tools for paleoenvironmental reconstruction of saline lakes. *Sedimentary Geology* 439,106219.

Villagómez, D. (2003): Evolución geológica Plio-cuaternaria del valle Interandino central en Ecuador zona Quito - Guayllabamba - San Antonio. Tesis de Grado (Escuela Politécnica Nacional),135 p

El Hidrogeodía de Madrid (2017-2023): dando a conocer las aguas subterráneas

Hidrogeodía in Madrid (2017-2023): learning about groundwater

A. de la Losa[1], C. Baquedano[1], L. Moreno[1], R. Morales[1], J. Heredia[1], F. López[1], E. Díaz[1], A. Romero[1] y J.J. Durán[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.delalosa@igme.es, c.baquedano@igme.es, l.moreno@igme.es, r.morales@igme.es, negrojghd@gmail.com, elisabeth.diaz@igme.es, a.romero@igme.es, jj.duran@igme.es

Resumen: El Hidrogeodía es una jornada de divulgación científica de la hidrogeología, la ciencia que estudia las aguas subterráneas. Esta iniciativa se celebra con motivo del Día Mundial del Agua (22 de marzo) y está promovida por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE), con la colaboración de Organismos Públicos de Investigación y Universidades. Los objetivos principales son difundir y concienciar sobre la importancia de los recursos hídricos subterráneos y poner en valor los lugares histórico-culturales y los elementos patrimoniales asociados a las aguas subterráneas. El Hidrogeodía se celebra en la Comunidad de Madrid desde su inicio, en el año 2017, exceptuando los años 2020, suspendido por la COVID-19, y 2021, sustituido por un video divulgativo debido a las restricciones de movilidad por la pandemia. En total, más de 250 personas han aprendido "in situ" acerca de temas tan diversos como el origen de los viajes de agua, las fuentes "milagrosas" y los balnearios de la comunidad, la evolución en el abastecimiento de agua a Madrid y la relación entre las aguas subterráneas y los ecosistemas dependientes de ellas. Estos recorridos divulgativos han demostrado ser una excelente herramienta de difusión sobre la importancia y el papel ambiental de los recursos hídricos subterráneos.

Palabras clave: Hidrogeodía, aguas subterráneas, divulgación, Comunidad de Madrid.

Abstract: *Hidrogeodía is a dissemination event about hydrogeology, the science that studies groundwater. This initiative is held on the occasion of World Water Day (March 22) and is promoted by the Spanish Group of the International Association of Hydrogeologists (AIH-GE) with the collaboration of Public Research Organizations and Universities. Its main objectives are to spread awareness about the importance of groundwater resources and to highlight historical-cultural sites and heritage elements associated with groundwater. Hydrogeoday has been celebrated in the Community of Madrid since its inception in 2017, except for the years 2020, suspended due to COVID-19, and 2021, when it was replaced by an informative video due to mobility restrictions caused by the pandemic. In total, more than 250 people have learned about diverse topics such as the origin of water routes, "miraculous" springs and spas in the region, the evolution in water supply to Madrid, and the relationship between groundwater and ecosystems dependent on them. These educational tours have proven to be an excellent tool for disseminating information on the importance and environmental role of groundwater resources.*

Key words: *Hidrogeodia, groundwater, dissemination, Madrid Region.*

INTRODUCCIÓN

El Hidrogeodía es una jornada de divulgación de la hidrogeología, celebrada con motivo del Día Mundial del Agua (22 de marzo) y promovida por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE). Sus principales objetivos son difundir, sensibilizar y concienciar sobre la importancia de los recursos hídricos subterráneos, fomentar su conservación y uso responsable, así como dar a conocer algunos lugares histórico-culturales y elementos patrimoniales asociados a las aguas subterráneas.

Es una actividad gratuita, abierta a todo tipo de público, sin importar sus conocimientos previos en la materia, y que consiste en un recorrido temático guiado por hidrogeólogos y expertos en la materia, desarrollado tanto en el interior de las ciudades como en su entorno natural cercano. Todo el material divulgativo generado durante estas actividades (guías, fotografías y vídeos) está disponible en la página web de la AIH-GE.

En este contexto, durante las seis ediciones llevadas a cabo (años 2017, 2018, 2019, 2021, 2022 y 2023) hasta el momento, se han organizado casi 100 salidas de campo en más de 20 provincias españolas, Andorra y en varios países iberoamericanos (Guatemala, Chile, etc.), en las que se han visitado numerosos lugares o elementos del medio natural de gran interés hidrogeológico. Cabe destacar la alta participación con más de 7.000 asistentes, y la gran implicación por parte de las entidades organizadoras y colaboradoras.

El Hidrogeodía se celebra en la Comunidad de Madrid desde su inicio, en el año 2017, exceptuando los años 2020, suspendido por la COVID-19, y 2021,

sustituido por un video divulgativo debido a las restricciones de movilidad por la pandemia. Un total de 250 personas han asistido a las cinco salidas de campo realizadas hasta 2023. En ellas se han abordado diferentes temas como el origen de los viajes de agua, las fuentes "milagrosas" y los balnearios de la Comunidad, la evolución en el abastecimiento de agua a Madrid, y la relación entre las aguas subterráneas y las lagunas del Parque Regional del Sureste, el karst yesífero de Estremera o las fuentes y manantiales del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama.

A continuación, se hace una breve descripción de los seis Hidrogeodías realizados durante estos años en la Comunidad de Madrid (Fig.1 y 2).

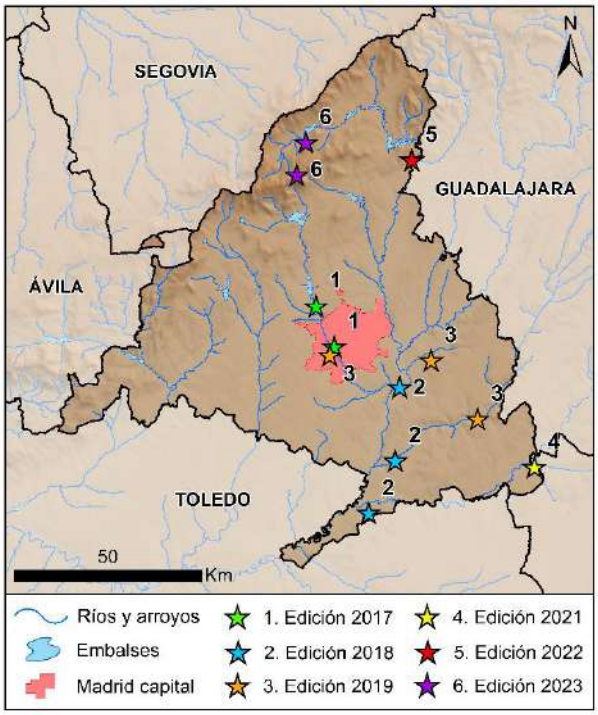


FIGURA 1. *Localización de las seis ediciones del Hidrogeodía en la Comunidad de Madrid.*

HIDROGEODÍA-2017

En esta primera edición se visitaron los antiguos viajes de agua de la Villa y los pozos artesianos de El Pardo. El principal objetivo fue conocer la secuencia histórica del abastecimiento con aguas subterráneas. Las paradas fueron las siguientes:

- Parada 1: visita al Museo de los Caños del Peral (Metro de Ópera), observando los restos arqueológicos de la Fuente de los Caños del Peral, el acueducto de Amaniel y la alcantarilla del Arenal (Pinto et al., 2010). Se mostró el funcionamiento de los antiguos viajes de agua a Madrid y se explicó el conocido fracaso de la búsqueda de agua subterránea en la Villa de Madrid a mediados del siglo XIX: el caso del Pozo de Mateu.

- Parada 2: desde el Mirador de Valpalomero, en el Monte de El Pardo, se realizó una descripción geológica de la Cuenca de Madrid y su entorno. Posteriormente, desde el aparcamiento del restaurante El Faro (carretera M-612), se llevó a cabo un recorrido a pie por el arroyo de la Quinta en sentido SE, siguiendo una galería de captación en la que se conservan sus pozos de acceso (capirotes) y chimeneas, y finalizando en los sondeos de Rafael Janini de principios del siglo XX (Janini, 1913). En este punto se puso de manifiesto el éxito de estos pozos artesianos y la importancia del acuífero terciario detrítico de Madrid.

HIDROGEODÍA-2018

Bajo el título de "Lagunas del sureste de Madrid y aguas subterráneas, una relación oculta" se celebró la segunda edición del Hidrogeodía en el entorno de los cursos bajos de los ríos Manzanares, Jarana y Tajuña (Uribelarrea-Del Val, 2008). Se visitaron varias lagunas de origen natural y artificial, haciendo hincapié en la relación existente entre las aguas superficiales y subterráneas. Las paradas realizadas fueron las siguientes:

- Parada 1: laguna del Campillo (Rivas-Vaciamadrid). Tras explicar la Geología del paraje de la laguna y su funcionamiento hidrogeológico, se mostró la evolución del entorno de la laguna, pasando de ser una gravera a formar parte de uno de los humedales del Parque Regional del Sureste en la actualidad.

- Parada 2: dolina de Titulcia y laguna de San Juan (Chinchón). Durante esta parada se pudo comprobar la acción disolutiva del agua sobre los yesos y el colapso posterior que ha generado una impresionante dolina de 38 m de diámetro y 20-25 m de profundidad. Además, se puedo contemplar la laguna de San Juan cuyo origen posiblemente esté relacionado con procesos de karstificación.

- Parada 3: Mar de Ontígola (Aranjuez). Ejemplo de laguna artificial localizada sobre materiales evaporíticos. La presa, construida en el siglo XVI durante el reinado de Felipe II, presenta una gran importancia a nivel histórico y arquitectónico por sus innovaciones técnicas y el enorme volumen de agua que acumulaba, algo insólito en la época.

HIDROGEODÍA-2019

Durante esta jornada se mostraron varias fuentes milagrosas y balnearios de la Comunidad de Madrid, a los que tradicionalmente se les han atribuido propiedades terapéuticas e incluso mágicas (Calvo-Rebollar, 2013).

- Parada 1: fuente de la Salud (parque del Oeste) y fuente de San Isidro (cementerio de San Isidro). Estas fuentes han congregado desde hace tiempo a numerosos residentes en Madrid, ávidos por beber su agua, que se suponía garantizaba una larga vida y buena salud. En ambas fuentes se expuso una visión de la geología e hidrogeología del entorno explicando su origen, características físico-químicas de sus aguas y los problemas derivados de su localización, pues actualmente se sitúan en el interior de una gran ciudad o

aguas abajo de un cementerio, como es el caso de San Isidro. La visita a la fuente de San Isidro permitió describir también el yacimiento paleontológico cercano, próximo al río Manzanares, donde en tiempos pleistocenos habitaron especies extintas como los elefantes y rinocerontes.

- Parada 2: balneario de Loeches y embotelladora-balneario de Carabaña. La segunda parte de la jornada se trasladó a la zona sureste de la Comunidad, donde se visitaron ambas instalaciones, ya en desuso, pero con un floreciente pasado, cuando miles de personas, aquejadas de los males más diversos, confiaban su sanación a estas aguas amargas y extraordinariamente salinas. Las visitas incluyeron explicaciones acerca de aspectos geológicos, hidrogeológicos, históricos y médicos.



FIGURA 2. Asistentes a las distintas ediciones del Hidrogeodía Madrid.

HIDROGEODÍA-2021

Durante la cuarta edición del Hidrogeodía, y debido a la imposibilidad de realizar salidas al campo por las restricciones de movilidad impuestas durante la pandemia de la COVID-19, se llevó a cabo un "recorrido virtual" por el karst yesífero de Estremera y su entorno (comarca de Las Vegas, al sureste de la Comunidad), mediante un video divulgativo. Este entorno se seleccionó porque 2021 fue declarado Año Internacional de las Cuevas y el Karst por la UNESCO, a propuesta de la Unión Internacional de Espeleología, y se consideró que era importante dedicar esta edición a los karsts desarrollados sobre yesos, poco conocidos en la Comunidad de Madrid. Por su parte Estremera es una zona de gran importancia hidrogeológica debido a la presencia de afloramientos karstificables yesíferos y su estrecha relación con las aguas subterráneas, que ha dado lugar a un tipo de modelado superficial y subterráneo muy particular.

En el karst de Estremera se pueden observar numerosas morfologías exokársticas, como lapiaces y dolinas, las formas superficiales de disolución kárstica más habituales. Similares orígenes tienen las numerosas cavidades, destacando, por su tamaño, el complejo kárstico subterráneo "Pedro Fernández" o "Sima de las Yeseras" (Almendros y Antón, 1983). Además de su importancia geológica, este complejo subterráneo alberga restos arqueológicos pertenecientes a la edad de Bronce. Durante el vídeo se muestran aspectos históricos y culturales del karst en yesos, como los cantiles del risco de las cuevas, en Perales de Tajuña (declarado en 1931 Patrimonio Nacional), habitadas desde el neolítico hasta principios del pasado siglo. También se muestran los usos minero-medicinales de las aguas asociadas a yesos, así como los riesgos geológicos relacionados con estos materiales.

HIDROGEODÍA-2022

Esta quinta edición fue el año del reencuentro. El Hidrogeodía volvió al campo y pudimos disfrutar de nuevo del contacto directo con el público asistente. Durante esta jornada se desarrolló una visita guiada por la sierra noroeste de Madrid, dando a conocer algunos aspectos relativos al abastecimiento de agua potable a la población mediante el uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas, desde el Pontón de la Oliva al embalse de El Atazar pasando por los pozos de Torrelaguna.

- Parada 1: desde el mirador de Uceda, próximo a la Iglesia románica de Santa María de la Varga, se aprovechó una visión panorámica de la zona para explicar el entorno geológico y la hidrogeología de Torrelaguna y sus alrededores.

- Parada 2: el Pontón de la Oliva, considerada la solución para el suministro de agua a la población de Madrid, fue la primera gran presa construida en el siglo XIX. Sin embargo, los problemas de karstificación en las calizas donde se asienta (Sánchez-Moral et al, 2003), dieron lugar a un gran fracaso y nunca llegó a funcionar como se esperaba.

- Parada 3: pozos de Torrelaguna. Se realizó una visita a las instalaciones de abastecimiento del Canal de Isabel II, compuesta por una serie de pozos que captan las aguas del acuífero cretácico de Torrelaguna (Sánchez et al, 2005). Durante la visita se mostraron las técnicas constructivas de los mismos y su equipamiento. Además, se pudieron contemplar unos "pozos Ranney", con drenes radiales que captaban el agua de los materiales aluviales recientes, actualmente en desuso.

- Parada 4: en el camino hacia el embalse de El Atazar, se pudo observar una estación de aforo en el cauce del río Jarama, nº 46 de la Confederación Hidrográfica del Tajo, así como un meandro abandonado en el río Lozoya, considerado como Lugar de Interés Geológico (LIG). El Hidrogeodía 2022 concluyó con la espectacular vista del embalse de El Atazar, el mayor embalse de la región, todo un hito de la ingeniería hidráulica.

HIDROGEODÍA-2023

Esta última edición, consistió en un paseo hidrogeológico por el valle alto del Lozoya. Se hizo hincapié en las aguas subterráneas que esconde el Parque

Nacional de la Sierra de Guadarrama, haciendo un recorrido por diferentes tipos de acuíferos y comentando su calidad química (Yélamos et al., 2019; Rodríguez-Fernández, 2020).

- Parada 1: fuente Cossío como ejemplo de acuífero fisurado en rocas duras y localizado en el alto del puerto de la Morcuera. Los asistentes pudieron descubrir los recursos subterráneos ligados a estos materiales, dando lugar a manantiales efímeros y de limitada extensión, pero de gran importancia. Además, se pudo comprobar in situ las características físico-químicas de estas aguas.

- Parada 2: el borreguil de la cabecera de arroyo del Aguilón y los acuíferos detríticos superficiales vinculados a humedales y criptohumedales. Se mostraron estos lugares ricos en suelos orgánicos y que, con lámina de agua muy somera, facilitan la recarga de las aguas subterráneas.

- Parada 3: el Calvero de la Higuera (Pinilla del Valle) y los acuíferos carbonáticos. Las dolomías cretácicas del fondo de valle del Lozoya constituyen un acuífero kárstico con porosidad secundaria por fracturación y disolución, donde se han desarrollado numerosas cavidades, algunas de las cuales presentan restos arqueológicos y paleontológicos como las desarrolladas en el Calvero de la Higuera, habiendo sido declarada como zona de interés arqueológico y paleontológico en 2004. Además, en el entorno de Rascafría pudimos observar la existencia de manantiales kársticos de gran importancia como la fuente de los Batanes, importante punto de descarga natural hacia el cauce del río Lozoya, así como el antiguo sistema de abastecimiento del Monasterio de El Paular.

- Parada 4: la fuente de los Geólogos, ejemplo de acuífero asociado a depósitos de ladera (coluvial). En la parte final del recorrido, pudimos contemplar este singular monumento dedicado a cuatro de los geólogos pioneros en el estudio de la Geología de la Sierra de Guadarrama. Además, se explicaron aspectos acerca del funcionamiento hidrológico de este tipo de acuífero somero asociados a depósitos de ladera, como el que alimentan a estas fuentes.

CONCLUSIONES

A lo largo de sus seis ediciones, el Hidrogeodía se ha consolidado como una excelente herramienta de divulgación para destacar la importancia de las aguas subterráneas, tanto desde el punto de vista del desarrollo y bienestar de la sociedad como del buen funcionamiento de los ecosistemas, así como poner de manifiesto el papel fundamental que juegan en un contexto de cambio global, desde un punto de vista climático y socio-económico.

Todo el material divulgativo generado durante estas actividades está disponible en la página web de la AIH-GE (http://www.aih-ge.org/hidrogeodia/) para aquellas instituciones u organismos interesados, como ayuntamientos, centros educativos y profesionales que deseen realizar itinerarios turísticos relacionados con aspectos hidrogeológicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda prestada en la organización y realización del Hidrogeodía a la AIH-GE y a todas las instituciones implicadas durante la celebración de estas seis ediciones.

REFERENCIAS

Almendros, M.A. y Antón, F.J. (1983): El complejo kárstico-yesífero subterráneo "Pedro Fernández" (Estremera, provincia de Madrid). *Cuadernos do Laboratorio Xeológico de Laxe, 5. VI Reunión do Grupo Español de Traballo de Quaternario*, 333-345.

Calvo-Rebollar, M. (2013): Las aguas minerales y sales purgantes naturales españolas. Notas históricas. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (3): 451-475.

Pinto, V., Gili, R. y Velasco, F. (2010): *Los viajes de agua de Madrid durante el Antiguo Régimen*. Ed. Fundación Canal de Isabel II, Madrid, 173 p.

Janini, R. (1913): *Riegos con Aguas artesianas. Noticias generales respecto a los Pozos artesianos y a los arrendamientos de terrenos para huertas en el Real Patrimonio de El Pardo*. Intendencia general de la Real Casa y Patrimonio, Valencia, 90 p.

Rodríguez-Fernández, R. (2020): *Guía Geológica del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Serie Guías Geológicas de Parques Nacionales*. Instituto Geológico y Minero de España y Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Madrid, 282 p.

Sánchez-Moral, S., Lario, J., Bustamante, I., Cañaveras, J.C., Echegaray, M., Sanz, E., Segura, M. y Cuerva, S. (2003): Procesos de karstificación actual en el área del Cerro de la Oliva (Patones. Madrid). *Estudios Geológicos*, 59: 181-193.

Sánchez, E., Iglesias, J.A., Cabrera, E., Muñoz, A. y López-Camacho, B. (2005): Los campos de pozos del Canal de Isabel II: construcción, equipamiento y resultados. En: *Libro homenaje al Profesor D. Rafael Fernández Rubio*, 369-385.

Uribelarrea-Del Val, D. (2008): *Dinámica y evolución de las llanuras aluviales de los ríos Manzanares, Jarama y Tajo, entre las ciudades de Madrid y Toledo*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 435 p.

Yélamos, J., Sanz-Pérez, E. y Escavy- Fernández, J.I. (2019): Las aguas subterráneas del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (4): 743-772.

Implementación de modelos digitales 3D en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra: El proyecto GEODIGIT.

Implementation of 3D digital models in Earth Sciences teaching: The GEODIGIT project.

M. De Matteis[1,2], O. Ferrer[1,2], E. Roca[1,2], O. Gratacós[1,2], M. Aulinas[1,3], H. Albert[1,3], P. Arbués[1,2], S. Batenburg[1,2], F. Borràs[4], E. Beamud[1,2,5], P. Cabello[1,2], E. Carola[1,2], X. Delclòs[2], D. Garcia-Sellés[1,2], A. Geyer[5], M. Estiarte[1,2], O. Gómez[1,2], P. Granado[1,2], M. Guinau[1,2], M. Lopez-Blanco[1,2], E. Masana[1,2], J. Molins[1,2], J.A. Muñoz[1,2], M. Ortuño[1,2], P. Santolaria[1,2] y M. Snidero[1,2]

1 Institut de Recerca UB-Geomodels, Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona. marcodematteis@ub.edu, joferrer@ub.edu, eduardroca@ub.edu
2 Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès, 08028, Barcelona.
3 Dept. de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Geologia, Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès, 08028, Barcelona.
4 Drones for Geology, C/ S'Auguer1, 7300, Blanes.
5 Geosciences Barcelona, CSIC, C/ de Lluís Solé i Sabarís, s/n, 08028 Barcelona.

Palabras clave: Digitalización 3D, modelos geológicos virtuales, fotogrametría, recursos docentes.

Resumen

La enseñanza en las Ciencias de la Tierra se ha basado en gran parte en la observación e interpretación de afloramientos, muestras de mano y láminas delgadas de minerales, rocas y fósiles. Los recientes avances tecnológicos en digitalización 3D aplicados con éxito en la industria y la investigación, se están empezando a incorporar en el mundo de la educación como una potente herramienta que, en el caso de las Ciencias de la Tierra, facilita el desarrollo de capacidades cognitivas como la visualización 3D de una forma más efectiva que los métodos 2D clásicos. Sin embargo, a pesar de estos avances, aún existen limitaciones a la hora de aplicar de forma efectiva los modelos digitales 3D en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra. En respuesta a esta necesidad, el proyecto GEODIGIT (TED2021-130602B-I00), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR, pretende desarrollar modelos digitales a partir de técnicas fotogramétricas y material docente complementario en Ciencias de la Tierra, y organizar un entorno virtual de aprendizaje que facilite su acceso y utilización. En este trabajo presentamos los avances, desafíos y limitaciones hallados durante el desarrollo de estos nuevos materiales y su implementación a una unidad docente que, usando modelos digitales 3D de diferentes escalas (afloramientos y muestras de mano), abarca diversas disciplinas de las Ciencias de la Tierra.

Abstract

Teaching in Earth Sciences has long relied on the observation and interpretation of outcrops, hand samples, and thin sections of minerals, rocks, and fossils. Recent technological advances in 3D digitization, successfully employed in industry and research, are now being integrated into education as a powerful tool that, in the case of Earth Sciences, facilitates the development of cognitive skills such as 3D visualization more efficiently than 2D methods. However, despite these advances, challenges persist and there are still limitations for an effective application of digital models for teaching Earth Sciences. To address this gap, the GEODIGIT project (TED2021-130602B-I00), funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and the European Union "NextGenerationEU"/PRTR, aims to develop digital models using photogrammetric techniques, complementary teaching materials, and a virtual learning environment to enhance the accessibility and utilization of these resources. In this work, we present the progress, challenges, and limitations encountered in the development of these new materials based on 3D digital models of different scales (e.g., outcrops and hand samples) and its implementation in a comprehensive teaching unit spanning different Earth Sciences disciplines.

Proyecto MIVIDE: Minerales en la Vida Cotidiana y el Desarrollo.

MIVIDE Project: Minerals in Everyday Life and Development.

J. Delgado[1], C. Barba-Brioso[1], P. Campos[1], D. Martín[1] y M.I. Carretero[1]

1 Dpto. Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química, Universidad de Sevilla 41012 Sevilla. jdelgado15@us.es, cbarba@us.es, pcampos1@us.es, dmartin5@us.es, carre@us.es.

Resumen: Este trabajo presenta los resultados del Proyecto MIVIDE, que propone intervenciones docentes mediante actividades divulgativas en colegios públicos. Estas actividades se centran en la experimentación para fomentar la "inquietud" investigadora del alumnado de Educación Primaria, enfatizando la importancia de los recursos minerales en la vida cotidiana y el desarrollo de la sociedad. La iniciativa se basa en tres stands de trabajo: Exposición Central, con taller sobre las propiedades del flúor y aplicaciones en salud e higiene, y taller sobre plasticidad y aplicaciones en la industria; Stand 1, con experimentos relacionados con las propiedades conductoras de los minerales metálicos (tren auto levitante o futbolín magnético); Stand 2, con aplicaciones enfocadas a la protección del medio, destacando la capacidad de absorción de las arcillas. La evaluación se realizó junto a la coordinación del centro a través de una actividad transferida de una semana de seguimiento que permitió a los estudiantes convertirse en "Expertos Científicos" estudiando que le ocurre a un huevo en vinagre con y sin untarle pasta de dientes. La iniciativa logró involucrar activamente a los alumnos, promoviendo la comprensión de las propiedades de los minerales y fomentando su espíritu investigador. Destacar el interés de los estudiantes por aprender a través de la experimentación, mostrando entusiasmo e incluso tomaron apuntes para comprender las propiedades de los minerales y rocas.

Palabras clave: Educación Primaria, Ciencias de la Tierra, Intervención, Mineralogía, Propiedades de los minerales.

Abstract: *This work presents the main results of the MIVIDE Project, which proposes educational interventions through outreach activities in public schools, focusing on experimentation to foster the investigative curiosity of primary school students. The emphasis is on the importance of mineral resources in everyday life and societal development. The initiative is based on three workstations: the Central Exhibition, a workshop on the properties of fluorine and its applications in health and hygiene, and a workshop on plasticity and applications in the industry. Stand 1 includes experiments related to the conductive properties of metallic minerals (levitating self-propelled train or magnetic foosball). Stand 2 focuses on applications for environmental protection, highlighting the absorbent capacity of clays. The evaluation is conducted with the school coordination through the transferred and weekly follow-up activity, allowing students to become "Scientific Experts" by studying what happens to an egg in vinegar with and without toothpaste. The initiative successfully actively engaged students, promote an understanding of mineral properties, and fostering their investigative spirit. The students' interest in learning through experimentation is evident, as they showed enthusiasm and even took notes to understand the properties of minerals and rocks.*

Key words: *Primary School, Intervention, Mineralogy, Mineral Properties, daily life and developmental*

INTRODUCCIÓN

Vivimos en una sociedad que progresa a pasos agigantados en el desarrollo de nuevas tecnologías y en la búsqueda de las energías limpias, y, las Ciencias Básicas centradas en la caracterización de las propiedades de la materia (Cristalografía y Mineralogía) juegan un papel fundamental. Coincidiendo con la proclamación del 2022 como *Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible* por la *Asamblea General de las Naciones Unidas*, otras organizaciones como la *Asociación Mineralógica Internacional*, declaró el *Año de la Mineralogía 2022*, para mostrar la importancia de esta temática en nuestra vida y enfatizar su carácter de Ciencia Básica fundamental, que nos permita afrontar los principales desafíos sociales y globales.

Los recursos Naturales Minerales, desde los carburantes procedentes de combustibles fósiles, la sal de mesa, el yeso para la construcción o para las escayolas cuando nos rompemos un pie, pasando por las minas de grafito de los lápices, la pasta de dientes, el hierro en la construcción o las arcillas en los medicamentos, entre otros muchos ejemplos, forman parte de nuestra vida cotidiana. Además, en el ocio o en el trabajo, nos acompañan elementos que dependen de dichos recursos como los teléfonos móviles (prácticamente gestionan nuestro día a día), ordenadores (nos facilitan el trabajo), consolas y videojuegos (¡que niño o adolescente en edad

escolar no quiere o tiene una!) o nuestros vehículos (que caminan hacia la reducción de emisiones contaminantes), etc. Muchos de estos bienes, son eficientes y útiles gracias al estudio continuado y conocimiento de las propiedades fisicoquímicas de los materiales, sustentando nuestro desarrollo como sociedad. Algunos elementos químicos con propiedades semiconductoras (Silicio; Si, germanio; Ge y otros muchos como azufre; S, Boro; B o cadmio; Cd) se utilizan aplicados a las nuevas tecnologías para fabricar componentes electrónicos de consumo (LEDs, transistores, microprocesadores, etc., coloquialmente denominados chips). Estos han tomado un cariz geopolítico, llegando incluso a paralizar la producción de vehículos por los cambios productivos derivados de la pandemia. Además, aunque el Si es fácil de conseguir (e.g., arenas silíceas marinas), otros "relativamente" abundantes en la corteza como S tienen concentraciones 1000 veces menores (Fig. 1). En general los llamados semiconductores y otros elementos entre los que encontramos a los comúnmente denominados "metales raros" (vanadio, germanio, antimonio, berilio, renio, tántalo, niobio...o incluso el grupo de tierras raras) se encuentran en nuestro planeta en muy bajas proporciones (inferiores al 1% en la corteza, Hasel et al., 2002) siendo considerados recursos no renovables. Así, el conocimiento de los recursos naturales disponibles, su gestión y la caracterización de materiales se vuelven claves para seguir avanzando hacia la transición ecológica y la búsqueda del desarrollo sostenible.

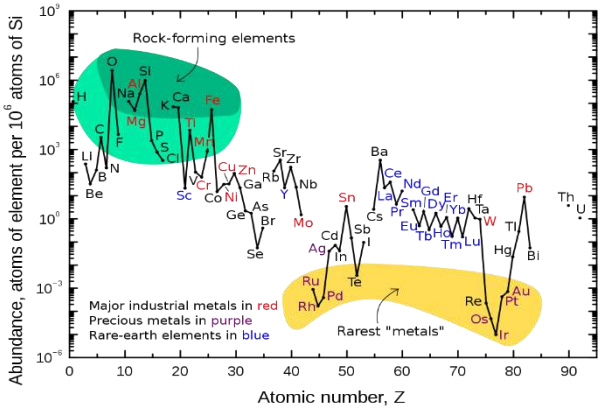


FIGURA 1. *Abundancia relativa respecto a silicio de los elementos químicos en la corteza terrestre en función del número atómico. Tomada de Gordon B. Haxel, Sara Boore, and Susan Mayfield (2002) en USGS; http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02.*

Es importante para la sociedad en general, y mucho más en el ámbito educativo, poner en valor la importancia de las Ciencias de la Tierra para conocer las propiedades y características de los materiales que soportan nuestra Sociedad y la búsqueda del desarrollo sostenible para mejorar la calidad de vida de las personas.

Teniendo en cuenta estas premisas, el objetivo del Proyecto MIVIDE, es realizar intervenciones docentes divulgativas dirigidas al alumnado del último ciclo de Educación Primaria en colegios públicos para promover la importancia de las Ciencias Básicas. El proyecto se centra en el conocimiento de las propiedades de los minerales y rocas para la obtención de materiales y/o elementos que forman parte de los productos que usamos en nuestro día a día.

Esta actuación tiene como eje principal la experimentación del alumnado, fomentando así su "inquietud" investigadora, que sin duda constituye la base fundamental para que las nuevas generaciones apuesten por un desarrollo cognitivo que permita mejorar la sostenibilidad de nuestra sociedad. Gracias al esfuerzo y dotación de recursos materiales y humanos de la Universidad de Sevilla, se vienen realizando actividades científicas en centros públicos de enseñanza, con una eficaz repercusión sobre el alumnado, contrastada en las evaluaciones de las propias intervenciones.

ACTUACIÓN EN EL ÁMBITO ESCOLAR

La actividad que se presenta se diseñó expresamente para alumnos de 3er ciclo de Educación Primaria (5º y 6º) en base a las actitudes curriculares que deben adquirir en su formación y teniendo en cuenta que presentan una edad apropiada para el desarrollo de pensamientos críticos.

La actividad se desarrolló en el último trimestre del curso académico 2021-22, dado que ya se habían impartido los contenidos relacionados con Ciencias de la Tierra en la asignatura de Ciencias Sociales. La duración fue de 1,5 horas para cada grupo de trabajo, incluyendo transiciones entre stands. Los grupos (media de 25 alumnos) fueron divididos al inicio de la actividad en 3 subgrupos, cada uno de los cuales permaneció unos 20 min en los puestos de trabajo y experimentación. En la recepción de los grupos se explicó a los participantes como se realizaría la actividad y se les obsequió con una libreta con bolígrafo ("El cuaderno del Investigador") para motivar su atención.

La organización de la actividad se desarrolló en tres puestos de trabajo (stands) que serán descritas a continuación.

Los stands tienen nombres diferentes según las propiedades minerales principalmente involucradas en cada uno de ellos, así como una frase titular que lo hace fácilmente relacionable con las actividades a realizar. Además, mediante el panelado de los stands se explicaron dichas características y se presentaron otros ejemplos que cumplían esa u otras propiedades similares.

EXPOSICIÓN CENTRAL – Como punto de divulgación, se realizó una exposición interactiva central (**"Podéis Tocar"**) en la que se exponen muestras de minerales y rocas que constituyen recursos minerales o de los que se obtienen elementos que utilizamos para fabricar objetos cotidianos, y otros que forman parte de las nuevas tecnologías. La exposición se completó con esos objetos que nos rodean para que la importancia de los recursos minerales fuese visual y tangible.

*Taller: **¡A Blanquear!** La materia y sus propiedades:* Fluorita – Flúor y aplicaciones en salud e higiene. Los estudiantes pudieron reconocer hábitos del día a día y aprender que muchos de los avances en higiene o sanidad

están basados en las propiedades de la materia (Fig. 2). Los alumnos prepararon por grupos dos huevos, uno envuelto en pasta dentífrica y otro sin nada, e introdujeron ambos en un vaso con vinagre alimentario. Se les indicó que debían dejar el experimento durante 7 días. Con esta actividad se pretende fomentar el proceso investigativo y también el cooperativismo entre los alumnos, ya que cada subgrupo debe investigar qué le sucede a cada huevo, y realizar una pequeña memoria en la que reflejen sus descubrimientos. La actividad por tanto se transversaliza en el tiempo y en las competencias hacia los docentes del centro, que otorgarán un "Certificado de Investigador" al finalizar el proyecto a todos los participantes.



FIGURA 2. *Arriba: Ejemplo del cartel del stand Exposición Central. En el caso del experimento 1: Fluorita y aplicaciones para la salud y la higiene. Abajo: Experimentación a través de las propiedades organolépticas de los minerales y su relación con bienes u objetos reconocibles en nuestra vida cotidiana.*

Taller: **¡A Moldear!** *La materia y sus propiedades:* **Plasticidad**. Se pretende mediante la observación poner de manifiesto la importancia de la capacidad plástica de las arcillas (ejemplo de la bentonita) frente a otros minerales y las aplicaciones derivadas de dicha propiedad (cerámica, materiales de construcción, "barros de balnearios"...o incluso impresión 3D, Mourelle et al., 2009). En torno a dicha exposición central se ubicaron dos stands de experimentos que permitieron una integración del conjunto y el desarrollo del conocimiento a través de la experimentación por parte del estudiantado:

STAND 1 – Enfatizando mediante experimentos cómo las materias primas pueden presentar aplicaciones enfocadas a las nuevas tecnologías.

Experimento 1. **Necesitamos un conductor *¿Quién sabe CONDUCir?*** *La materia y sus propiedades:* **Conductores**. Se trabajó la inquietud de los estudiantes por conocer la propiedad de conducir la electricidad mediante un circuito de pila de petaca que debe cerrarse para encender una bombilla con la ayuda de minerales (ej. Pirita o calcopirita) u otros objetos cotidianos entre los cuales se colocan algunos conductores (clips) y otros que evidentemente no lo son (palillo de dientes, hilo grueso de lana, etc., **Fig. 3**).

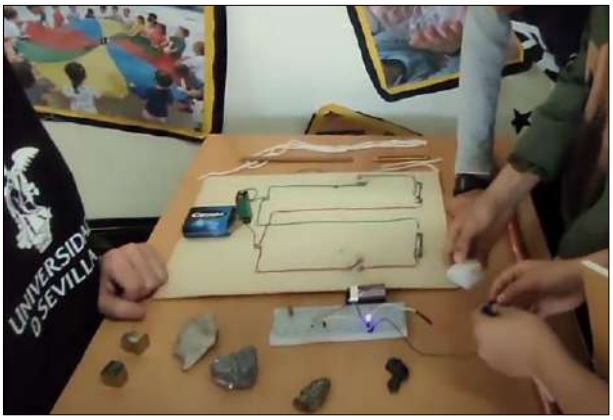


FIGURA 3. *Ejemplo de circuito electrónico donde se aprecia como los participantes encienden una luz led azul cerrando el circuito con una muestra natural de cobre nativo.*

Experimento 2. **¿CONDUCción O MAGNETismo?** Se construyó un tren autopropulsado tipo "maglev" o de levitación magnética (Fig. 4) que funciona con una pila tipo-AA y dos super-imanes (neodimio) en sus polos, desplazándose en el interior de un hilo de cobre enrollado en espiral (vía del tren). Este permitió entender el uso compartido de las propiedades de la materia, sirviendo de nexo con los experimentos de magnetismo. Todos los experimentos fueron acompañados de cartelería y tarjetas informativas para resaltar curiosidades y hacer visible la relación entre las propiedades de la materia y su utilidad.



FIGURA 4. *Ejemplo de carteles o tarjetas informativas de los stands. Este caso ejemplo del magnetismo y los superconductores aplicado al transporte público sostenible.*

Experimento 3. **MAGNETo, ¿superhéroe o el hombre de MAGNETita?** La materia y sus propiedades: **Magnetismo**. **"Futbol playa magnético"**. En esta actividad se promovió que el alumnado experimentase con propiedades relacionadas con el campo magnético como la atracción y la repulsión mediante un juego de mesa. Para ello se construyó un futbolín (**Fig. 5**) donde el portero era el imán atrayente, mientras que el delantero, por medio del imán repulsor tendría que intentar meter un gol al contrataque. Dado que la fuerza de atracción entre imanes es ligeramente

superior a la de repulsión, al delantero no le iba a ser nada fácil. Además, un conjunto de "futbolistas" imantados eran los encargados de meter un gol con la única ayuda de la magnetita (el mineral "mágico") bajo el futbolín, dando vida a los pequeños futbolistas.



FIGURA 5. *Fotografía de la actividad "Futbol Playa Magnético" en la que los docentes muestras las propiedades magnéticas del mineral magnetita a los participantes antes de comenzar el campeonato de fútbol playa.*

STAND 2 – Enfatizando cómo las materias primas pueden tener aplicaciones enfocadas a la protección del medio y la transición ecológica.

Experimento 4. **¿Por qué solo medio? ¡Cuidamos ABSOlutamente todo el ambiente!** Propiedades especializadas: **Absorción**. **"Dora la Aspiradora"**. Mediante este ensayo se quiso hacer ver a los estudiantes algunas propiedades muy específicas de sepiolita-paligorskita mediante un experimento de absorción de líquidos (uso extendido como arena en camas para gatos, Fig. 6). Los minerales de la arcilla por su estructura cristalina son capaces de absorber volúmenes importantes de fluidos (gas, vertidos de aceites, efluentes de actividades industriales, etc.) incrementado en ocasiones hasta un 70% su volumen por lo que presentan interesantes aplicaciones destinadas a la conservación del medioambiente (Carretero et al., 2007).



FIGURA 6. *Fotografía de la actividad "Dora la Aspiradora" en la que se muestran mediante ejemplos y experimentación del alumnado las propiedades absorbentes de los minerales del grupo de las arcillas.*

Experimento 5. **El agua que bebemos... ¿Estará ABSOlutamente limpia?** Propiedades especializadas: **Filtros selectivos**. Los estudiantes observan, mediante un cambio de color, cómo actúan los materiales utilizados para descontaminar aguas. Este ensayo se basa en la desaparición de color de una disolución que contiene un colorante (azul de metileno) tras su agitación en presencia de un material adsorbente como minerales de la arcilla. Para ello, se utilizan dos tipos de arcillas, una tradicional (montmorillonita) y una modificada (nanoarcilla: Closite-10A) para mostrar la importancia de los procesos de nano ingeniería que logran aumentar la capacidad y afinidad del adsorbente.

EVALUACIÓN Y RESULTADOS

Para finalizar la intervención, se realizó una reunión con el profesorado responsable en cada curso y con la coordinación del centro para evaluar los aspectos a mejorar de las actividades en futuras ediciones.

La actividad, "A blanquear" transfiere las competencias al centro escolar, implica el seguimiento por grupos de estudiantes del experimento con diferentes pastas de dientes (con o sin flúor). Finalmente, los alumnos entregaron el informe en el que recogieron sus experiencias de investigación, que les permitió convertirse en "**Expertos Científicos**" con la obtención del "*Diploma De Investigador/a*".

CONCLUSIONES

Los alumnos mostraron un altísimo grado de implicación al apreciar que las actividades son realizadas por ellos mismos y pueden interactuar con las materias primas e involucrarse en el desarrollo de los experimentos. Aunque no fuese necesario, la mayoría de los alumnos incluso tomaba apuntes (Fig. 2) para aprender sobre las propiedades de los minerales y rocas presentes en los experimentos.

La tarea transferida a los centros docentes, mediante el seguimiento de la evolución del huevo en vinagre, fue todo un éxito y los alumnos dejaron constancia en sus cuadernos de investigador de todo el proceso, por lo que el fomento de la inquietud investigadora queda patente en el alumnado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del Proyecto MIVIDE financiado por la acción IV.2 Ayudas para actividades de divulgación científica, dentro del VII Plan Propio De Investigación Y Transferencia (anualidad 2022) de la Universidad de Sevilla.

REFERENCIAS

Carretero, M.I. y Pozo, M. (2007). En: Mineralogía Aplicada. Salud y Medio Ambiente. Ed. Thomson. Madrid, 406 pp. ISBN: 978-84-9732-487-8.

Haxel, G.B., Boore, S., and Mayfield, M. (2002). Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology. From U.S. Geological Survey, Edited by Peter H. Stauffer and James W. Hendley II.

Mourelle, L., Meijide, R., Freire, A., Maraver, F., Carretero, M.I. (2009). Técnicas Hidrotermales y Estética del Bienestar, editorial Paraninfo. ISBN: 978-84-9732-679.

Propuesta didáctica de una charla-taller de bivalvos: experiencia en el Museo de Ciencias Naturales AVAN (Viso del Marqués, Ciudad Real).

Didactic proposal for a talk-workshop about bivalves: Experience at the AVAN Natural Science Museum (Viso del Marqués, Ciudad Real, Spain.)

G. Delvene[1], S. Menéndez[1], E. Baeza[1] y S. Laguarta[2]

1 CN Instituto Geológico y Minero de España, CSIC. C/. Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. g.delvene@igme.es; s.menendez@igme.es; e.baeza@igme.es
2 IES San Alberto (Sabiñánigo), Paseo La Corona,2, 22600 Sabiñánigo (Huesca); silvia.laguarta@iessanalberto.com

Resumen: Este trabajo presenta los resultados de la puesta en marcha de una propuesta didáctica sobre organismos fósiles y actuales. El formato elegido de charla-taller se ha desarrollado en el entorno rural con alumnos de Educación Secundaria Obligatoria (ESO) y Bachillerato. La charla-taller denominada *"Soy un bivalvo: vivo aquí porque soy así"* consta de tres partes, y tiene una duración entre una hora y hora y cuarto. La **primera parte** teórica ofrece nociones básicas sobre los bivalvos como grupo perteneciente a los moluscos, apoyándose en un modelo (en resina) anatómico de bivalvo y material audiovisual (fotos y vídeos sobre la forma y comportamiento animal). Una **segunda parte** incluye ver y tocar conchas de bivalvos actuales y fósiles, y poner en práctica lo aprendido en la parte teórica. Para ello se trabaja con una clave dicotómica basada en los caracteres morfológicos de la concha. En la **tercera parte** aprenden qué es una réplica y su utilidad en paleontología. Se ha utilizado este grupo de animales (moluscos bivalvos) para acercar el método científico en biología y paleontología, y transmitir el conocimiento y respeto al medio natural.

Palabras clave: moluscos, biología, paleontología, educación, divulgación

Abstract: *This work presents the results of the implementation of a didactic proposal on fossil and extant organisms. A talk-workshop was developed in a rural environment with students of Compulsory Secondary Education (ESO) and High School (Bachillerato). The talk-workshop called* "I am a bivalve: I live here because I am like this" *consists of three parts, and lasts between an hour and an hour and a quarter. The first theoretical part offers basic notions about bivalves as a group belonging to the molluscs, supported by an anatomical model (in resin) of a bivalve and audiovisual material (pictures and videos on the shape and behaviour of the animal). A second part include seeing and touching shells (fossil and extant bivalves), and putting into practice what has been learnt in the theoretical part. To do this, they will work with a dichotomous key based on the morphological characters of the shell. In the third part they learn what a replica is and its usefulness in palaeontology. This group of animals (bivalve molluscs) has been used to approach the scientific method in biology and palaeontology, and to transmit knowledge and respect for the natural environment.*

Key words: *molluscs, biology, palaeontology, education, science, disemmination*

INTRODUCCIÓN

Los bivalvos son un grupo de moluscos que han despertado el interés en toda la historia de la humanidad tanto por su belleza estética como por ser fuente de alimentación. Podríamos decir que son cercanos y conocidos, pero a la vez hay un gran desconocimiento a nivel popular respecto a cómo viven, como se alimentan o como se reproducen. Es por ello, que el taller de bivalvos que proponemos, acerca al público otra perspectiva de estos moluscos, captando su atención sobre cuestiones curiosas como su capacidad natatoria, o la reproducción estratégica desarrollada por los bivalvos de agua dulce. Además, utilizamos este grupo de animales para acercar el método científico a los estudiantes a partir de la observación de conchas de animales actuales y fósiles, y comparándolas entre sí.

El Museo de Ciencias Naturales de Viso del Marqués, Ciudad Real, fue fundado por la Asociación Viseña Amigos de la Naturaleza (AVAN) en el año 1988. Esta asociación, sin ánimo de lucro, tiene como objetivos estudiar, investigar, fomentar y contribuir a la conservación de la naturaleza. Su colaboración con el Museo Geominero (CN-IGME; CSIC) comenzó ya en el año 2004 cuando su exposición itinerante "*Tesoros en rocas*" fue alojada por el Museo AVAN. Este fue el germen de muchas otras colaboraciones hasta el día de hoy, tales como la exposición "*Original o réplica*", o diversas conferencias y talleres de temas relacionados con las Ciencias de la Tierra. Ambos museos están

hermanados desde el año 2018, y actualmente colaboran de manera fluida. Fruto de esta colaboración es la propuesta didáctica que aquí presentamos, una charla-taller sobre bivalvos actuales y fósiles, puesta en práctica con estudiantes del CEIP (colegio de Educación Infantil y Primaria) Nuestra Señora del Valle, y el IES (Instituto de Educación Secundaria) Los Batanes. Además de los objetivos propios de la charla-taller que se detallarán más adelante, la actividad también pretende acercar el Museo AVAN al alumnado y al personal docente, para que lo tengan presente en sus programas y lo visiten con mayor frecuencia.

Viso del Marqués (Ciudad Real) es una localidad que cuenta con una población aproximada de 2.135 habitantes y que está situada en las estribaciones del norte de Sierra Morena. Tiene tres núcleos de población (Bazán, Villalba de Calatrava y Umbría de Fresnedas), y un importante "diseminado rural" contando con población distribuida por las distintas fincas dentro de su término municipal. Este hecho significa que los centros docentes albergan, no solo alumnado del propio Viso del Marqués, sino de todos los alrededores. En concreto, el colegio Nuestra Señora del Valle cuenta con estudiantes de las poblaciones de Almuradiel, San Lorenzo de Calatrava y Huertezuelas (http://ceip-delvalle.centros.castillalamancha.es/nuestro-entro/contacto). Y el IES Los Batanes con alumnado de Almuradiel, Finca "Casa de las Fuentes", San Lorenzo de Calatrava, Huertezuelas, Bazán y Villalba (http://ies-losbatanes.centros.castillalamancha.es/).

La charla-taller sobre bivalvos ha sido adaptada para este tipo de alumnado tanto en su contenido como en su forma. En cuanto al contenido, ya que, en las zonas rurales de interior, la población puede no estar tan familiarizada con moluscos marinos como en las zonas de costa, se han incorporado a la práctica, bivalvos de agua dulce que habitan ríos similares a los del entorno geográfico. Respecto a la forma, hay que tener en cuenta que algunos grupos pueden estar constituidos por estudiantes de cursos y edades diversos, y deben realizar la práctica juntos por cuestión de organización de los centros docentes (Tabla I).

CURSO	Nº ALUMN@S	EDAD
4º, 6º PRIMARIA	27	9-11
5º PRIMARIA	15	10
3º ESO	23	14
1º ESO; 1º BACHILLERATO	28+4	12; 16

TABLA I. *Cursos, edades y número de estudiantes, del CEIP Nuestra Señora del Valle, y el IES Los Batanes, que han realizado la actividad didáctica de bivalvos actuales y fósiles.*

ANTECEDENTES

Varios trabajos han sido realizados como resultado de la divulgación científica de los moluscos bivalvos actuales y fósiles en los últimos años. Delvene y Laguarta (2005) presentaron una actividad práctica con bivalvos, aplicable tanto en enseñanza universitaria como en educación secundaria obligatoria (ESO) y bachillerato. El trabajo describía el montaje de un acuario marino de bivalvos, donde el alumnado pudiera familiarizarse con el método científico, y a partir de la observación directa de animales vivos, pudiera deducir el modo de vida de bivalvos fósiles. Delvene et al. (2011) presentaron un trabajo proponiendo la tafonomía como un recurso didáctico para explicar los conceptos de "fósil" y "fosilización" en la educación pre-universitaria a través de la actividad *"¡Atención! Se está formando un fósil"*. El caso concreto de un episodio de mortalidad de una comunidad del bivalvo actual *Anodonta anatina* en el Embalse de Santolea (Parque Cultural del Maestrazgo, Teruel) ofrecía un ejemplo de excursión didáctica, para dar a conocer la metodología de trabajo de campo en las Ciencias Naturales y el conocimiento y respeto del Patrimonio Natural.

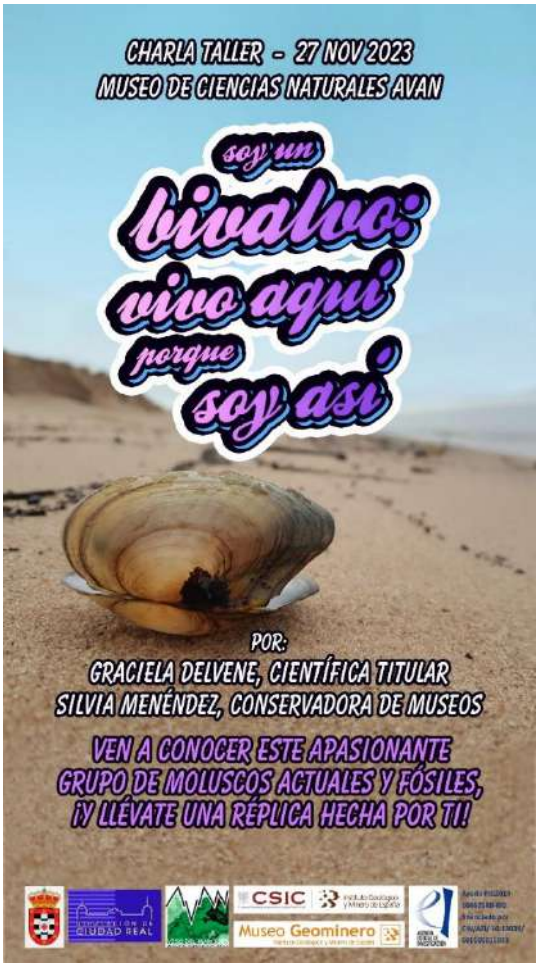


FIGURA 1. Cartel anunciando la charla-taller "Soy un bivalvo: vivo aquí porque soy así" realizado en el Museo de Ciencias Naturales AVAN del Viso del Marqués (Ciudad Real). Diseño: María José Torres Matilla (Museo Geominero, CN-IGME,CSIC).

Menéndez y Delvene (2003) presentaron una sencilla propuesta a través de una clave dicotómica que permitía deducir dónde y cómo vivían los bivalvos propuestos de acuerdo a las características morfológicas de sus valvas. Ahora, en el presente trabajo retomamos esta actividad didáctica que ya denominamos *"Soy un bivalvo: vivo aquí porque soy así"* para ampliarla, mejorarla, y comprobar los resultados de su implementación con alumnado de varios cursos y edades de la ESO y bachillerato.

EXPERIENCIA EN EL MUSEO AVAN

La propuesta didáctica consiste en una charla-taller que se puede realizar para público escolar o general, pero que en este caso concreto lo adaptamos al primero (Tabla I). Con el reclamo "*Ven a conocer este apasionante grupo de moluscos actuales y fósiles. ¡Y llévate una réplica hecha por ti!*" (Fig. 1) tratamos de llamar la atención del público, de hecho, recibimos algunas solicitudes de realizarlo para el público general lo que avala el éxito de la propuesta.



FIGURA 2. *Modelo anatómico de bivalvo de agua dulce en resina (A); mesa de taller preparada con las muestras de conchas de bivalvos actuales y fósiles y los esquemas de trabajo.(B); clave dicotómica diseñada para este taller, basada en caracteres morfológicos de la concha (C).*

Con el objetivo de trabajar de manera dinámica, la charla-taller se ha organizado en tres partes:

- una primera parte teórica breve (15 minutos aproximadamente) trata de impartir unas cuestiones básicas sobre los bivalvos como grupo perteneciente a los moluscos. Se describen sus principales características anatómicas (con un modelo anatómico de bivalvo, Fig. 2A) y el reflejo que éstas dejan en sus conchas. También se explican las formas de las conchas y los principales modos de vida de bivalvos que podemos deducir a partir de sus formas. Estos modos de vida y algunas peculiaridades de su reproducción se ilustran con vídeos cortos obtenidos de la red, para amenizar a la audiencia. El alumnado aprende la metodología de trabajo con bivalvos fósiles, así como su utilidad en la paleontología.



FIGURA 3. *Molde en silicona y vaciado en escayola de dos bivalvos actuales, realizados para este taller (A); momento del taller en el que se están realizando los vaciados en jabón (B); Jabones de bivalvos realizados con jabón de glicerina mezclada con diferentes esencias y colorantes (C).*

- una segunda parte consiste en ver y tocar conchas de bivalvos actuales y fósiles, y poner en práctica lo aprendido en la primera parte (Fig. 2B). A través de una sencilla clave dicotómica basada en características morfológicas de las conchas podrán diferenciar las formas de los bivalvos y hacer interpretaciones de dónde y cómo vivían estos invertebrados acuáticos (Fig. 2C). Esta parte tiene una duración aproximada de 20 a 25 minutos.

- en la tercera parte (20 a 25 minutos) aprenden qué es una réplica y su utilidad en paleontología. Además, realizan una réplica de una concha de un bivalvo en jabón de glicerina y obtienen un jabón aromático de recuerdo de la actividad (Fig. 3). Esta parte puede parecer menos relevante, pero la realidad es que, en general, al público le agrada llevarse algo del taller que realizan en cualquier ámbito. Además, con la elaboración de una réplica se

transmite la importancia de respetar la legislación respecto a la recogida de conchas y fósiles, y las consecuencias que conlleva.

Esta última parte causa mucha atención y genera bastante alboroto en la sala, por lo que se divide a los participantes en grupos y se les ofrece resolver un pequeño enigma entre todos para optimizar el tiempo (Fig. 4A-B). El enigma consiste en averiguar el agente causante de los agujeros perfectos (*ooichnus*) de un conjunto de conchas. En una caja se encuentra oculto el agente causante (gasterópodo) y la podrán abrir para descubrirlo después de la discusión.

Por último, se les invita a que se hagan una foto con su bivalvo favorito (Fig. 4C). Para este propósito se han elegido de manera intencionada varios modelos de bivalvos a gran escala según su modo de vida (excavador, nadador, cementante, marino o de agua dulce).



FIGURA 4. *Ejemplares de bivalvos marinos actuales con perforaciones en sus valvas (A); material didáctico para resolver el enigma propuesto sobre los agentes causantes de las perforaciones de los bivalvos (B); modelos de bivalvos a gran escala con la cartela de invitación para hacerse una foto (C).*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tal y como recoge la actual ley de Educación, LOMLOE, las materias tanto de "Conocimiento del Medio Natural, Social y Cultural" en la etapa de primaria como de "Biología y Geología" de la ESO buscan, entre otros objetivos, la comprensión de fenómenos naturales, a través de prácticas que desarrollen sus competencias científicas, y que despierten la curiosidad, la actitud crítica, el pensamiento y las destrezas científicas, así como fomentar las vocaciones científicas. Este tipo de taller se adapta perfectamente a estos objetivos y, del mismo modo, genera interés en el alumnado a través del descubrimiento, la observación, la experimentación y el planteamiento de cuestiones. En el segundo ciclo de Educación Primaria, en el bloque A de Cultura Científica, se incluyen conocimientos sobre la vida en nuestro planeta, entre ellos, las características propias de los animales que permiten su clasificación y diferenciación en subgrupos relacionados con su capacidad adaptativa al medio. En 1º de ESO, en la concreción de los saberes básicos del bloque D, los seres vivos, se incluyen las características más importantes de los diferentes grupos de animales, entre ellos los moluscos. La propuesta didáctica diseñada encaja perfectamente para que sea disfrutada por alumnado tanto del segundo ciclo de Educación Primaria (3º y 4º), así como en 1º de ESO. El formato elegido de "charla-taller", permite, bien iniciar los conceptos y contenidos antes de verlos, bien revisarlos tras trabajarlos en el aula. El diseño del taller en tres partes permite desarrollar destrezas básicas del trabajo científico, como es la observación y la experimentación, competencias específicas de las áreas y materias de Ciencias, pero también permite el desarrollo de otras competencias vinculadas con otras materias. Otro aspecto interesante de la actividad es que permite desarrollar una actividad formativa en un contexto diferente del aula, dando valor tanto al Museo de Ciencias de Viso del Marqués, como al patrimonio natural que en él se expone.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal del Museo AVAN, docentes y alumnado del CEIP Nuestra Señora del Valle, y el IES Los Batanes, por la gran acogida del taller y el éxito en su desarrollo. Este trabajo es una contribución a los proyectos PID2019-104625RB-I00, PID2022-137316NB-C22 y 3173R CN-IGME, CSIC.

REFERENCIAS

Delvene, G y Laguarta, S. (2005). Actividad práctica con bivalvos actuales y fósiles aplicable a la educación secundaria. En: *Actas de las XX Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología*: 33-41.

Delvene, G. Menéndez, S., Laguarta Ortas, S. y Araujo, R. (2011). La tafonomía como recurso didáctico: fosilización de bivalvos de agua dulce. *Paleontologia i evolució, memòria especial*, 5: 107-111.

http://ceip-sdelvalle.centros.castillalamancha.es/nuestro-centro/contacto

http://ies-losbatanes.centros.castillalamancha.es/

Menéndez, S. y Delvene, G. (2003). Soy un bivalvo: vivo aquí porque soy así. *Genoma, revista para profesores de biología y geología*: 2-3.

Conectando Ciencia y Educación: Proyectos Innovadores del Museu de Ciències Naturals de Barcelona

Connecting Science and Education: Innovative Projects from the Museu de Ciències Naturals de Barcelona

Y. Díaz[1] y V. Vicedo[1]

1 Museu de Ciències Naturals de Barcelona, Passeig Picasso s/n, 08003 Barcelona. ydiaz@bcn.cat, vvicedov@bcn.cat

Palabras clave: enseñanza, difusión científica, proyectos educativos.

Resumen

El Museu de Ciències Naturals de Barcelona (MCNB) ha iniciado proyectos de divulgación científica a través de sus departamentos de Paleontología y Petrología. Estos proyectos buscan organizar colecciones pedagógicas internas y desarrollar materiales didácticos para enriquecer la oferta educativa del museo. El proyecto se fundamenta en la transmisión de valores científicos a través de guías didácticas, inicialmente útiles para el MCNB pero también aplicables a otros museos y centros educativos. La "Guía de Rocas v2.0" del departamento de Petrología ofrece contenido introductorio a la geología, fichas descriptivas de rocas y minerales y actividades para educación infantil, primaria y secundaria. La "Guía Didáctica de Paleontología", que nació de propuestas didácticas anteriores (Vicedo *et al.*, 2021), está en fase de redacción y viene respaldada por la Xarxa de Museus de Ciències Naturals de Catalunya. Ambos proyectos, diseñados para integrar y entrelazar conocimientos geológicos y paleontológicos con los de otras disciplinas, contribuyen a la misión del MCNB como museo referente en la difusión científica, especialmente en la formación de estudiantes y educadores. Estas guías, originadas en el MCNB, evolucionan hacia una iniciativa nacional, destacando como recursos valiosos para educadores que buscan enseñar geología y paleontología, profundizando en la relevancia social de estas disciplinas para comprender y valorar el sistema Tierra.

Abstract

The Museu de Ciències Naturals de Barcelona (MCNB) has initiated scientific outreach projects through its Palaeontology and Petrology departments. These projects aim to organize internal pedagogical collections and develop didactic materials to enrich the museum's educational offerings. The project is based on the transmission of scientific values through didactic guides, initially useful for the MCNB but also applicable to other museums and educational centres. The 'Rocks Guide v2.0' from the Petrology department provides introductory content to geology, descriptive sheets of rocks and minerals, and activities for elementary, primary, and secondary education. The "Teaching Guide for Palaeontology", stemming from previous didactic proposals (Vicedo *et al.*, 2021), is in the drafting phase and is supported by the Network of Natural Sciences Museums of Catalonia. Both projects, designed to integrate and intertwine geological and paleontological knowledge with other disciplines, contribute to the MCNB's mission as a leading museum in scientific dissemination, particularly in the education of students and educators. These guides, originating from the MCNB, are evolving into a national initiative, standing out as valuable resources for educators interested in teaching geology and palaeontology, delving into the social relevance of these disciplines in understanding the Earth system.

Referencias

Vicedo, V., Ozkaya de Juanas, S., Fernández-Lluch, D., Batlles, A. y Ballester, M. (2021). *Geoheritage* 13, 19.

El volcán en la oscuridad, audioguías para adentrarte en una exposición

The volcano in the dark, audio guides to enter an exhibition

E. Díaz-Losada[1], B. Martínez[2], D. Ponce de León[3] y A. Romero Prados[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España, c/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. elisabeth.diaz@igme.es, a.romero@igme.es
2 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
3 Instituto Geológico y Minero de España, c/ La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. d.poncedeleon@igme.es

Palabras clave: volcán Tajogaite, erupción de La Palma, audioguías, ciencia inclusiva, exposición accesible

Resumen

Uno de los principales objetivos de la divulgación es trasladar el conocimiento geológico a toda la población. Sin embargo, en ocasiones nos olvidamos de una parte importante del público, las personas con discapacidad (https://www.csic.es/sites/default/files/2024-02/15%20PRINCIPIOS%20DE%20DIVULGACION%20INCLUSIVA_2024_vertical.pdf). Por este motivo, la Unidad de Cultura Científica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) ha adaptado parte de su exposición "Sobre el Volcán", formada por 12 paneles, un audiovisual y 5 expositores con material generado durante la erupción del volcán Tajogaite (La Palma, Canarias) y parte de la instrumentación utilizada en su seguimiento, para que sea accesible a personas con discapacidad visual. En concreto, se han realizado audioguías de las 12 infografías que conforman los paneles de la exposición en las que se narran los textos y se describen las ilustraciones y las imágenes que los acompañan para que no se pierda información. Estos audios están alojados en la web del proyecto, desde donde pueden descargarse gratuitamente (https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma/sobre-el-volcan). Se han imprimido códigos QR adaptados que enlazan con las audioguías y están colocados junto a los paneles expuestos. Con esta adaptación se hace más accesible un campo de las Ciencias de la Tierra como es la vulcanología y, en concreto, se facilita que se puedan conocer y entender los aspectos geológicos relacionados con la erupción de La Palma de 2021 por un espectro más amplio de la sociedad. Esta adaptación cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Abstract

One of the main objectives of outreach is to transfer geological knowledge to the entire population. However, sometimes we forget about an important part of the public, people with disabilities (https://www.csic.es/sites/default/files/2024-02/15%20PRINCIPIOS%20DE%20DIVULGACION%20INCLUSIVA_2024_vertical.pdf). For this reason, the Scientific Culture Unit of the Geological and Mining Institute of Spain (IGME-CSIC) has adapted part of its exhibition "Sobre el Volcán", made up of 12 panels, an audiovisual and 5 exhibitors with material generated during the eruption of the Tajogaite volcano (La Palma, Canary Islands) and part of the instrumentation used in its monitoring, to make it accessible to people with visual disabilities. Specifically, audio guides have been made for the 12 infographics that make up the exhibition panels in which the texts are narrated and the illustrations and images that accompany them are described so that information is not lost. These audios are hosted on the project website, from where they can be downloaded for free (https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma/sobre-el-volcan). Adapted QR codes have been printed that link to the audio guides and are placed next to the exposed panels. With this adaptation, a field of Earth Sciences such as volcanology is made more accessible and, specifically, it makes it easier to know and understand the geological aspects related to the 2021 La Palma eruption over a broader spectrum of the society. This adaptation has the collaboration of the Spanish Foundation for Science and Technology - Ministry of Science, Innovation and Universities.

De la Universidad al colegio: un proyecto geológico de aprendizaje-servicio

From the University to the school: a geologic service-learning project

I. Duque[1], L. Porras[1], C. Carrascosa[1], J. Ferrero[1], N. Naranjo[1], A. Marina[2], M. Sanchís[1], L. González-Acebrón[1], C. Pérez-Garrido[1], C.O. Fesharaki[2] y A. García-Frank[1]

1 Facultad de Ciencias Geológicas (UCM), C/Jose Antonio Novais 12, 28040 Madrid. isaduque@ucm.es, luciapor@ucm.es, cescarra@ucm.es, jaferr04@ucm.es, nereanar@ucm.es, misanchi@ucm.es, laurgonz@ucm.es, ,agfrank@ucm.es
2 Facultad de Educación-CFP (UCM), C/Rector Royo-Villanova 1, 28040 Madrid. adrmartin@ucm.es, omidfesh@ucm.es

Palabras clave: aprendizaje-servicio, enseñanza de la Geología, Educación primaria.

Resumen

Se ha realizado un proyecto de Aprendizaje-Servicio (ApS) entre la Facultad de Geología, la Facultad de Educación (ambas de la Universidad Complutense) y un colegio público de Madrid (CEIP Vicálvaro). Seis estudiantes voluntarios de 2º curso del Grado en Geología y un graduado en magisterio de educación primaria han diseñado y realizado, junto con los docentes implicados, cuatro talleres sobre minerales y rocas. Los talleres estaban dirigidos a dos clases de 5º de primaria (50 niños/as en total), y su objetivo final era estimular su capacidad de observación y su interés por la ciencia en general. Se han desarrollado en sesiones de una hora y cuarto, utilizando las aulas del colegio. Las clases se dividían en pequeños grupos de 4-5 alumnos/as, estando cada grupo guiado por un estudiante monitor. Esto ha obligado a tener material suficiente para cada pequeño grupo (colecciones de minerales y rocas), pero ha posibilitado un aprendizaje basado en la experiencia ya que todo el alumnado ha podido manipular los ejemplares. Los minerales y las rocas se han abordado desde un enfoque genético, simulando la formación de minerales mediante experimentos de crecimiento cristalino, para explicar después las propiedades de los minerales en relación con sus aplicaciones en la vida cotidiana. En el caso de las rocas, se han realizado pequeños experimentos con gominolas para representar las condiciones de formación de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. El proyecto ha favorecido la motivación de los estudiantes de Geología por el grado que cursan, mejorando sus habilidades para transmitir y divulgar y ha sido muy bien acogido por el alumnado de primaria, que ha puntuado de forma anónima los talleres, obteniendo de media las siguientes puntuaciones (sobre 10): experimentos de crecimiento cristalino (8,4), propiedades de los minerales (8,6,), formación de los tipos de rocas utilizando gominolas (9,9) y clasificación de rocas (8,6), valorando con una puntuación de 9,2 el interés del proyecto.

Abstract

A service-learning project has been done between the Geology School and the Teaching School (both of Universidad Complutense de Madrid) and a public primary school of Madrid (Colegio Vicálvaro). Six voluntary students of 2nd course of the Geology Degree and one graduate on Primary education teaching have designed and carried out, together with the implied teachers, four workshops about minerals and rocks. These workshops were addressed to two classrooms of students of 5th course of primary school (50 children in total), and the final aim was to stimulate their observation capability and their interest in science. They have been developed in sessions of one hour and 15 minutes, using the classrooms of the school. The class was divided in small groups of 4-5 pupils, guided each group for a student monitor. This has forced to have enough material for each small group (mineral and rock collections) but has allowed experiential learning because all children have the chance to manipulate the specimens. The minerals and the rocks have been addressed from a genetic perspective, simulating mineral formation using crystal growing experiments, to later explain the mineral properties in relation to their applications to daily life. In the case of rocks, small experiments with gummies have been done, to represent the formation conditions of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks. The project has favored the motivation of the Geology students for the degree that they are studying, improving their capacities for transmitting and has been very well received by the primary students, which have anonymously punctuated the workshops, obtaining as a mean the following punctuations (out of 10): crystal growing experiments (8.4), mineral properties (8.6), different rock type formation using gummies (9.9) and rock classification (8.6), evaluating the interest of the project with a 9.2 punctuation.

Tras la huella romana

Tras la huella romana

J. Fernández-Lozano[1] y A. González-Abajo[2]

1 Dpto. Tecnología Minera, Topografía y Estructuras, ESTI Minas, Universidad de León 24007 León. jferl@unileon.es
2 La Bañeza León 24750. Angelga2564@gmail.com

Palabras clave: Tras la huella romana, Minería aurífera romana, divulgación, YouTube, Tiktok.
Keywords: Tras la huella romana, Roman gold mining, Public diffusion, YouTube, Tiktok.

Resumen

En los últimos años, la divulgación científica ha experimentado una expansión significativa gracias a las redes sociales y, en particular, a plataformas de vídeo como Youtube y TikTok, llegando así a un público más amplio. Los vídeos online, que combinan imágenes y sonido para transmitir información de manera eficaz, ofrecen una experiencia atractiva para la mayoría de los usuarios de internet, ya que están diseñados para generar emociones y proporcionar entretenimiento. "Tras la huella romana" es un proyecto que propone una serie de vídeos destinados a familiarizar al público general con la minería aurífera. La inclusión de imágenes terrestres y aéreas, obtenidas mediante drones, permite al público sumergirse en la minería romana y proporciona una visión más completa de las características de los diferentes escenarios. Además, estos vídeos facilitan el acceso y la difusión de aspectos científicos relevantes sobre lugares que requieren una preservación especial o que son de difícil acceso. Esto incluye las galerías y explotaciones mineras romanas, así como la infraestructura hidráulica de Las Médulas, que se extiende por más de 700 km y cuenta con numerosos tramos inaccesibles. Los microvídeos, con una duración de menos de 2 minutos, también pueden ser utilizados en el aula para fomentar el interés de los estudiantes en temas específicos, sirviendo como recursos introductorios para diversas materias. Estas herramientas pueden contribuir a mejorar la cultura científica del público y a incrementar el reconocimiento y aprecio hacia la ciencia y los científicos.

Abstract

In recent years, scientific dissemination has experienced significant expansion thanks to social networks and, in particular, video platforms such as Youtube and TikTok, thus reaching a wider audience. Online videos, which combine images and sound to effectively convey information, offer an attractive experience for most internet users, as they are designed to generate emotions and provide entertainment. "*Tras la huella romana*" is a project that proposes a series of videos aimed at familiarizing the public with Roman gold mining. The inclusion of terrestrial and aerial images, obtained by drones, allows the public to immerse themselves in the subject and provides a more complete view of the characteristics of the different scenarios. In addition, these videos facilitate access to and dissemination of relevant scientific aspects about places that require special preservation or that are difficult to access. This includes Roman mining galleries and operations, as well as the hydraulic infrastructure of Las Médulas, which extends for more than 700 km and has numerous inaccessible sections. Microvideos, lasting less than 2 minutes, can also be used in the classroom to foster students' interest in specific topics, serving as introductory resources for various subjects. These tools can contribute to improving the scientific culture of the public and increasing recognition and appreciation for science and scientists.

Divulgación de la sismotectónica de España en la web del IGN

Dissemination of Spain's seismotectonics on the IGN website

A. García-Hourcade[1], L. Lozano[1], J.V. Cantavella[1], L.C. Puertas[1], J.L. Barrera[2], L. Cabañas[1], J. Fernández-Fraile[1] y F. Naveiras[1]

1 Instituto Geográfico Nacional, c/ General Ibáñez Ibero 3, 28003 Madrid. aghourcade@mitma.es, lllopezdemedrano@mitma.es, jvcantavella@mitma.es, lcpuertas@mitma.es, lcabanas@mitma.es, jffraile@mitma.es, fnaveiras@mitma.es
2 Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. C/Raquel Meller, 7, Cdad. Lineal, 28027 Madrid. barreramorate@gmail.com

Palabras clave: sismicidad, tectónica activa, fallas, geología, España.

Resumen

El Instituto Geográfico Nacional (IGN), a través de la Red Sísmica Nacional, informa en todo momento a la población de los terremotos que registra en el territorio nacional. Esta información incluye, en primer lugar, los parámetros focales del terremoto (tiempo origen, localización y magnitud), fases sísmicas registradas e intensidades macrosísmicas si el terremoto se ha sentido por la población. Además, cuando el sismo tiene una magnitud relevante, se incluyen otros productos como la información sobre la fuente sísmica obtenida por medio del tensor momento sísmico o los mapas de sacudida (shakemaps). Recientemente, se ha incorporado también la descripción del contexto sismotectónico de la zona donde ha ocurrido el terremoto o serie sísmica de especial relevancia con el fin de aportar datos sobre la causa de dicho evento o serie y la sismicidad registrada en el pasado. Para ello, se ha dividido el territorio en distintas zonas sismotectónicas y, para cada una de estas zonas, se presentan mapas y texto que incluyen una síntesis general de la geología de la región, su evolución tectónica y los principales terremotos del registro histórico e instrumental. Con este fin, se ha realizado una revisión de fuentes bibliográficas generales y específicas, la extracción de datos de las bases de datos sísmica del IGN y de fallas activas del Cuaternario (QAFI) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), y la recopilación de la cartografía y mapas geológicos disponibles en dichas instituciones. Estas fuentes de datos sísmicos, geológicos y cartográficos se han integrado en un sistema de información geográfico para generar los mapas de las distintas zonas sismotectónicas de España y elaborar el contenido que se publica tanto para ser consultado directamente en la web, como para ser descargado e imprimido en formato póster.

Abstract

The Instituto Geográfico Nacional (IGN), through the Spanish Seismic Network, informs the population about the registered earthquakes in the national territory at any time. This information includes, firstly, the focal parameters of the earthquake (origin time, location, and magnitude), recorded seismic phases and macroseismic intensities in case it is felt by the population. Besides, in case significant magnitude events occur, additional products like the seismic source information obtained from the seismic moment tensor or the shakemaps are also included. Recently, a description of the past recorded seismicity and the seismotectonic context of the area where the relevant event or seismic series occurred has also been incorporated in order to provide information about the cause of the event or series. To that end, the territory has been divided in different seismotectonic areas, each of them supported by maps and text synthetizing the regional geology, its tectonic evolution, and the main earthquakes of the historical and instrumental record. For this purpose, a review of general and specific bibliographic sources, data extraction from the seismic databases of the IGN and Quaternary active faults of Iberia (QAFI) of the Instituto Geológico y Minero de España (IGME) and the compilation of cartography and geological maps available in these institutions has been carried out. These seismic, geological, and cartographic data sources have been integrated into a geographic information system to generate maps of the different seismotectonic zones of Spain and to prepare the content published on the IGN website to be consulted as well as to be downloaded and printed in poster format.

Implementaciones docentes en Geología con archivos interactivos: El ciclo de Wilson y la plataforma Genially.

Educational implementations in Geology with interactive files: The Wilson cycle and the Genially platform.

J.L. Giner Robles[1], J. Elez[2], R. Pérez-López[3], P.G. Silva[4], M. Gómez-Heras[1], Y. Sánchez-Sánchez[2]

1 Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, Campus de Cantoblanco, 28049 Madrid. jorge.giner@uam.es, miguel.gomezheras@uam.es
2 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Pl. Caídos, s/n, 37008 Salamanca. jelez@usal.es, yolanda.ss@usal.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. r.perez@igme.es
4 Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, Avda. de los Hornos Caleros, 50, 05003 Ávila. pgsilva@usal.es

Palabras clave: archivos interactivos, Ciclo de Wilson, Genially, Geología, implementaciones docentes.

Resumen

Los archivos interactivos en los que los alumnos puede marcar su propio ritmo de aprendizaje pueden ser muy útiles para construir diferentes implementaciones docentes, desde la generación de cursos, pasando por implementaciones de estrategias de aula invertida en la clase, e incluso para situaciones de no presencialidad como la ocurrida en la pandemia por la COVID-19 en 2020. En este trabajo se presenta un archivo animado e interactivo de la plataforma Genially en el que se desarrollan una serie de materiales originales sobre el ciclo de Wilson. El archivo generado permite acceder a 116 diapositivas interactivas y animadas que intentan resumir los diferentes procesos asociados a cada una de las fases de este ciclo. Este archivo se ha construido de forma que se pueden implementar fácilmente elementos de gamificación, incluyendo algunas actividades que los alumnos pueden resolver con dinámicas de juego. Estos materiales han sido utilizados en diferentes asignaturas de grado y máster de Universidad Autónoma de Madrid. El archivo es de libre acceso y reutilizable para su adaptación a diferentes niveles académicos. Estos materiales se han realizado en el contexto de la iniciativa GeoDocente en colaboración con AEQUA.

Abstract

Interactive files in which students can set their own pace of learning can be very useful to build different teaching implementations, from the generation of initial courses to the implementation of flipped classroom strategies, and even for non-presential situations such as the one that occurred in the pandemic by COVID-19 in 2020. This paper presents an animated and interactive file from the Genially platform in which a series of original materials on the Wilson cycle are developed. The generated file provides access to 116 interactive and animated slides that attempt to summarize the different processes associated with each of the phases of this cycle. This file has been constructed in such a way that gamification elements can be easily implemented, including some activities that students can solve with game dynamics. These materials have been used in different undergraduate and master's degree courses at Universidad Autónoma de Madrid. The archive is freely accessible and reusable for its adaptation to different academic levels. These materials have been developed in the context of the GeoDocente initiative in collaboration with AEQUA.

El proyecto VIGEOCULT: Realidad virtual para la difusión del patrimonio geológico y paleontológico en el Geoparque Orígens.

The VIGEOCULT project: Virtual reality experience for dissemination of geological and paleontological heritage in the Geopark Orígens.

Ò. Gratacós[1], O. Ferrer[1], J.A. Muñoz[1], G. Rivas[1], P. Santolaria[1], E. Carola[1], A. Galobart[2,3], A. Sellés[2], X. Mir Pellicer[4], G. Puras[4], y J.A. Muñiz[5]

1 I. R. Geomodels, Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, F. de Ciències de la Terra, UB, Martí i Franqués, s/n, 08028, Barcelona. ogratacos@ub.edu, joferrer@ub.edu, jamunoz@ub.edu, p.santolaria.otin@ub.edu, e.carola@ub.edu, grivas@ub.edu
2 Inst. Català de Paleontologia Miquel Crusafont, UAB, Escola industrial, 23, 08201, Sabadell. albert.garcia@icp.cat
3 Museu de la Conca Dellà, C. del Museu, 4, 25650, Isona. angel.galobart@icp.cat
4 Geoparc Mundial UNESCO Orígens, C. de Soldevila, 3, 25620, Tremp. xmir@geoparcorigens.cat, gpuras@geoparcorigens.cat
5 Digivisión. Av. De L'Onze de Setembre, 1, 43203 Reus (Tarragona). jam@digivision.com.es

Palabras clave: Geoparque Orígens, Pirineos, patrimonio geológico y paleontológico, realidad virtual.

Resumen

El Geoparque Orígens en los Pirineos catalanes alberga un patrimonio geológico y paleontológico que abarca los últimos 550 millones de años de la historia de la Tierra. Este lugar es considerado por la comunidad científica como un gran museo al aire libre donde numerosas generaciones de geólogos se han formado. Sin embargo, la transferencia de este conocimiento al público general resulta desafiante, especialmente cuando se intenta mostrar la evolución de la Tierra a partir de paisajes actuales. Para transmitir el conocimiento geológico a la sociedad, el proyecto VIGEOCULT (PLEC2021-00793), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, emplea nuevas metodologías de realidad virtual y realidad aumentada (VR/VA) para generar reconstrucciones geológicas y paleontológicas en 4D, que proporcionan una experiencia emocional basada en la comprensión de los sistemas geológicos y paleoecológicos y su impacto en el paisaje. Para ello, se han combinado rigurosas reconstrucciones científicas con las tecnologías más avanzadas de VR y cine digital creando escenas con un gran poder didáctico que muestran la evolución de localidades o puntos de interés geológico y paleontológico mediante animaciones fotorrealistas a diferentes escalas. En este trabajo se presentan parte de los resultados de un proyecto que tiene como objetivo acercar la comprensión de la evolución de los paisajes geológicos al público en general, superando así una de las barreras más comunes en la divulgación de la geología.

Abstract

The Geopark Orígens (Catalan Pyrenees) houses a geological and paleontological heritage that spans the last 550 million years of Earth's history. This site is considered by the scientific community as a vast open-air museum where numerous generations of geologists have been trained. However, transferring this knowledge to the general public can be challenging, especially when attempting to infer Earth's evolution based on the current landscapes. In an effort to make geological knowledge more accessible to society, the VIGEOCULT project (PLEC2021-00793), uses innovative virtual reality and augmented reality (VR/AR) methodologies to generate 4D geological and paleontological reconstructions providing an emotional experience grounded in understanding geological and paleoecological systems and their impact on the landscape. To achieve this objective, rigorous scientific reconstructions with cutting-edge VR and digital cinema technologies have been combined crafting scenes with a significant educational value that vividly depict the evolution of geological and paleontological sites through photorealistic animations at different scales. In this work we present some of the project's outcomes aiming to facilitate the understanding of the evolution of the geological landscape for the general public and overcome one of the most common barriers in the dissemination of geological knowledge.

Conociendo el Mar: Diseño y aplicación de una herramienta piloto de evaluación sobre cultura oceánica

Getting to know the Sea: Design and application of a pilot assessment tool on ocean literacy

L. Martín-García[1], A.M. Ballegeer[2], D. Ochoa[1], A. S. Rigual Hernández[1], M. A. Bárcena Pernía[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca 37008, Salamanca. lauramaga@usal.es
2 Facultad de Educación, Universidad de Salamanca, Salamanca, 37008, Salamanca.

Resumen: *Los océanos desempeñan un papel crucial en el clima de la Tierra, actuando como el mayor sumidero de carbono y absorbiendo más del 90% del exceso de calor. Las regiones polares, en particular, son fundamentales para estos procesos, ya que influyen en la circulación tanto de la atmósfera como de los océanos, moldeando así el clima global del planeta. Los océanos, además, sustentan una gran variedad de ecosistemas y constituyen más del 90% de la biosfera mundial. Como sociedad, obtenemos de ellos gran parte de nuestros recursos económicos y alimentarios. No obstante, las actividades antropogénicas están afectando negativamente a la salud de los océanos y sus ecosistemas.*

En 2022, las Naciones Unidas propusieron una serie de Objetivos de Desarrollo Sostenible (2021-2030), uno de los cuales pretende promover la conservación y el uso sostenible de los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible (Objetivo 14). La alfabetización oceánica, entendida como el conocimiento de los océanos, su influencia en las personas y las comunidades y su importancia cultural, económica y medioambiental, contribuye al logro de este objetivo. Fomenta la educación, sensibiliza, promueve comportamientos responsables y motiva a las comunidades a tomar decisiones con conocimiento de causa sobre temas relacionados con el medio ambiente y los océanos.

Se ha diseñado un cuestionario piloto como herramienta para evaluar el grado de alfabetización oceánica de una parte de la población española. Se espera valorar el nivel de conocimiento sobre estos ecosistemas, así como la conciencia sobre su importancia en nuestras vidas. Los resultados obtenidos de este cuestionario serán útiles para identificar grupos de población y temas específicos en los que existe una mayor necesidad de formación y concienciación. Esta información permitirá el desarrollo de estrategias educativas específicas para mejorar la alfabetización oceánica y, en consecuencia, influir en los cambios de actitud hacia los océanos.

Palabras clave: Alfabetización oceánica, océanos, regiones polares, sensibilización, sociedad.

Abstract: *The oceans play a crucial role in the Earth´s climate, acting as the largest global carbon sink and absorbing over 90% of excess heat. Polar regions, in particular, are fundamental to these process by influencing the circulation of both the atmosphere and oceans, and thereby shaping the global climate across the planet. Oceans sustain a wide variety of ecosystems, constituting over 90% of the world´s biosphere. As a society, we derive a large part of our economic and food resources from them. Nonetheless, anthropogenic activities are negatively impacting the health of the oceans and its ecosystems.*

In 2022, the United Nations proposed a set of Sustainable Development Goals (2021-2030), one of which aims to promote the conservation and sustainable use of oceans, seas and marine resources for sustainable development (Goal 14). Ocean literacy, understood as knowledge about the oceans, their influence on individuals and communities, and their cultural, economic, and environmental importance, contributes to the achievement of this goal. It fosters education, raises awareness, promotes responsible behaviour, and motivates communities to make informed decisions on environment and ocean-related issues.

A pilot questionnaire has been designed as a tool to assess ocean literacy, aiming to assess the extent of knowledge within a segment of the Spanish population about these ecosystems and their awareness on their importance in our lives. The results obtained from this questionnaire will be useful to identify population groups and specific topics where there is a heightened need for training and awareness. This information will allow the development of targeted educational strategies to enhance ocean literacy, and consequently influencing changes in attitudes towards the oceans.

Key words: *ocean literacy, oceans, polar regions, awareness, society.*

INTRODUCCIÓN

La alfabetización oceánica es el conocimiento, comprensión, conciencia y percepción que tiene una persona sobre los océanos y sobre su importancia para nosotros y nuestro planeta.

Los océanos y los polos tienen un papel crucial en la dinámica climática. Los océanos son importantes sumideros de CO_2 y transportan importantes cantidades de calor desde los trópicos hasta regiones de mayor latitud. Tanto los polos como los océanos son los responsables del funcionamiento de la circulación meridional del vuelco del Atlántico (AMOC) y por lo tanto del funcionamiento del conveyor termohalino. Este sistema permite distribuir el calor por todo el planeta e influye en el clima global. A pesar de que en las evaluaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático (IPCC) hayan concluido que es improbable que se produzca un colapso total de la AMOC en el siglo XXI (Masson-Delmotte et al., 2021), las concentraciones de gases de efecto invernadero son cada vez más preocupantes. Recientemente, en Ditlevsen y Ditlevsen (2023), a partir de una serie de modelizaciones realizadas para un escenario con unas emisiones de gases de efecto invernadero similares a las actuales, han estimado que sí sería posible un colapso de la AMOC a mediados del siglo XXI.

La biodiversidad oceánica también tiene un papel imprescindible puesto que supone más del 90% de la biosfera mundial y los microorganismos marinos son los responsables del 50-85% de oxígeno que se libera a la atmósfera. En las regiones polares se generan unas redes de alimentación esenciales para el sustento de los ecosistemas del resto de los océanos. La productividad y la intensidad de estas fuentes de generación de alimento, está regulada por los cambios estacionales polares. Actualmente, a causa del cambio climático, la estacionalidad en estas zonas está modificándose abruptamente, alterando estas redes de alimentación esenciales para los ecosistemas marinos.

Los océanos también son una fuente crucial de recursos naturales de los cuales dependemos para obtener alimentos, energía, medicamentos y minerales, por lo que nuestra economía también depende de ellos.

Elevar el nivel de conocimiento que tienen las comunidades sobre los recursos oceánicos y polares, permitirá sensibilizar, promover comportamientos responsables y motivar a las comunidades a tomar decisiones informadas, contribuyendo directamente al cumplimiento del ODS 14, 13 y 4. No obstante, la importancia económica y medioambiental de estos recursos estará también determinada por la percepción cultural de cada población. En este sentido, la alfabetización oceánica, además de ser una estrategia de sensibilización y educación, es también una herramienta de valoración de las percepciones y retos que cada comunidad enfrenta para el cumplimiento de los ODS 14, 13 y 4.

OBJETIVOS

- Realizar un cuestionario piloto para evaluar el grado de alfabetización oceánica de la comunidad universitaria en diferentes universidades de España y Latinoamérica.

- Identificar las principales carencias en cuanto a temas que aborda la alfabetización oceánica con las que la población llega a la universidad. También se pretende inferir qué grupos de población y zonas concretas en los que la sociedad requiere una mayor alfabetización oceánica. Esto permitirá desarrollar estrategias educativas para influir en los cambios de actitud de la población hacia los océanos.



FIGURA 1. *Localización de las universidades en las que se llevará a cabo el cuestionario de alfabetización oceánica.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha realizado un cuestionario con un total de 33 preguntas para evaluar el nivel de alfabetización oceánica de la comunidad universitaria en diferentes universidades de España, México, Panamá, Venezuela, Colombia, Perú, Chile y Argentina, todos ellos señalados en el mapa de la figura 1.

El cuestionario está formado por tres bloques de preguntas. El primero de ellos consiste en 6 preguntas de contextualización con las que se pretende conocer el perfil de la persona encuestada (edad, grado universitario que está cursando, ciudad de origen, nivel de interés sobre cambio climático, océanos etc).
En el segundo bloque, se han incluido una serie de preguntas básicas sobre conceptos generales acerca del océano. Algunas de las preguntas han sido extraídas y/o modificadas de otros trabajos similares realizados en otros países europeos. Parte de las preguntas están diseñadas para ser respondidas utilizando la escala de Likert, otras respuestas verdadero/falso/no lo sé y algunas con varias opciones tipo test. Algunos ejemplos de preguntas para este segundo bloque serían:

- ¿Qué profundidad tiene la zona más profunda del planeta?: a) 500; b) 1000; c) 6000; d) 11000 m. (Tipo test). (Guest et al., 2015).

- Los continentes ocupan el 70% de la superficie del planeta. (Verdadero/Falso/ No lo sé). (Guest et al., 2015).

- En qué medida el océano influye en el clima de los continentes. (Escala de Likert). (Modificado de Costa y Cadeira 2018).

- La mayor parte del agua de la lluvia que cae en el continente proviene de: a) el océano tropical; b) el mar que se encuentra cerca de la zona; c) de la evaporación previa del agua del continente (Tipo test). (Koulouri et al., 2022).

- La sal de los océanos viene de: a) la descomposición de los animales marinos; b) de la fotosíntesis de algunos corales marinos; c) el transporte de aguas de los ríos al mar. (Tipo test). (Guest et al., 2015).

- ¿Qué es el plankton?: a) restos de excremento de organismos marinos; b) microorganismos acuáticos; c) partículas contaminantes que llegan del continente al mar. (Tipo test). (Modificado de Guest et al 2015).

- Aportan más oxígeno a la atmósfera los microorganismos marinos que las plantas terrestres. (Verdadero/Falso/No lo sé). (Modificado de Guest et al 2015).

- Cada vez habrá más tsunamis a causa del cambio climático. (Verdadero/Falso/No lo sé).

- Si en las rocas de una montaña encuentras fósiles marinos significa: a) que esa montaña estuvo sumergida bajo el mar; b) que los humanos transportaron esos fósiles hasta allí en la antigüedad; c) que las rocas que forman la montaña se formaron tiempo atrás en un océano o lago. (Tipo test). (Modificado de Koulouri et al 2022).

Finalmente, en el tercer bloque se han incluido 8 preguntas sobre los polos. Algunos ejemplos son:

- El polo norte es una capa de hielo que flota en el océano Ártico (Verdadero/Falso/No lo sé).

- La Antártida es una capa de hielo que flota en el océano (Verdadero/Falso/No lo sé).

- En el polo sur siempre es de noche (Verdadero/Falso/No lo sé).

- ¿En qué año se estima la extinción de los osos polares?: a) 2030; b) 2040; c) 2050. (Tipo test) (modificada de Hamilton 2008) (Verdadero/Falso/No lo sé).

- El nivel del mar ascenderá unos 6 metros, quedando inundadas las zonas costeras. (Verdadero/Falso/No lo sé). (Hamilton., 2008).

- El hielo del polo norte quedará completamente descongelado. (Verdadero/Falso/No lo sé). (Hamilton., 2008).

JUSTIFICACIÓN

Con esta encuesta se pretende identificar parte de las carencias de conocimientos en geología con las que la población de habla hispana termina la educación obligatoria. Tener una formación básica en geología es esencial para que los actos de la población sean mucho más sostenibles. Localizando los focos de población y los conceptos de alfabetización oceánica en los que la población está más desinformada, permitirá elaborar situaciones de aprendizaje más específicas para paliar estas carencias educativas en la educación obligatoria.

REFERENCIAS

Costa, S., & Caldeira, R. (2018): Bibliometric analysis of ocean literacy: An underrated term in the scientific literature. *Marine Policy*, *87*, 149–157. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.10.022

Ditlevsen, P., & Ditlevsen, S. (2023): Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w

Guest, H., Lotze, H. K., & Wallace, D. (2015): Youth and the sea: Ocean literacy in Nova Scotia, Canada. *Marine Policy*, *58*, 98–107. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.04.007

Hamilton, L. C. (2015): Polar facts in the age of polarization. *Polar Geography*, *38*(2), 89–106. https://doi.org/10.1080/1088937X.2015.1051158

Koulouri, P., Mogias, A., Mokos, M., Cheimonopoulou, M., Realdon, G., Boubonari, T., Previati, M., Formoso, A. T., Kideys, A. E., Hassaan, M. A., Patti, P., Korfiatis, K., Fabris, S., & Juan, X. (2022): Ocean Literacy across the Mediterranean Sea basin: Evaluating Middle School Students' Knowledge, Attitudes, and Behaviour towards Ocean Sciences Issues. *Mediterranean Marine Science*, *23*(2), 289–301. https://doi.org/10.12681/mms.26797

Masson-Delmotte, V. et al. IPCC. (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press, 2021).

Una propuesta para la educación en ODS mediante Casos Simulados CTS, aplicada a la formación inicial del profesorado de Secundaria.

A proposal for education on SDGs through Simulated CTS Cases, applied to initial training of secondary school teachers.

M. Martín Gordillo[1], M. Herrero Vázquez[1] y M. A. Fernández González[2]

1 Departamento de Ciencias de la Educación, Universidad de Oviedo. C/ Aniceto Sela s/n, 33005 Oviedo. martinmariano@uniovi.es, herreromonica@uniovi.es
2 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo. mafernandez@uniovi.es

Palabras clave: casos simulados, educación CTS, formación profesorado, educación secundaria, ODS.

Resumen

En el contexto del *Máster Universitario en Formación del Profesorado de ESO, Bachillerato y FP* de la Universidad de Oviedo, se desarrolla una investigación docente con el objetivo de conocer cómo, la participación en un Caso Simulado Ciencia-Tecnología-Sociedad (CTS) adaptado a entornos híbridos de aprendizaje, puede favorecer la Educación para la Sostenibilidad, los objetivos de aprendizaje de los ODS y la Educación para la Participación. Puesto que no es posible alcanzar tales objetivos en espacios de aprendizaje cerrados, basados en una disciplinariedad rígida de la enseñanza (Fernández Enguita, 2018) y, tal como proponen Martín Gordillo y Osorio (2003), se procura reenfocar espacios y tiempos curriculares para la interacción participativa, flexible, abierta y multidireccional en las prácticas reales de enseñanza.

Se eligió un Caso Simulado que discute la pertinencia de explotar un recurso geológico en una zona de alto valor ecológico, fuertemente relacionado con contenidos curriculares de Geología, pero también con un marcado perfil social. Este escenario es óptimo para abrir una controversia ficticia pero verosímil, que suscita polémica y favorece la adquisición de las competencias clave para la sostenibilidad. Los resultados de la investigación muestran que se facilitó no solo aprendizajes científico-tecnológicos, sino también otros socioculturales relacionados con el aprendizaje de los ODS.

Abstract

In the context of the Master's Degree in Secondary Education Teacher Training, High School, and Vocational Training at the University of Oviedo, a teaching research is being conducted with the aim of understanding how, participation in a Simulated Science-Technology-Society (STS) Case adapted to hybrid learning environments, can promote Education for Sustainability, the learning objectives of the SDGs, and Education for Participation. Since it is not possible to achieve such objectives in closed learning spaces, based on rigid disciplinary teaching (Fernández Enguita, 2018), and as proposed by Martín Gordillo and Osorio (2003), efforts are made to refocus curricular spaces and times for participative, flexible, open, and multidirectional interaction in real teaching practices.

A Simulated Case that discusses the relevance of exploiting a geological resource in an area of high ecological value was chosen, strongly related to Geological curriculum content, but also with a marked social profile. This scenario is optimal for opening a fictional but plausible controversy that arouses debate and promotes the acquisition of key competencies for sustainability. The research results show that not only scientific-technological learning was facilitated, but also other sociocultural learnings related to the SDGs.

Referencias

Fernández Enguita, M. (2018). *Más escuela y menos aula. La innovación en la perspectiva de un cambio de época*. Morata, Madrid, 204 p.

Martín Gordillo, M. y Osorio, C. (2003). *Revista Iberoamericana de Educación* 32, 165-210.

¿Te unes a “Aina y la Comunidad del Martillo” para salvar la geodiversidad del Planeta?

Will you join "Aina and the Hammer Community" to save the Planet's geodiversity?

R. Martín-Banda[1,2], B. Martínez-García[2], A. Ruíz-Constán[2,3], D. Sanz-Pérez[2,4], M. Chamizo-Borreguero[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España, Plaza España, S/n, 41013 Sevilla. r.martin@igme.es
2 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
3 Instituto Geológico y Minero de España, Urbanización Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es
4 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. dasanz01@ucm.es

Palabras clave: metodología didáctica, divulgación, educación, Ciencias de la Tierra, videojuego.

Resumen

"Aina y la Comunidad del Martillo" es un videojuego en formato aventura gráfica de temática geológica creado por la Comisión Mujeres y Geología de la Sociedad Geológica de España (SGE) en 2023 y enmarcado en el proyecto Geolodía. Es un claro ejemplo de una actividad de Aprendizaje Basado en el Juego para complementar la enseñanza formal de Ciencias de la Tierra y, a la vez, es un recurso divulgativo para el público general. La protagonista es una joven geóloga que debe detener a una malvada corporación que quiere destruir 16 Lugares de Interés Geológico internacionales. Para protegerlos contará con la ayuda de las comisiones de la SGE que le aportarán información teórica para superar las pruebas. El juego busca generar referentes femeninos con Aina como protagonista, así como fomentar la inclusión transformando todo el texto escrito (diálogos y teoría) en audios. Dividido en tres recorridos, consta de 16 misiones en las que hay que superar preguntas multirrespuesta, pruebas de diversa índole acompañadas de apartados teóricos y 15 preguntas multirrespuesta finales elegidas al azar de una batería de 240. Tanto las pruebas como los apartados teóricos abarcan todas las disciplinas geológicas y se han adaptado al nivel curricular de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato. La cuidada historia y dinámica de juego, junto al rigor científico y sencillez de las explicaciones, han permitido una buena acogida por parte del público objetivo. Este videojuego cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Abstract

"Aina and the Community of the Hammer" is a video game in graphic adventure format with a geological theme created by the Women and Geology Commission of the Geological Society of Spain (GSS) in 2023 and framed in the *Geolodía* project. It is a clear example of a Game-Based Learning activity to complement the formal teaching of Earth Sciences and, at the same time, it is an outreach resource for the general public. The protagonist is a young female geologist who has to stop an evil corporation that wants to destroy 16 international Geological Heritage Sites. To protect them, she will have the help of the GSS commissions that will provide her with theoretical information to pass the tests. The game aims to generate female references, as well as to promote inclusion by transforming all the written text into audios. Divided into three paths, it consists of 16 missions in which you have to pass multi-answer questions, tests of different types accompanied by theoretical sections and 15 final multi-answer questions chosen at random from a battery of 240 questions. Both, tests and theoretical sections cover all geological disciplines and have been adapted to the curriculum level of Obligatory Secondary Education and High School. The careful story and dynamics of the game, together with the scientific rigour and simplicity of the explanations, have been well received by the target audience. This video game has the collaboration of the Spanish Foundation for Science and Technology - Ministry of Science, Innovation and Universities.

Pedaladas geológicas a través de las ondas de radio

Geological pedals through radio waves

B. Martínez-García[1,2], D. Ampuero[3], G. Da Cuña[3] y M. Chamizo-Borreguero[1]

1 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
2 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
3 Tablero Deportivo, Radio Nacional de España. Estudios de Prado del Rey, Avenida de Radio Televisión 4, 28223 Pozuelo de Alarcón, Madrid.

Palabras clave: Vuelta Ciclista a España, Radio Nacional de España, geodiversidad

Resumen

La Vuelta Ciclista a España es uno de los acontecimientos deportivos del año. Al ser una de las tres grandes rondas del ciclismo mundial, su impacto ha transcendido el ámbito deportivo llegando a convertirse en un fantástico escaparate turístico de nuestro país, mostrando su riqueza cultural y, sobre todo, paisajística a nivel internacional. Y, puesto que el paisaje depende directamente de la historia geológica, esta prueba deportiva se ha empleado como una potente herramienta de divulgación de las Ciencias de la Tierra desde 2016 (https://boletingea.wordpress.com/2018/04/20/geologia-a-golpe-de-pedal/). Debido a que mucha gente sigue el recorrido de La Vuelta Ciclista a España a través de la radio, la Comisión Mujeres y Geología inició en 2021 una colaboración con el programa Tablero Deportivo de Radio Nacional de España consistente en realizar un pequeño diálogo con el locutor, de menos de dos minutos de duración por cada etapa, contando algunas curiosidades geológicas de las zonas que atraviesan los ciclistas, relacionándolas con ciertos aspectos importantes que pueden determinar el desenlace de dicha etapa. Así, en las tres ediciones en las que se ha mantenido la colaboración, se ha participado en 46 etapas en las que se ha hablado de aspectos tales como la descripción de las rocas ornamentales utilizadas en la construcción de edificios históricos, la formación de los grandes relieves que atraviesan los deportistas, la importancia del aprovechamiento de recursos minerales para el desarrollo social de ciertas localidades o la presencia de yacimientos fósiles destacables a nivel mundial. De esta manera, gracias a estas pequeñas píldoras informativas miles de personas adquieren conocimientos geológicos básicos y despiertan su curiosidad por las Ciencias de la Tierra y la geodiversidad de nuestro país.

Abstract

"La Vuelta Ciclista a España" is one of the sporting events of the year. Being one of the three great rounds of world cycling, its impact has transcended the sporting field, becoming a fantastic tourist showcase for our country, showing its cultural and, above all, landscape richness at an international level. And, since the landscape depends directly on the geological history, this sporting event has been used as a powerful tool for disseminating Earth Sciences since 2016 (https://boletingea.wordpress.com/2018/04/20/geologia-a-golpe-de-pedal/). Because many people follow the route of "La Vuelta Ciclista a España" through the radio, the Women and Geology Commission began a collaboration in 2021 with the Tablero Deportivo program on Radio Nacional de España consisting of carrying out a short dialogue with the commentator, lasting less than two minutes for each stage, telling some geological curiosities of the areas that the cyclists cross, relating them to certain important aspects that can determine the outcome of said stage. Thus, in the three editions in which the collaboration has been maintained, the Women and Geology Commission have participated in 46 stages in which aspects such as the description of the ornamental rocks used in the construction of historical buildings, the formation of the great reliefs that cyclists cross, the importance of the use of mineral resources for the social development of certain localities or the presence of globally notable fossil deposits have been discussed. In this way, thanks to these small informative pills, thousands of people acquire basic geological knowledge and awaken their curiosity about Earth Sciences and the geodiversity of our country.

La Geología en la cultura popular, una nueva herramienta de divulgación.

Geology in popular culture, a new dissemination tool.

B. Martínez-García[1], E. Díaz-Losada[2], D. Ponce de León-Gil[3] y A. Romero-Prados[2]

1 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), c/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. elisabeth.diaz@igme.es, a.romero@igme.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), c/ La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. d.poncedeleon@igme.es

Palabras clave: Geología y sociedad, cultura popular, divulgación inclusiva.

Resumen

La Geología está en todo lo que nos rodea, hasta el punto de que la humanidad depende completamente del planeta para poder desarrollarse y subsistir. Pero vivimos en un mundo dinámico cuyo poder puede mostrarse en superficie en forma de grandes eventos geológicos, como volcanes o terremotos, que nos afectan de manera directa, despertando nuestra curiosidad y nuestros más profundos temores. Incluso, estas fuerzas geológicas llegan a formar parte de la cultura popular. Por este motivo, la Unidad de Cultura Científica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) decidió evaluar el rigor científico presente en parte de nuestro folclore, así como la idoneidad de su uso como herramienta docente y divulgativa de las Ciencias de la Tierra, tanto para el profesorado preuniversitario como para el público en general. Para ello, organizó un ciclo de 5 charlas en el marco de la Semana de la Ciencia y la Innovación de Madrid del año 2023 analizando la Geología presente en los siguientes ámbitos culturales: 1) grandes clásicos de la literatura fantástica y de terror; 2) canciones de estilos hard rock y heavy metal; 3) videojuegos; 4) series de animación japonesas; y 5) mitos, leyendas y acontecimientos históricos que han marcado el auge y caída de antiguas civilizaciones. Además, para llegar a un público muy diverso, estas conferencias contaron con una traducción simultánea a lengua de signos española y han sido grabadas y subtituladas, para permitir su visionado en el canal de YouTube del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Utilizar este tipo de ejemplos de la cultura popular permite acercar la Geología a un público más amplio, variado y diverso, que abarca desde gente joven hasta jubilada, de manera amena y divertida.

Abstract

Geology is in everything that surrounds us, to the point that humanity completely depends on the planet to be able to develop and subsist. But we live in a dynamic world whose power can be shown on the surface in the form of large geological events, such as volcanoes or earthquakes, that affect us directly, awakening our curiosity and our deepest fears. These geological forces even become part of popular culture. For this reason, the Scientific Culture Unit of the Geological and Mining Institute of Spain (IGME-CSIC) decided to evaluate the scientific rigor presents in part of our folklore, as well as the suitability of its use as a teaching and outreach tool of the Earth Sciences, both for pre-university teachers and for the general public. To this end, it organized a cycle of 5 talks within the framework of the Madrid Science and Innovation Week in 2023 analysing the Geology present in the following cultural areas: 1) great classics of fantasy and horror literature; 2) songs of hard rock and heavy metal styles; 3) video games; 4) Japanese animated series; and 5) myths, legends and historical events that have marked the rise and fall of ancient civilizations. Furthermore, in order to reach a very diverse audience, these conferences were simultaneously translated into Spanish sign language and recorded and subtitled for viewing on the YouTube channel of the Mining Institute of Spain (IGME-CSIC). Using this type of examples from popular culture allows us to bring Geology closer to a broader, more varied and diverse audience, from young people to retired ones, in an entertaining and fun way.

Acepta el "Desafío en el Trans-Iberiano" para aprender geología

Accept the "Trans-Iberian Challenge" to learn geology

B. Martínez-García[1,2] y A. Ruiz-Constán[1,3]

1 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, 37008, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
2 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
3 Instituto Geológico y Minero de España, Urbanización Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es

Palabras clave: videojuegos científicos, historia geológica, Península Ibérica, aprendizaje lúdico.

Resumen

El aprendizaje lúdico es muy demandado por el público infantil y juvenil, ya que se centra en superar retos a la vez que se aprende ciencia. Esta aproximación a la ciencia fomenta que la perciban como cercana, útil y entretenida. Además, los juegos didácticos suponen una excelente herramienta para el profesorado preuniversitario, pudiendo utilizarlos como complemento de los currículos docentes en las asignaturas científicas. Por estos motivos, en 2021 la Comisión Mujeres y Geología desarrolló "Desafío en el Trans-Iberiano", un videojuego en formato *breakout* orientado al alumnado de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato, incluido dentro del proyecto Geolodía (https://sociedadgeologica.org/transiberiano/). El marco en el que se desarrolla el juego es una historia de tipo aventura gráfica protagonizada por dos adolescentes durante su viaje de estudios. En el viaje ocurren una serie de incidentes que les llevarán a ayudar a una misteriosa geóloga con su investigación. En el juego se trabajan conceptos geológicos básicos mientras se recorre la historia geológica de la península ibérica en 6 misiones relacionadas con: 1) Macizo Ibérico, 2) Pirineos y Cuenca Vasco-Cantábrica, 3) cordilleras Costero Catalana e Ibérica, 4) cuencas cenozoicas, 5) cordillera Bética, y 6) vulcanismo neógeno. La dinámica del juego consiste en intercalar pequeñas explicaciones teóricas (texto o vídeos cortos) con pruebas que se deberán superar para obtener un código numérico al final de cada misión. Estas características han convertido "Desafío en el Trans-Iberiano" en un material divulgativo de ciencias de la tierra muy útil tanto para profesorado preuniversitario como para público general. Este videojuego cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Abstract

Playful learning is highly demanded by children and young people, since it focuses on overcoming challenges while learning science. This approach to science encourages it to be perceived as close, useful and entertaining. Furthermore, educational games are an excellent tool for pre-university teachers, and can be used as a complement to teaching curricula in scientific subjects. For these reasons, in 2021 the Women and Geology Commission developed "Desafío en el Trans-Iberiano", a video game in "breakout" format aimed at Compulsory Secondary Education and Baccalaureate students, included within the Geolodía project (https://sociedadgeologica.org/transiberiano/). The framework in which the game takes place is a graphic adventure type story starring two teenagers during their study trip. On the trip a series of incidents occur that will lead them to help a mysterious geologist with her research. In the game, basic geological concepts are worked on while exploring the geological history of the iberian peninsula in 6 missions related to: 1) Iberian Massif, 2) Pyrenees and the Basque-Cantabrian Basin, 3) Catalan and Iberian Coastal mountain ranges, 4) cenozoic basins, 5) Betic mountain range, and 6) neogene volcanism. The dynamic of the game consists of interspersing small theoretical explanations (text or short videos) with tests that must be passed to obtain a numerical code at the end of each mission. These characteristics have turned "Desafío en el Trans-Iberiano" into a very useful earth sciences informative material for both pre-university teachers and general public. This video game has the collaboration of the Spanish Foundation for Science and Technology - Ministry of Science, Innovation and Universities.

Geocharlas online. Divulgando geología desde YouTube

Geocharlas online. Outreach geology from YouTube

B. Martínez-García[1,2], A. Ruiz-Constán[1,3], D. Sanz-Pérez[1,4,5], M. Chamizo-Borreguero[1] y R. Martín-Banda[1,6]

1 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
2 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
3 CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Urbanización Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es
4 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. dasanz01@ucm.es
5 Departamento de Geología Sedimentaria y Cambio Ambiental, Instituto de Geociencias (IGEO-UCM), 28040 Madrid.
6 CN Instituto Geológico y Minero de España, Plaza España, S/n, 41013 Sevilla. r.martin@igme.es

Palabras clave: vídeos geológicos, material didáctico virtual, YouTube, redes sociales

Resumen

En 2021, cuando aún se mantenían restricciones debido a la pandemia de COVID-19 en los centros educativos, la Comisión Mujeres y Geología decidió poner en marcha la iniciativa "Geocharlas online", asociada al proyecto Geolodía. El objetivo era aportar un material didáctico virtual de índole geológica que pudiera ser empleado por el profesorado preuniversitario como una herramienta educativa complementaria. Esta iniciativa consiste en la edición de vídeos cortos, de unos 10 minutos de duración, donde especialistas en diversas disciplinas geológicas explican, de manera amena y divulgativa, aspectos relativos a temáticas de máximo interés social (p. ej. cambio climático, recursos naturales o riesgos geológicos). En esa primera edición se prepararon 9 vídeos que tuvieron una gran acogida. Así, en 2022 se editaron 5 vídeos más y, en 2023, otros 7. Estos vídeos se encuentran alojados en el canal de YouTube de la Sociedad Geológica de España en tres listas de reproducción (Geocharlas online 21, Geocharlas online 22 y Geocharlas online 23) y, hasta la fecha, han superado las 12.000 visualizaciones, números que seguirán aumentando ya que están disponibles de manera gratuita para el público interesado. Estos resultados ponen de manifiesto la idoneidad de la creación de vídeos cortos sobre temas geológicos como materiales divulgativos para el estudiantado preuniversitario y el público en general. Geocharlas online cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Abstract

In 2021, when restrictions were still in place due to the COVID-19 pandemic in educational centres, the Women and Geology Commission decided to launch the "Geocharlas online" initiative, associated with the Geolodía project. The objective was to provide virtual teaching material of a geological nature that could be used by pre-university teachers as a complementary educational tool. This initiative consists of the editing of short videos, about 10 minutes long, where specialists in various geological disciplines explain, in an entertaining and informative manner, aspects related to topics of maximum social interest (e.g. climate change, natural resources or geological risks). In that first edition, 9 videos were prepared that were very well received. Thus, in 2022, 5 more videos were edited and, in 2023, another 7. These videos are hosted on the YouTube channel of the Geological Society of Spain in three playlists (Geocharlas online 21, Geocharlas online 22 and Geocharlas online 23) and, to date, they have exceeded 12,000 views, numbers that will continue to increase since they are available free of charge to the interested public. These results highlight the suitability of creating short videos on geological topics as informative materials for pre-university students and the general public. Geocharlas online has the collaboration of the Spanish Foundation for Science and Technology - Ministry of Science, Innovation and Universities.

Divulgación y enseñanza en la Litoteca de Sondeos

Divulgation and teaching in Drilling Lithoteque

C. Molina[1], J. González[1], J.J. Muñoz[1], A. Martínez[1] y M.T. López[2]

1 Litoteca de Sondeos, CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Polígono La Papelera s/n, 14200 Peñarroya-Pueblonuevo, Córdoba. c.molina@igme.es: j.gonzalez@igme.es; jj.munoz@igme.es; alvaro.martinez@igme.es
2 CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Ríos Rosas, 24, 28003, Madrid. m.lopez@igme.es

Palabras clave: litoteca, divulgación, sondeo, geología, recursos minerales.

Resumen

La preservación y catalogación del valioso material pétreo procedente del subsuelo y de toda la información generada en su estudio, es la principal misión de la Litoteca de Sondeos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). El objetivo es proporcionar el acceso al material a entes públicos y privados, con el fin de mejorar y actualizar el conocimiento geológico y minero del país.

El centro ha experimentado durante los últimos años, un avance continuo tanto en la adquisición de nuevas tecnologías como en las labores de divulgación alineadas con las actividades desarrolladas en la infraestructura. Estas acciones divulgativas se articulan en la acogida de visitantes ya sea mediante solicitud expresa o en Jornadas de Puertas Abiertas, con un público que incluye, desde asociaciones, familias y colegios de educación infantil y primaria hasta institutos de educación secundaria e instituciones de educación superior. En función del tipo de asistentes, se adapta el discurso y la presentación a cada tipo de perfil, teniendo en cuenta sus necesidades e inquietudes, siempre con el propósito común de divulgar, informar y despertar la curiosidad en las Ciencias de la Tierra.

Durante el año 2023, un total de 250 personas accedieron a las instalaciones de la Litoteca a través de visitas guiadas. Esto se traduce en un incremento de la demanda del 76 % de estas actividades.

Este centro singular, ubicado en una zona rural alejada de grandes urbes, pretende acercar la ciencia de una forma amena, didáctica y accesible a distintos ámbitos de la sociedad, poniendo en valor toda la cadena de investigación realizada para el aprovechamiento de los recursos minerales, la importancia de su adecuada conservación y su trascendencia para llevar a cabo una gestión sostenible del territorio.

Abstract

Preservation and classification of valuable stone material from the subsoil and their related information are the main mission of the Drilling Lithoteque of the Geological and Mining Institute of Spain (IGME, CSIC). The main objective is provide access to the material to public and private entities, in order to improve and update the geological and mining knowledge of the country.

In recent years, the center has experienced continuous progress in both the acquisition of new technologies and dissemination of the activities developed on the infrastructure. These constructive actions are articulated around the reception of visitors either by express request and in open days. The public attending the repository range from associations families and primary schools, to secondary education institutes and higher education institutions. According to the level of attendees, the speech and presentation is adapted to each profile, considering their needs and concerns, always with the common purpose of disseminating, teaching and awakening curiosity in the Earth Sciences.

Along the year 2023, a sum of 250 people accessed the Lithoteque facilities through guided visits. This translates into a 76 % increase in demand for these activities.

This unique center, located in a rustic area far from big cities, aims to bring science closer to several areas of society in a enjoyable, educational and accessible way, highlighting the entire chain of research carried out for the exploitation of mineral resources, the importance of their proper preservation and its significance to carry out sustainable management of the territory.

Presentación de "Reconstruyendo el Autuniense", un proyecto para generar recursos didácticos y de divulgación de la Geología para el curso 2024-25

Introduction of "Reconstructing the Autunian", a project to generate Geology pedagogical and outreach resources for the course 2024-25

M.B. Muñoz-García[1,2], A. García-Frank[2]

1 Museo de la Geología, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. mbmunoz@ucm.es
2 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. agfrank@ucm.es

Palabras clave: paleoarte, concurso, proyecto docente, educación reglada, público general

Resumen

Desde el museo y las colecciones de la Facultad de Ciencias Geológicas presentamos el proyecto de preparar un concurso de paleoarte para estudiantes de educación primaria, secundaria, universitaria y público general. Estas propuestas de divulgación basadas en los fósiles suelen tener buena acogida y pueden servir para acercar recursos pedagógicos de calidad sobre otras facetas de la Geología a todo tipo de público con el objetivo último de dar a conocer la amplitud de enfoques y disciplinas de esta ciencia.

La idea del concurso parte de una postal que se encuentra expuesta en el Museo de la Geología y que está decolorada por el paso de los años. Fue comprada por Carmina Virgili en Autun (Francia) hacia el año 1960 y recrea un paisaje del Autuniense. El proyecto consiste en generar varias publicaciones con distintos tipos de información geológica sobre el Autuniense: qué es, para qué se usa el término, qué sabemos de este periodo, cómo eran los continentes, el clima, el paisaje y qué tipo de organismos vivían.

Los materiales pedagógicos se publicarán en redes sociales a lo largo del curso 2024-2025 y tendrán varios niveles para que puedan ser utilizados por público de todo tipo, tanto para divulgación como para enseñanza reglada de educación primaria y secundaria.

El proyecto finalizará con un concurso de paleoarte (dibujo o diorama) que tendrá lugar a final del curso 2024-25 en el que se valorará especialmente la utilización de los conocimientos geológicos adquiridos a lo largo de las publicaciones del curso.

Abstract

The museum and collections of the Geological Sciences Faculty introduce a project to prepare a paleoart competition for general public and students of all ages. These dissemination activities based on fossils are usually well received and they can be useful to provide to all kind of public with pedagogical resources of high quality about different aspects of Geology with the final aim of outspreading the wide variety of disciplines withing the Geological Sciences.

The idea of the competition was born from a postcard exhibited in the museum that shows an Autunian landscape. It was bought by Carmina Virgili in Autun (France) around 1960 and is now in a bad condition. The project consists in generating publications about different geological aspects of the Autunian: what is it, why do we use that term, what is known about it, what were the continents and the climate like during that period, and what kind of organisms lived then.

The resources will be published in social media and will be designed with different reading levels, in order to be useful for dissemination but also for ruled teaching in primary and secondary school.

The project will finish with a paleoart contest (drawing or diorama) that will take place towards the end of the academic course 2024-25 in which the inclusion of the geological knowledge acquired during the course will be specially valued.

Divulgando la problemática del uso de combustibles fósiles mediante un mensaje científico y artístico construido a partir de las Minas de carbón de Villarroya.

Disseminating the problems of the use of fossil fuels through an artistic and scientific message built from the Villarroya coal mines.

L. Otaño[1], C. Laplana[2], M. A. Galindo-Pellicena[3], D. Fernández[4], C. Hierro[1], C. Ezquerro[1], P. Vallés[1], F. Ezquerro[1], J. Garrido[1], A. Martínez[1], C. Martínez[5], P. Calvo[1], S. Pérez[1], A. Muñoz†[6], E. L. Pueyo[7]

1 Asociación de Amigos de Villarroya, c/ Capellanía 19, 26587 Villarroya, La Rioja luis.otano@unirioja.es
2 Museo Arqueológico y Paleontológico de la Comunidad de Madrid. Pza. Bernardas s/n, 28801 Alcalá de Henares, Madrid.
3 Centro Mixto UCM-ISCIII de Evolución y Comportamiento Humanos, C/Monforte de Lemos 5, 28029 Madrid.
4 Casa de las Ciencias de Logroño, c/ del Ebro nº 9, 26009 Logroño, La Rioja. dfernandez@logrono.es
5 Ayuntamiento de Villarroya, c/ Iglesia 2, 26587 Villarroya, La Rioja.
6 Área de Estratigrafía. Dpto Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza, c/ Pedro Cerbuna nº 12, 50009 Zaragoza.
7 IGME-CSIC, Unidad de Zaragoza. Campus Aula Dei, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. unaim@igme.es

Resumen: "Minas de carbón de Villarroya, combustibles fósiles y cambio climático" es un proyecto de divulgación de la problemática que causa el uso de combustibles fósiles. El proyecto relaciona la extracción y uso de los combustibles fósiles con el cambio climático. El proyecto es innovador desde un punto de vista metodológico porque se fundamenta en la divulgación mediante mensajes artísticos complementados con mensajes científicos, principalmente en forma de fotografías y dibujos, relacionados con la excepcional historia de la relación del pueblo español de Villarroya con sus minas de carbón. La Asociación de Amigos de Villarroya ha iniciado el proyecto con la ayuda del Ayuntamiento de Villarroya y la Fundación la Caixa. El trabajo divulgativo se basa en la realización de exposiciones en España, siendo la Casa de las Ciencias de Logroño del Ayuntamiento de Logroño el espacio que ha tenido mayor repercusión en cuanto a la divulgación científica.

Palabras clave: Villarroya, divulgación, minas de carbón, combustibles fósiles, cambio climático.

Abstract: *"Villarroya coal mines, fossil fuels and climate change" is a project to disseminate the climate problems caused by the use of fossil fuels. The project relates the extraction and use of fossil fuels to Climate Change. The project is innovative from a methodological point of view because it is based on dissemination through artistic messages complemented with scientific messages, mainly in the form of photographs and drawings, related to the exceptional history of the relationship of the spanish town of Villarroya with its coal mines. The project has been launched by the Association of Friends of Villarroya in collaboration with the Villarroya City Council and the La Caixa Foundation. The informative work is based on holding exhibitions in Spain, with the Casa de las Ciencias de Logroño of the Logroño´s Coucil being the space that has had the greatest impact on scientific dissemination.*

Key words: *Villarroya, dissemination, coal mines, fossil fuels, climatic change.*

INTRODUCCIÓN

Villarroya es una localidad riojana excepcionalmente rica en patrimonio geológico. Varios Lugares de Interés Geológico (LIG) se sitúan en el término municipal y sus cercanías.

En Villarroya hay presencia de capas con carbón de tipo lignito. El marco geológico en el que aparece el carbón de Villarroya son las facies Escucha que se sitúan en el Cabalgamiento de Cameros (IELIG IB004). Por encima son cabalgadas por calizas de facies de Cortes de Tajuña, que presentan cierta rigidez estructural. Las facies Escucha de Villarroya constan de conglomerados, arenas, lutitas y capas de carbón (Durantez et al. 1982), que no presentan gran resistencia estructural.

El interés por la explotación del carbón de Villarroya comienza en el año 1857. A lo largo del tiempo se van simultaneando y sucediendo varias explotaciones de carbón en su término municipal hasta que la última mina es cerrada en el año 1968. Esto convierte a Villarroya en un pueblo minero del carbón. Durante los momentos en los que se produce la explotación de carbón y debido al impulso de este combustible fósil, el pueblo de Villarroya crece, la vida de sus gentes es más fácil y el pueblo es un lugar próspero que recibe a nuevos trabajadores y nuevas familias se establecen constantemente. El final de la explotación de carbón en Villarroya supone la práctica desaparición del pueblo en los años 70 y 80 del s. XX. Esto puede ser común a lo sucedido en otros pueblos mineros del carbón en España, pero de forma excepcional para Villarroya, la finalización de la extracción de carbón no es debida al agotamiento de este recurso no renovable. En Villarroya la explotación de carbón provoca un problema específico de esta localidad y es que el carbón es extraído de debajo de las casas del pueblo y el vaciado de este espacio del subsuelo provoca la aparición de

grietas en el terreno, en las casas y su consiguiente derrumbamiento. Sin ni siquiera llegar a la situación de agotamiento o de no rentabilidad en la extracción de carbón, el pueblo de Villarroya acaba resultando destruido por este combustible fósil.

La historia de Villarroya permite realizar un símil de gran interés para la divulgación de la problemática actual que los combustibles fósiles están provocando a nivel mundial. El símil empleado en este proyecto relaciona las causas y consecuencias del uso de combustibles fósiles a nivel local acaecidas en el pueblo de Villarroya con la problemática que estos combustibles fósiles provocan a nivel internacional (Tabla I).

CONCEPTO	NIVEL LOCAL	NIVEL MUNDIAL
Crecimiento causado por los combustibles fósiles	Extracción de carbón por empresas mineras	Disponibilidad de energía mediante combustibles fósiles
Desencadenante inicial de la problemática	Galerías y extracción de carbón bajo el pueblo que provocan el hundimiento de casas	Cambio climático
Efecto secundario de la problemática	Cierre de las explotaciones mineras	Prohibición o agotamiento de los combustibles fósiles
Consecuencia final de la problemática	Destrucción y abandono del pueblo	Reflexión sobre el futuro

TABLA I. *Relación entre el nivel local y el nivel mundial de causas y consecuencias del uso de combustibles fósiles.*

Partiendo de esta idea inicial se ha contado con el trabajo de artistas y científicos que mediante el dibujo y la fotografía han realizado obras que se enmarcan en distintos aspectos de la idea planteada y cuyo fin es que mediante su exposición al público generen una reflexión en cuanto a la problemática del uso de combustibles fósiles y el cambio climático.

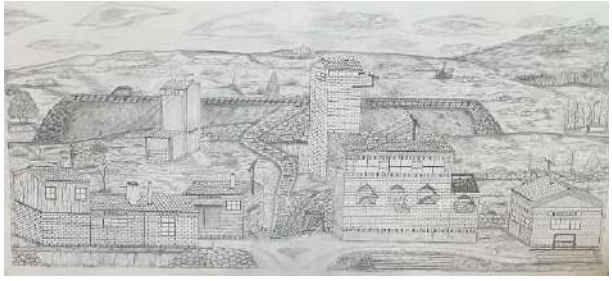


FIGURA 1. *"Mina la Abundante". Dibujo, lápiz sobre papel, 40 x 90 cm. Autor: Jesús Garrido Tomás.*

La Asociación de Amigos de Villarroya ha organizado el proyecto contando con la colaboración del Ayuntamiento de Villarroya y la Fundación La Caixa.

DATOS Y RESULTADOS

Ya que el proyecto se basa en la divulgación mediante imágenes, artísticas o científicas, se ha propuesto a los autores realizar 4 trabajos con temática orientada y a niños de entre 2 y 12 años que realicen 1 o 2 trabajos cada uno (Tabla II y Fig. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Todos los autores, y los niños, además, están relacionados con la localidad de Villarroya.

AUTOR	PUNTO DE VISTA	MÉTODO
Jesús Garrido Tomás	Grandes infraestructuras mineras que existieron en Villarroya	Dibujo
Carlos Ezquerro Palacios	La destrucción del pueblo	Fotografía
Pedro Vallés Turmo	Estado actual de las minas tras su cierre. Patrimonio Geológico.	Fotografía
Fernando Ezquerro Palacios	La problemática mundial del Cambio Climático	Fotografía
Arsenio Muñoz Jiménez	Los científicos estudian el Cambio Climático. Cuenca Pliocuaternaria de Villarroya	Fotografía
Carmen Hierro Miquel	Reflexiones simbólicas sobre el Cambio Climático	Fotografía
15 niños	Minas de carbón de Villarroya	Pintura

TABLA II. *Temática propuesta a los autores.*

Para la preparación, disposición, diseño y montaje de las imágenes se cuenta con una Comisaria para las exposiciones, que en este caso es la también autora Carmen Hierro. El mensaje por transmitir se ha previsto según una serie de características relacionadas con el estilo y secuencia de disposición de las obras.



FIGURA 2. *"El reloj de sol no se paró". Diapositiva, impresión digital, 60 x 40 cm. Autor Carlos Ezquerro Palacios.*

El valor artístico de las obras creadas para el proyecto es alto, por ej.: "El nido del olvido" de la autora Carmen Hierro (Fig. 10), ha sido una de las 40 obras seleccionadas en el XXVI Premio de Artes Plásticas Sala el Brocense en 2023 (González et al., 2024) de entre más de 1000 obras presentadas a dicho certamen artístico de gran prestigio a nivel nacional.

Las exposiciones se han realizado durante el año 2023 y 2024 y han recorrido la región de La Rioja (Villarroya, Grávalos, Haro y Logroño). A nivel nacional se ha realizado una exposición en Madrid.



FIGURA 3. *"42.136535, -2.074602". Fotografía, impresión digital, 40 x 60 cm. Autor Pedro Vallés Turmo.*



FIGURA 4. *"Hnausapollur". (Islandia, 2013). Fotografía, impresión digital, 30 x 90 cm. Autor Fernando Ezquerro Palacios.*

La afluencia de público contabilizado es diversa (Tabla III).

EXPOSICIÓN	CARACTERÍSTICAS	AFLUENCIA DE PÚBLICO
Villarroya	Pueblo muy pequeño de la Reserva de la Biosfera de la Rioja	75-100
Grávalos	Pueblo pequeño de la Reserva de la Biosfera de la Rioja	180-200
Madrid	Sala de baja afluencia de público	200-250
Haro	Pueblo de >10000 habitantes de La Rioja	400-450
Logroño	Capital de la Rioja <150000 habitantes	5800-6000

TABLA III. *Afluencia de público a las exposiciones.*

En la exposición en la Casa de las Ciencias de Logroño, la divulgación científica se ha complementado con una muestra de minerales, rocas, objetos y documentos relacionados, y con charlas y visitas guiadas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El proyecto "Minas de carbón de Villarroya, combustibles fósiles y cambio climático" ha permitido:

(1) Transmitir mediante el lenguaje artístico y científico que el cambio climático es el mayor problema al que nuestra sociedad se enfrenta en la actualidad.

(2) Transmitir mediante el lenguaje artístico y científico las lecciones aprendidas en Villarroya respecto de los problemas causados por los combustibles fósiles.

(3) Unir los conceptos de Minas de carbón de Villarroya, combustibles fósiles y Cambio Climático.

(4) Relacionar las Minas de carbón de Villarroya con la cuenca Pliocuaternaria de Villarroya mediante el hilo de conexión entre ambas que es el Cambio Climático.

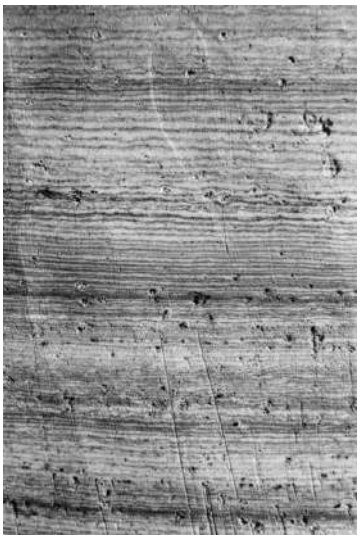


FIGURA 5. *"Varvas del Plioceno de Villarroya". Fotografía ampliada, impresión digital, 60 x 40 cm. Autor Arsenio Muñoz Jiménez.*

(5) Considerar las Minas de carbón de Villarroya como Patrimonio Geológico y Minero de interés a nivel regional y con aspiraciones a presentar importancia a nivel nacional al menos.



FIGURA 6. *"Minas de carbón de Villarroya". Niño de 10 años. Acrílico sobre papel, 30 x 40 cm. Autor Oliver. 2022.*

Como conclusiones podemos apreciar una serie de lecciones aprendidas:

El alcance en cuanto a la población a la que llega el mensaje producido no es muy alto en las exposiciones realizadas ya que se aproxima a unas 7000 personas. Para llegar a sectores de población mayores la exposición presencial es menos eficiente que la grabación de un contenido digital (vídeo, etc.) y su posterior difusión por redes sociales. No obstante, la exposición presencial permite obtener un efecto diferente a cuando se realiza divulgación mediante el empleo de las nuevas tecnologías de la comunicación. Es recomendable realizar grabaciones de las exposiciones del proyecto y realizar su difusión por redes sociales para ampliar el alcance de población a la que se puede transmitir el menaje.



FIGURA 7. *"Minas de carbón de Villarroya". Niña de 5 años. Acrílico sobre papel, 40 x 30 cm. Autora Marian. 2023.*

El mensaje que se pretende transmitir es muy extenso en cuanto a conceptos y relaciones entre los mismos (Tabla I), lo que provoca dificultad por parte de los espectadores para su comprensión. En este sentido, el propio título del proyecto y de las exposiciones es demasiado extenso: "Minas de carbón de Villarroya, combustibles fósiles y cambio climático", habiendo sido frecuentemente simplificado en su transmisión por parte de los espectadores y medios de comunicación quedando como "Minas de carbón de Villarroya".



FIGURA 8. *"Minas de carbón de Villarroya". Niño de 4 años. Rotulador sobre papel, 30 x 40 cm. Autor Víctor. 2022.*

El mensaje que se pretende transmitir resulta complejo por la existencia de múltiples lenguajes de comunicación como son el dibujo, la fotografía realista, la fotografía científica y la fotografía artística simbólica. Conviene reducir los distintos lenguajes empleados en la comunicación para facilitar la comprensión.

El empleo del lenguaje artístico no debe descartarse como herramienta de divulgación. Un efecto propio del empleo del lenguaje artístico es la capacidad de emocionar a los espectadores. Este proyecto también predispone por su contenido a la emoción de los espectadores (un pueblo destruido, familias afectadas sacadas de sus casas, incendios y catástrofes climáticas), por lo que los signos de emoción observados en las exposiciones pueden tener dos orígenes.



FIGURA 9. *"El nido del olvido". De la serie "El penúltimo día". Fotografía, impresión digital, 60 x 40 cm. Autora Carmen Hierro Miquel. Obra seleccionada en el XXVI Premio de Artes Plásticas Sala el Brocense de la diputación de Cáceres en 2023.*

La realización de visitas guiadas y charlas asociadas a las exposiciones mejora notablemente la comprensión del mensaje que se pretende transmitir y puede compensar la excesiva extensión de conceptos y relaciones entre ellos, así como la complejidad introducida por el empleo de distintos lenguajes en la comunicación (Fig. 10).



FIGURA 10. *Exposición en la Casa de las Ciencias de Logroño, complementada con materiales, objetos y documentos en vitrinas.*

REFERENCIAS

Durántez, O., Sole J., Castiella, J., Villalobos, L. (1982): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 281 (Cervera del Río Alhama).* IGME, Madrid.

González A., Díaz, A., Verde, M. (2024): *XXVI Premio de Artes Plásticas Sala El Brocense: Catálogo de obras seleccionadas y exposición.* Diputación de Cáceres, Cáceres, 62 p.

Trabajando en geología por un día: un taller del Museo de la Geología - UCM para estudiantes de primaria

Working in Geology for a day: a workshop for compulsory primary education students in the Museum of Geology - UCM

P. Oviedo[1], M.B. Muñoz-García[1,3], B. Del Moral[2], C. López Martín[1,3], L. González-Acebrón[3], A. García-Frank[3]

1 Museo de la Geología, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. C/ Jose Antonio Nováis 12, 28040 Madrid. poviedo@ucm.es; mbmunoz@ucm.es; cesalo02@ucm.es.
2 Laboratorios Generales, CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), c/La Calera 1, 28760, Tres Cantos, Madrid. b.delmoral@igme.es
3 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. C/ Jose Antonio Nováis 12, 28040, Madrid. lgacebron@ucm.es; agfrank@ucm.es

Resumen: En este trabajo se describe una actividad organizada por el Museo de la Geología - UCM para dar a conocer a estudiantes de primaria la profesión de geólogo/a de una manera lo más amplia y variada posible. Con la intención de que fuera una actividad entretenida y participativa y que combinara el juego y la curiosidad con el aprendizaje, se diseñó un taller aprovechando las colecciones permanentes expuestas en el Museo de la Geología, en la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM (Universidad Complutense de Madrid). Este material se complementó con otros recursos propios adaptados a su edad. Se realizaron dos talleres con niñas y niños de 6 y 11 años durante la Semana de la Ciencia y la Innovación 2023 que tuvieron muy buena acogida. Esta actividad puede ser adaptada fácilmente a otros espacios, como los propios centros educativos.

Palabras clave: divulgación, Semana de la Ciencia, geología y sociedad, patrimonio geológico, orientación.

Abstract: *This work describes an activity organized by the Museum of Geology - UCM to disseminate the geologist profession to primary education students in a broad and varied way. In order to design a participative and fun activity and to combine game and curiosity with learning, a workshop was proposed. It was based on the permanent collection of the Museum of Geology located in the Faculty of Geological Sciences at Complutense University of Madrid. The exposed materials were combined with other resources adapted to the children ages. Two workshops were carried out with children of different ages (6 and 11 years old) during the Science and Innovation Week 2023. Both workshops were well received. This activity can be easily adapted to other spaces, such as the educative centers.*

Key words: *dissemination, Science Week, geology and society, geological heritage, orientation.*

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe una actividad realizada con motivo de la Semana de la Ciencia y la Innovación 2023 de la Comunidad de Madrid en el Museo de la Geología de la Facultad de Ciencias Geológicas - UCM con el fin de dar a conocer la profesión de geólogo/a a estudiantes de Educación Primaria.

Existe una creciente preocupación en el ámbito de la Geología por el desconocimiento de la profesión dentro de la sociedad (Olías et al., 2008). Este desconocimiento puede tener una de sus causas en las escasas referencias a conceptos de Ciencias de la Tierra en los currículos educativos estatales de Educación Secundaria de todas las leyes implementadas desde 1970 hasta 2020 en España (Acedo et al., 2020). Pero el origen es aún anterior puesto que también se ha constatado una escasez similar en los currículos docentes de Educación Primaria (Mampel Laboira y Cortés García, 2012), en los que, además, la mayoría de los contenidos están relacionados con dinosaurios (Pérez-Martín y Esquivel-Martín, 2021), mientras que existe escasísima información sobre Geología aplicada o sobre la utilidad de nuestra profesión para la sociedad en general. Sin embargo, los contenidos de la Educación Primaria sí recogen "las profesiones relacionadas con la ciencia y la tecnología" dentro del bloque de cultura científica (B.O.C.M. Núm. 169, 2022) y la competencia específica de "plantear y dar respuesta a cuestiones científicas sencillas, utilizando diferentes técnicas, instrumentos y modelos propios del pensamiento científico" (LOMLOE, 2020).

Con esto en mente, se ha enfocado este taller para mostrar a los más pequeños la importancia de la Geología en la vida cotidiana y la gran cantidad de ámbitos que abarca, así como los instrumentos y las técnicas de trabajo de esta ciencia.

Para ello, se planificó un taller de dos horas de duración que combinara el juego y la curiosidad con el aprendizaje. Se aprovechó la exposición permanente del

Museo de la Geología - UCM (https://www.ucm.es/museogeo). Este museo fue inaugurado en 2011, con la intención de albergar minerales exclusivamente, pero con el tiempo ha ido reuniendo multitud de piezas cedidas por particulares y departamentos de la facultad. Esto ha concentrado una amplia variedad de fondos que permite dar una idea general del trabajo que se realiza en Geología.

La exposición del museo se complementó con minerales, rocas y fósiles de menor valor patrimonial que pudieran ser manipulados por las y los niños. También se diseñó un "cuaderno de campo" adaptado a su edad que hiciera de guía durante parte del taller.

DESARROLLO DEL TALLER

Se han realizado dos talleres con un total de 70 estudiantes de 1º y 6º de primaria (6 y 11 años respectivamente) coincidiendo con la Semana de la Ciencia y la Innovación (noviembre de 2023).

El taller comienza con una charla de presentación en el museo, en la que el alumnado tiene la oportunidad de compartir las nociones que tienen sobre la Geología, si conocen alguien que se dedique a ella y si saben para qué sirve. Como herramienta para explicar el oficio, se utiliza una mochila de campo de la que se va sacando todo el material habitual mientras se comenta con ellos para qué puede servir: martillo, brújula, lupa, mapa, escala para fotografías, gorro, chaleco reflectante, metro de carpintero... Además, se les hace entrega de su propio material geológico, incluyendo el que necesitarán para la realización del taller (Fig. 1): un chaleco reflectante, una pequeña brújula, una lupa, su propio cuaderno de campo que servirá de base para todas las actividades de campo y un lápiz.



FIGURA 1. Material entregado para realizar el taller (Foto: Gema García Martín).

A partir de este momento la actividad consta de dos partes: una "de campo", que se desarrolla en el museo, y otra "de laboratorio y gabinete", que se realiza en un aula cercana. Esto permite dividir a grupos grandes que no cabrían de otra manera en el museo.

La duración de los talleres varió en función del número y la edad de los asistentes. El grupo de 1er curso de primaria se organizó en tres tramos: 30 minutos de presentación con los 20 estudiantes juntos, y luego dos turnos "de campo" y dos "de laboratorio-gabinete" con grupos de 10 que rotaron para pasar por todas las actividades (90 minutos en total). El grupo de 6º de primaria era más numeroso (50 estudiantes), por lo que hubo que hacer dos turnos completos y restringir la duración de cada tramo a 20 minutos (2 horas en total). Para cubrir todas las actividades, fue necesaria la colaboración de al menos seis monitoras/es.

ACTIVIDADES DE CAMPO

La primera de las actividades de campo consistió en un ejercicio de orientación. El cuaderno de campo que se les había entregado contiene un mapa del museo y una lista de seis objetos seleccionados de las vitrinas. Debían encontrar los objetos y, con la ayuda de la brújula (y las/os monitoras/es), situarlos sobre el mapa del museo.



FIGURA 2. Una monitora ayudando a una estudiante a localizar un objeto en el mapa del museo (Foto: Gema García Martín).

Los participantes más mayores (11 años) también midieron el museo con el metro de carpintero para añadir una escala al mapa que se les había proporcionado.

Una vez situados en el espacio, se empezó a trabajar con el tiempo geológico. Para ello, utilizamos una tabla cronoestratigráfica antigua expuesta en una pared del museo, que ilustra multitud de fósiles asociados a cada periodo geológico. A cada estudiante se le proporcionaron dos dibujos de fósiles diferentes para que los identificara y los ordenara según su edad, fijándose en la tabla como referencia.

Por último, se proyectaron en una pantalla fotografías de geólogos/as realizando diferentes trabajos, tanto en el campo como en laboratorio y gabinete y se comentaron. En la última página de su cuaderno de campo había una lista de tareas que realizan las y los geólogos y de ellas debían marcar las respuestas correctas.

Como se previó que no todo el alumnado iba a acabar las distintas tareas al mismo tiempo, se preparó una colección de muestras para observar con la lupa de mano, para quienes terminaran antes. Se seleccionaron fósiles y minerales que fueran especialmente vistosos y brillantes (p. ej. calcopirita, lepidolita, estibina, espato de Islandia…). De esta manera, se pudo organizar el grupo y empezar las distintas tareas con todo el mundo a la vez.

ACTIVIDADES DE LABORATORIO Y GABINETE

Estas actividades se realizaron en otra aula que se dividió en cuatro espacios (todos ellos con un/a monitor/a) por los que rotaron todos los estudiantes. En la primera zona se realizó una actividad de identificación de materiales geológicos a partir de propiedades físicas observables a simple vista, como ejemplo del trabajo de laboratorio. Los otros tres espacios se organizaron como ejemplo de trabajo de gabinete: uno con una lupa binocular, otro con un microscopio petrográficos y el último con varios estereoscopios.

Para el reconocimiento de materiales geológicos en el espacio de laboratorio se prepararon varios *sets*, a repartir entre los grupos colaborativos organizados, que contenían 5 bloques de 5x5x5cm de distintos materiales geológicos (arenisca, granito, mármol, caliza y yeso); una lupa de mano, para realizar observaciones de *visu* (color y presencia de granos o cristales); un punzón que, junto con la uña, les permitió determinar la dureza del material; un bote cuentagotas con una solución de ácido clorhídrico al 4%, para comprobar la reactividad de los materiales carbonatados (esta concentración es más baja de la habitual para garantizar la seguridad del taller, aunque suficiente para que se produzca una reacción visible con la calcita); guantes de látex para manipular el ácido; una ficha para la toma de datos y un rotulador. Tras una breve explicación de la mecánica y el objetivo de la práctica, cada grupo realizó de manera autónoma la actividad, reservando los minutos finales para poner en común las observaciones de todos los grupos.

En la zona de interpretación de fotografías aéreas se colocaron cuatro estereoscopios de mesa con pares de fotografías de la zona de Torrelaguna, en Madrid. En todo momento estuvieron acompañados por una monitora que les ayudó a conseguir ver la imagen en relieve e identificar distintos elementos, como cauces fluviales, escarpes o resaltes.

En la zona de microscopía se colocó un microscopio petrográfico monocular de luz transmitida y varias láminas delgadas de distintos materiales para observar diversas texturas y mineralogías con nícoles paralelos y cruzados. En el taller realizado con los niños y niñas más pequeñas se montó también un microscopio "infantil" con un móvil acoplado que permite ver las preparaciones sin necesidad de acercarse al ocular.

En la última zona se colocó una preparación de foraminíferos actuales en una lupa binocular.



FIGURA 3. Una alumna realizando la identificación de materiales geológicos en el gabinete (Foto: Gema García Martín).

RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD Y PUNTOS A MEJORAR

El taller tuvo muy buena acogida por parte del alumnado de Educación Primaria y participaron de manera muy activa en todas las actividades. El profesorado comentó que le había parecido una actividad muy adecuada a la edad del estudiantado.

De entre todas, las que más les gustaron fueron la actividad de orientación, la identificación de materiales y la observación de los minerales con la lupa. La que tuvo menos éxito fue la de identificar las tareas de los geólogos en su lista del cuaderno, probablemente porque era la actividad menos interactiva y, además, la que tenía más texto escrito.

A pesar de que la actividad estaba diseñada específicamente para estudiantes de Educación Primaria, hay algunos aspectos que se podrían mejorar, especialmente respecto a quienes eran más pequeños. En el taller realizado con estudiantes de seis años, surgió el inconveniente de que la mayoría de ellos no sabían leer y escribir bien, ni siquiera los primeros números. Esto se podría solucionar para el futuro utilizando pegatinas de distintas formas y colores para ubicar los objetos del museo en el mapa y poniendo imágenes en vez de texto en la página de "¿Qué hace un/a geólogo/a?".

Este hecho también influyó en la tarea de ordenar los fósiles por edades. No hubo ningún problema con la identificación de los fósiles puesto que se escanearon las imágenes de la tabla del museo que iban a utilizar durante la actividad, pero para apuntar las edades en su cuaderno de campo se utilizó una tabla cronoestratigráfica actualizada que no coincidía exactamente con la del museo, más antigua. La única pista que tenían quienes no

sabían leer era el color, que no coincidía en algunos periodos en las dos tablas. Esto produjo confusiones e hizo que esta tarea no quedara tan clara a pesar de la ayuda de las monitoras.

Las actividades de laboratorio se realizaron de la misma manera para las distintas edades. La única adaptación fue incluir un microscopio con un móvil acoplado para ayudar a quienes tenían seis años de edad que, en algunos casos, pueden tener problemas para guiñar un ojo mientras miran por un ocular. Tuvieron menos problemas para ver los foraminíferos con la lupa binocular y con la estereoscopía. La actividad de identificar los bloques de distintos materiales geológicos tuvo mucho éxito, probablemente por la posibilidad de rayar los bloques y provocar la efervescencia con el ácido. Esta actividad es muy adecuada para visitantes de todas las edades.

La variedad de tareas fue un punto a favor para atraer la atención del alumnado, pero es también una de las dificultades para poder ofertar este taller de manera habitual. Para realizarlo por completo es necesario otro espacio además del museo, se requieren al menos seis monitores/as para cada turno, y se utiliza gran cantidad de material: microscopio, lupas, muestras de mano, guantes, estereoscopios, fotografías aéreas, ácido, punzones, fósiles y minerales, chalecos reflectantes, etc. Todo esto es posible en un entorno con muchos recursos de este tipo, pero puede ser más problemático en otros lugares, como centros educativos de Educación Primaria.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado las actividades desarrolladas en el taller “Trabajando en geología por un día” organizado por el Museo de la Geología - UCM para estudiantado de Educación Primaria. Los resultados indican que presentar muchas tareas diferentes les proporciona una visión variada de las temáticas relacionadas con la Geología y que ha dado muy buen resultado para dar a conocer la profesión de geólogo/a. Como punto final se constata que algunas de estas tareas podrían servir de ejemplo para organizar talleres similares en otros centros educativos o instituciones.

AGRADECIMIENTOS

Las lupas y las brújulas, así como la impresión de los cuadernos de campo fueron financiadas por la Fundación para el Conocimiento Madrid para la Semana de la Ciencia y la Innovación de Madrid de 2023. Agradecemos a la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM) el préstamo de los chalecos reflectantes y los estereoscopios, así como el uso de los espacios para el desarrollo de las actividades.

REFERENCIAS

Acedo, A., Fesharaki, O. y García-Frank, A. (2020). Análisis comparativo de menciones al patrimonio paleontológico y otros tipos de patrimonio en los currículos de Educación Secundaria en España (periodo 1970-2020). Revista de la Sociedad Geológica de España, 33 (2),41-62.

Decreto 61/2022, de 13 de julio, del Consejo de Gobierno, por el que se establece para la Comunidad de Madrid la ordenación y el currículo de la etapa de Educación Primaria. Publicado en: «BOCM» núm. 169, de 18 de julio de 2022.

Ley Orgánica de Modificación de la Ley Orgánica de Educación (LOMLOE). Publicado en: «BOE» núm. 340, de 29 de diciembre de 2020.

Mampel Laboira, L. y Cortés García, A. (2012): El concepto "dinosaurio" en los libros de texto. *Revista de Enseñanza de Ciencias de la Tierra*, 20.3: 239-248.

Olías, M. Alonso Chaves, F.M. y Almodóvar Sel, G.R. (2008): El Geólogo ¿Una especie en vías de extinción? *Geo-Temas*, 10: 43.

Pérez-Martín, J.M. y Esquivel-Martín, T. (2021): Conocimientos y percepciones de los/as maestros/as de Educación Infantil y Primaria en ejercicio sobre los dinosaurios y su enseñanza. *Revista de Enseñanza de Ciencias de la Tierra*, 29.1: 101-110

El papel de la Asociación de Amigos del Camino de Santiago de Jaca en la enseñanza de la Geología a los peregrinos

The role of the Jaca's Association of Friends of St James Way in teaching geology to pilgrims

A. Pascual [1]

[1]Universidad del País Vasco UPV/EHU. Fac. Ciencia y Tecnología. Dpto. Geología. Apdo. 644, 48080 Bilbao. ana.pascual@ehu.eus

Resumen: En pleno siglo XXI, como ya lo hicieran otras gentes desde el siglo IX, de manera desinteresada, se atiende a los peregrinos del Camino de Santiago en su recorrido por la ruta Jacobea. En el Camino francés por Aragón, los caminantes son apoyados por la Asociación de Amigos del Camino de Santiago de Jaca. Este trabajo pone de manifiesto las diferentes acciones que lleva a cabo esta Asociación para dar a conocer este ramal del Camino de Santiago. Las conferencias, cursos y caminatas de las "Jornadas de Concienciación Jacobea" ofrecen al peregrino la posibilidad de conocer la Geología de todo aquello que ve y pisa a lo largo de este Camino. Los lazos de unión existentes con la Asociación del Camino de Santiago de Oloron-Sainte-Marie en Francia, permiten además realizar acciones conjuntas a ambos lados del Pirineo, estableciendo un recorrido geológico que de norte a sur atraviesa materiales desde el Devónico al Cuaternario, es decir 400 millones de años de historia de la Tierra.

Palabras clave: Geología, Camino de Santiago francés, vía de Arlés, Aragón.

Abstract: *In the 21st century, as it has been happening since the 9th Century, the pilgrims of the St James Way, on their journey along the Jacobean route, are being looked after by volunteers. On the French Way through Aragon, the pilgrims are supported by Jaca's Association of Friends of St James Way. This work highlights the different activities, carried out by this Association, to promote this area of the St James Way. The conferences, courses and walks of the "Jacobean Awareness Days", offer pilgrims the possibility of learning about the Geology of everything they see and step on, along this route. The existing ties with the French association of St James way in Oloron-Sainte-Marie, also allow collaborative activities on both sides of the Pyrenees. This results in a geological route that from North to South crosses materials aged from the Devonian to the Quaternary, which represent 400 million years of Earth history.*

Key words: *Geology, St James Way, The French Way, The Arles Way, Aragón*

INTRODUCCIÓN

A partir del año 820, cuando según la tradición cristiana se descubre la tumba del apóstol Santiago, una multitud de peregrinos han caminado hasta Compostela. Gentes procedentes de toda Europa han atravesado los Pirineos a lo largo de los siglos para, recorriendo la Ruta Jacobea, llegar a Santiago. Para ayudar a estos peregrinos se crearon albergues y hospitales atendidos por personas que, desinteresadamente, los han asistido.

El auge del Camino de Santiago a partir de la segunda mitad del siglo XX, ha llevado a la constitución de Asociaciones de Amigos del Camino de Santiago que, como en siglos anteriores, siguen prestando ayuda a los peregrinos. Una de estas Asociaciones es la de Jaca, fundada en el año 1987 y en cuyos estatutos (Capítulo I, artículo 2, apartado b) se señala lo siguiente:

b) *El fin primordial de la Asociación es el de trabajar para la conservación, defensa y revitalización del Camino Jacobeo, desarrollando a tal fin:*

I. Estudios e investigaciones histórico-culturales del Camino de Santiago y su entorno, desde Somport hasta Puente La Reina (Navarra)…

III. Promoción de cualquier tipo de actividades culturales, conferencias, reuniones, viajes y peregrinaciones

https://www.jacajacobea.com/pdf/Estatutos.pdf

El Camino de Santiago, además de espiritual también es un camino cultural, que ha recibido diferentes distinciones: conjunto histórico-artístico (B.O.E. de 7 de septiembre de 1962), Primer Itinerario Cultural Europeo (Consejo de Europa, 1987), Patrimonio de la Humanidad (Unesco, 1993) y premio Príncipe de Asturias de la Concordia (2004), entre otros galardones.

Los últimos datos del censo (enero-noviembre, 2023) https://oficinadelperegrino.com/estadisticas-2/ registra la llegada de 219.786 peregrinos procedentes del Camino Francés, que penetra en España a través de

dos pasos: Roncesvalles y el puerto de Somport. Esta segunda entrada fue la ruta más transitada en los primeros siglos de peregrinación, como aparece reflejada en el libro V del Códice Calixtino, considerado la primera guía del peregrino medieval del siglo XII (Moralejo et *al*.,2016). Sin embargo, hoy en día resulta minoritario este ramal del camino francés que penetra por Somport y que recibe el nombre de Camino Aragonés.

En su empeño por dar a conocer este Camino, la Asociación de Amigos del Camino de Santiago de Jaca, organiza diversas Jornadas de "Concienciación Jacobea" que ahondan en su conocimiento desde perspectivas diversas: historia, arqueología, mitología, antropología social, folclore, musicología, arte, botánica y Geología. Este trabajo pretende poner de manifiesto el privilegio que supone para los peregrinos recorrer el Camino de Santiago francés por Aragón, desde el punto de vista geológico, ya que en menos de 100 km se atraviesan materiales desde el Devónico al Cuaternario, recorriendo además las tres unidades estructurales en las que se dividen los Pirineos: el Pirineo Axial, Las sierras Interiores y la Depresión Media.

LOCALIZACIÓN

El ámbito territorial de acción de la Asociación de Amigos del Camino de Jaca se extiende "*principalmente a la Comunidad Autónoma de Aragón, aunque en acciones determinadas puede también hacerlo a todo el recorrido del Camino de Santiago*" (artículo 4 de sus estatutos). Es así como su marco de actuación está preferentemente centrado en el Camino de Santiago francés por Aragón (Camino Aragonés), final de la Vía de Arlés o Tolosona, utilizada mayoritariamente en los siglos pasados por los peregrinos que venían desde el este y sur de Europa (Pombo, 2015).

Los lazos de unión y hermandad existentes entre la Asociación de Amigos del Camino de Santiago de Jaca y su homóloga francesa del otro lado del Pirineo, Association des Amis de Saint-Jacques de Compostelle, ARLOLOJAC, con sede en Oloron-Sainte-Marie, han permitido, además, dar a conocer la geología dispar de ambos lados de la cordillera pirenaica a los peregrinos. Estos recorren el Camino de Santiago ascendiendo el valle de Aspe, en el alto Bearne (Francia), hasta Somport para posteriormente descender por el valle del río Aragón en dirección a Jaca (Fig.1; Tabla I).

METODOLOGÍA: ACTIVIDADES

En los últimos años, La Asociación de Amigos del Camino de Santiago de Jaca viene organizando las "*Jornadas de Concienciación Jacobea*". https://www.jacajacobea.com/actividades/

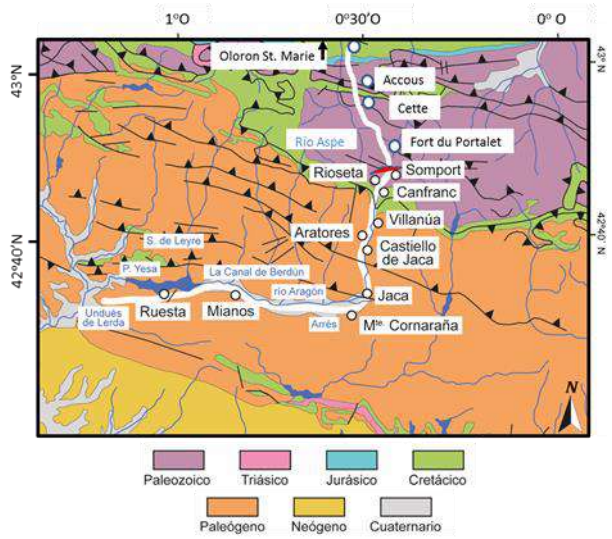


FIGURA 1. *Recorrido geológico a lo largo del Camino de Santiago francés por Aragón, vía de Arlés, Oloron-Sainte-Marie – Undués de Lerda (modificado del Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias. Escala 1:1.000.000).*

En las Jornadas de primavera se realizan caminatas, por varias de las etapas del camino francés, junto a peregrinos y público que muestre interés por el Camino de Santiago. En estas caminatas, se tratan diversos aspectos del Camino, desde los valores del peregrino, hasta la Botánica o la Geología, entre otros (Fig.2).



FIGURA 2. Divulgación de la Geología en las "Jornadas de Concienciación Jacobea 2022". Etapa Villanúa- Jaca.

Durante el verano y coincidiendo con el Día de Santiago, en el mes de julio, la Asociación colabora con la red de Municipios del Camino organizando conferencias, como la llevada a cabo en el Albergue de peregrinos de Canfranc, bajo el título de "*La Geología del Camino de Santiago francés por Aragón vista por una peregrina*" (Fig. 3). En otoño se programa un ciclo de conferencias en el salón del Ciento del Ayuntamiento de Jaca y por último en el Palacio de Congresos de la localidad se llevan a cabo los "Cursos de Temática Jacobea". En todas estas actividades se ha tratado el tema de "*La Geología del Camino de Santiago francés por Aragón*".

Toda la información sobre las "Jornadas de Concienciación Jacobea" son publicitadas en los medios

de comunicación locales, tanto hablados como escritos: Cadena Ser y Onda Cero Aragón, Periódico El Pirineo Aragonés, Jaca Times, Jacetania express, Diario del Alto Aragón, así como en la Agenda de las oficinas de turismo de la Jacetania.



FIGURA 3. *Cartel de la feria del Camino de Canfranc 2022, donde se publicita una conferencia sobre Geología del Camino de Santiago en el albergue de peregrinos.*

El material didáctico de temática Geológica generado en estas "Jornadas" se encuentra, a disposición de todos los peregrinos, albergada en la página web de la Asociación bajo el título genérico de Geología (Fig.4) https://www.jacajacobea.com/geologia/



FIGURA 4. *Página web de la Asociación de Amigos del Camino de Jaca, dedicada a la Geología del Camino de Santiago francés por Aragón https://www.jacajacobea.com/geologia/*

LA GEOLOGÍA DEL CAMINO DE SANTIAGO FRANCÉS ENTRE OLORON-SAINTE-MARIE Y UNDUÉS DE LERDA (VÍA DE ARLÉS)

Tanto la Vía de Arles o vía Tolosana de subida de Oloron-Sainte-Marie a Somport como el Camino Aragonés de descenso desde Somport a Jaca, sigue en paralelo a la Ruta Geológica Transpirenaica (Pascual, et al., 2021). Esta presenta una serie de paradas con buena accesibilidad y visibilidad en zonas de importante interés geológico. En los puntos donde dichas paradas coinciden con el Camino de Santiago se han utilizado, en nuestras salidas, los paneles explicativos allí existentes, muy bien conservados y actualizados en el lado francés, y muy deteriorados en la parte española. http://rgtp.geolval.fr/home.php .

Se realiza el Camino siguiendo la guía del Camino de Santiago francés de Pombo (2015), que diferencia las siguientes etapas: Oloron-Accous, Accous-Somport, Somport-Jaca, Jaca-Arrés, Arrés-Ruesta y Ruesta-Undués de Lerda (Tabla I) finalizando esta etapa en Sangüesa (Navarra). Las paradas establecidas en cada etapa permiten conocer la historia de la formación de los Pirineos desde el Devónico. Se visualizan las diferentes unidades geológicas y estructurales, la fuerte asimetría de los Pirineos, la tectónica de placas, sismicidad, magmatismo y el termalismo o el calor interno de la Tierra. Se observan los diferentes tipos de rocas o la geomorfología más reciente como la ocasionada por los glaciares o los ríos (Tabla I). También se pone de manifiesto los cambios climáticos que nos cuentan las rocas: el clima desértico del Pérmico, los climas cálidos con ambientes arrecifales del Cretácico o los fríos de las últimas glaciaciones cuaternarias (Tabla I).

CONCLUSIONES

Este trabajo pretende poner en valor el papel de Asociaciones, que, sin ánimo de lucro, se empeñan en proteger y dar a conocer el patrimonio geológico del Camino de Santiago. Por medio de conferencias, cursos y caminatas, acompañan a peregrinos y a todas aquellas personas interesadas en el conocimiento de dicho Camino, mostrándoles la Geología de todo aquello que ven y pisan en su peregrinación.

La Asociación de Amigos del Camino de Jaca defiende, en especial, el patrimonio natural e histórico-cultural del Camino de Santiago francés por Aragón. Pretende, además, que el peregrino que atraviesa este camino sea consciente del privilegio que supone el conocer, en menos de 100km (de Somport a Undués de Lerda), 400 millones de años de la historia de la Tierra.

AGRADECIMIENTOS

A la Asociación de Amigos del Camino de Santiago de Jaca por dar a conocer la Geología de su Camino.

REFERENCIAS

Moralejo, A., Torres, C. y Feo, J. (2016): *Códice Calixtino*. Alvarellos, Santiago de Compostela, 176p.

Pascual, A. Martínez-García, B. y García-Artola, A. (2021): Puesta en valor de la geología del Camino de Santiago: Camino Francés a su paso por Aragón. Geo-Temas 18, 683-686.

Pombo, A. (2015): Guía del Camino de Santiago. Camino francés. Anaya Touring, Madrid, 389 p.

Valle de Aspe (Francia)	Oloron Ste Marie	Lat. : N43°11’23.9 -Long. : W-O°36’40.3 Alt.: 234 m Corte geológico de los Prineos: sus rocas	Vía de Arlés: Oloron-Accous
	Mail Arrouy	Lat.: N43°04’52.7 - Long.: W-0°36’53.8 – Alt.: 352 m Panorámica del Jurásico	
	Desfiladero d´Escot	Lat.: N43°04’09.5 - Long.:W-0°36’21.1 – Alt.: 324 m Cluse atravesando un anticlinal. 5 Ma en 100 m. Ammonites y Rudistas	
	Fuentes de Escot	Lat.: N43°03’52.7 - Long.: W-0°36’01.2 – Alt.: 338 m Gas en las rocas y termalismo	
	Sarrance	Lat.: N43°03’04.0 - Long.: W-0°36’07.0 – Alt.: 314 m Las rocas de las construcciones nos cuentan la geología del valle de Aspe	
	Bedous	Lat.: N43°00’07.8 - Long.: W-0°35’31.0 – Alt.: 684 m Ofitas. Geomorfología glaciar y fluvial	
	Accous	Lat.: N42°58’39.1 - Long.: W-0°36’18.4 – Alt.: 443 m El choque entre la placa Euroasiática y la Ibérica	
	Cette	Lat.: N42°56’21.2 - Long.: W-0°35’09.8 – Alt.: 724 m Del Devónico al Cuaternario: el fondo del mar en la cima de las montañas	Accous- Somport
	Fort du Portalet	Lat.: N42°52’54.3 - Long.: W-0°33’37.0 – Alt.: 746 m Tectónica: las rocas se pliegan	
	Peyrenère	Lat.: N42°48’11.3 - Long.: W-0°32’43.3 – Alt.: 1468 m El Pérmico del Pirineo axial: clima semidesértico y actividad volcánica (Middi d'Ossau)	
Valle del Aragón (España)	Somport	Lat.: N42°47’43.9 - Long.: W-0°31’30.6 – Alt.: 1633 m El Pérmico del Pirineo axial: clima semidesértico y actividad volcánica (Anayet)	Camino Aragonés: Somport- Jaca
	Candanchú	Lat.: N42°47’08.1 - Long.: W-0°31’28.3 – Alt.: 1492 m El Pirineo axial	
	RioSeta	Lat.: N42°46’33.6 – Long.: W-0°30’44.4 – Alt : 1365 m Las Sierras interiores	
	Canfranc Estación	Lat.: N42°45’20.5 – Long.: W-0°30’50.7 – Alt : 1203 m El Carbonífero. El Holoceno y los riesgos de aludes	
	Torre de Fusileros	Lat.: N42°44’10.9 – Long.: W-0°31’23.8 – Alt.: 1170 m Pliegues, fallas y esquistosidad: el producto del choque entre placas	
	Villanúa	Lat.: N42°40’26.6 – Long.: W-0°32’29.7 – Alt.: 944 m Relieve kárstico	
	Aratorés	Lat.: N42°39’22.8 – Long.: W-0°33’47.1 – Alt.: 1014 m Geomorfología glaciar: las morrenas	
	Castiello de Jaca	Lat.: N42°37’48.6 – Long.: W-0°32’59.2 – Alt.: 899 m La fuente del peregrino: los ripples de la arenisca del flysch	
	Puente de Torrijos	Lat.: N42°36’22.7 – Long.: W-0°32’36.6 – Alt.: 825 m Turbiditas, megacapas e ichnofósiles	
	Jaca	Lat.: N42°33’41.7 – Long.: W-0°33’56.9 – Alt.: 805 m Cuaternario y geomorfología fluvial	Jaca- Arrés
	Monte Cornaraña	Lat.: N42º33’23.7 – Long.: W-0º39’10.3– Alt.: 723 m Las facies deltáicas. La cuenca de Jaca y la canal de Berdún	
	Arrés	Lat.: N42°33'21.0 - Long.: W-0°49’37.0 – Alt.: 705 m El paso de ambientes marinos a continentales por el levantamiento de los Pirineos	
	Mianos	Lat.: N42°35'21.7 - Long.: W-0°56’59.7 – Alt.: 579 m Geomorfología en ambientes semiáridos: cárcavas (badlands)	Arrés- Ruesta
	Ruesta	Lat.: N42°35'27.9 - Long.: W-1°04’38.0 – Alt.: 552 m Ambientes parálicos	
	Undues de Lerda	Lat.: N42°33'56.0 - Long.: W-1°10’09.0 – Alt.: 633 m Las Sierras exteriores (el Prepirineo). Lagos someros de medios continentales oxidantes	

TABLA I. *Paradas, con sus contenidos geológicos, en cada una de las etapas del Camino de Santiago francés, vía de Arlés: desde Oloron-Sainte-Marie a Somport (valle de Aspe, Francia) y de Somport a Undués de Lerda (valle del Aragón, España).*

Fotogrametría con drones ligeros: un método asequible para la enseñanza de la geología

Photogrammetry with light-weight drones: an affordable method for the teaching of geology

A. Pertuz[1] y S. Campos-Soto[1]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, c/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid. apertuz@ucm.es sonia.campos.soto@ucm.es

Resumen: Disponer de recursos visuales de alta calidad es fundamental en la enseñanza de la geología, más aún cuando existen limitaciones de tiempo, presupuesto o accesibilidad a zonas de campo con alto interés geológico. El uso de drones en los últimos años ha posibilitado en numerosos trabajos la fotografía de afloramientos de difícil acceso y desde puntos de vista que no son posibles por medios terrestres, además de la elaboración de modelos digitales tridimensionales del terreno por medio de técnicas fotogramétricas. Generalmente los drones usados en estos trabajos suponen una gran inversión económica y, por su peso, pueden presentar inconvenientes de uso según la normativa actual. En este trabajo se hace uso de drones ligeros (<250g) y de bajo coste para presentar de manera actualizada la metodología necesaria para la obtención de imágenes, la creación de modelos 3D y su aplicación en la enseñanza de la geología. Su uso por parte del profesorado y/o del alumnado sirve como material complementario tanto en las prácticas de campo como en el trabajo en el aula.

Palabras clave: educación, geología, drones, modelos digitales 3D

Abstract: *Having high-quality visual resources is crucial in the teaching of geology, especially when faced with constraints such as limited time, budget, or accessibility to field areas of high geological interest. In recent years, the use of drones in numerous studies has enabled the photography of hard-to-reach outcrops and from perspectives not achievable by ground-based means, along with the creation of high-resolution three-dimensional digital models of the terrain through photogrammetric techniques. Typically, drones employed in such studies constitute a significant economic investment and, due to their weight, may pose usage problems in accordance with current regulations. This study utilizes lightweight low-cost drones (<250g) and provides an updated methodology for the acquisition of drone images, the creation of 3D models and their application in geology education. Their use by teachers and/or students serves as supplementary material both in field practices and classroom work.*

Key words: *education, geology, drones, digital 3D model*

INTRODUCCIÓN

En la enseñanza de la geología está siendo cada vez más importante disponer de recursos visuales de alta calidad. En los últimos años, el avance de las tecnologías no solo ha permitido incrementar la resolución y calidad de las imágenes capturadas desde tierra, sino que también ha posibilitado la aplicación de nuevas tecnologías, como la de los drones, abriendo nuevas posibilidades en el ámbito de la educación y la academia.

Poder visualizar una zona de interés geológico en tres dimensiones es esencial y, debido a ello, en las facultades de geología se les da especial relevancia a las prácticas de campo. No obstante, no siempre es posible estudiar *in situ* los afloramientos de interés debido a limitaciones de tiempo, presupuesto o incluso de accesibilidad. Además, tal como ocurrió durante la emergencia sanitaria de 2020, la interrupción de las clases presenciales puede tener un impacto significativo en la docencia, sobre todo en las actividades de campo. Es por ello por lo que, en los últimos años, se han desarrollado diversas iniciativas para facilitar la enseñanza no presencial en las ciencias geológicas y de la Tierra, mediante la realización de visitas virtuales de campo (Harknett et al., 2022) o por medio de repositorios online de modelos digitales tridimensionales del terreno (Buckley et al. 2022). La construcción de modelos digitales 3D por técnicas fotogramétricas mediante el uso de drones, es común en la industria minera (ej. Park y Choi, 2020) y se aplica cada vez con más frecuencia en el ámbito de la geología (ej. Fernández-Lozano y Gutiérrez-Alonso, 2016).

En años recientes, la entrada en el mercado de nuevos modelos de dron con sensores de alta resolución y bajo coste, está permitiendo que su uso sea más accesible y aplicable tanto en la enseñanza como en el ámbito académico. En este trabajo se muestra, de manera actualizada, la metodología detallada necesaria para que profesorado y estudiantado puedan realizar modelos digitales 3D mediante el uso de drones comerciales de bajo coste que puedan posteriormente ser analizados en

el aula. Además, se ilustran dos casos prácticos en los que se ha aplicado esta metodología: en Santibáñez de Ayllón (Segovia) y Montejo de Tiermes (Soria).

METODOLOGÍA

La técnica más utilizada para la captura de modelos digitales 3D, tanto desde tierra como con medios aéreos (Bemis et al., 2014), es la fotogrametría por medio de algoritmos SFM-MVS *(Structure From Motion - Multiview-Stereo)*. Esta técnica se basa en el principio de que, dadas dos fotografías con cierto solapamiento (Fig. 1), y sin necesidad de conocer previamente la posición de la cámara, se puede calcular la localización 3D de sus elementos comunes.

En este trabajo se hace uso de un dron modelo DJI Mini 2. Este modelo tiene un coste inferior a los 500€ y cuenta con un peso de 249 g y una cámara digital de 12 MP con un ángulo de visión de 83º. El manejo se realiza desde un mando conectado a un teléfono móvil y cuenta con una autonomía de vuelo de 25 minutos por batería. A fecha de este trabajo se aplica la normativa europea recogida en los reglamentos (UE) *2019/947* y *2019/945* en la que se indica que para el uso de esta categoría de dron no es necesario disponer de una licencia de piloto, solamente haberse registrado gratuitamente como operador en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (ver más información en: www.seguridadaerea.gob.es). Además, será necesario conocer las zonas en las que está permitido el vuelo de drones, lo que se puede consultar a través de la web https://drones.enaire.es/, y en caso de que sea necesario, solicitar los permisos correspondientes (Parques Naturales, zonas ZEPA, etc.).

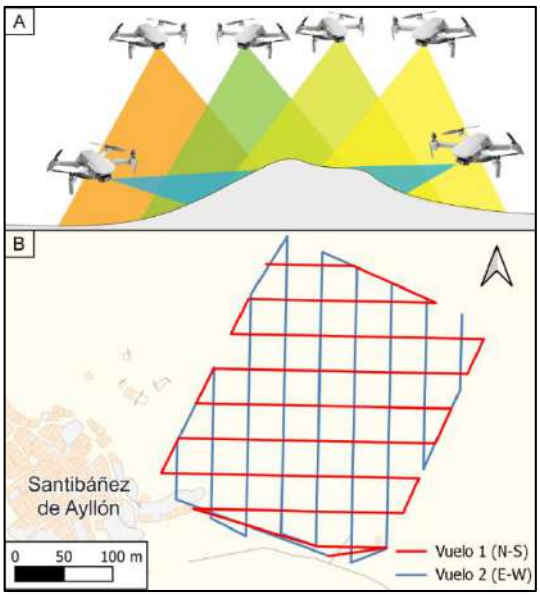


FIGURA 1: A) *Esquema de captura de imágenes en fotogrametría aérea. Para mejorar la resolución en ciertas topografías es necesario realizar imágenes a menor altura y en la horizontal. B) Ejemplo de malla de vuelo con dos planes, uno N-S y otro E-W.*

El flujo de trabajo comienza con la adquisición de imágenes. Estas se deben capturar desde diferentes ángulos y tener un solape medio de, al menos, el 70% (Fig. 1): a mayor número de imágenes solapadas, más densa será la reconstrucción y mejor resolución se conseguirá. Se debe cubrir un área un 20% mayor a la de interés, al menos, para reducir los problemas de borde durante la reconstrucción. El número de fotografías final dependerá por tanto de la extensión del afloramiento, geometría y nivel de detalle deseado.

La altura de vuelo junto a la resolución de la cámara serán determinantes en la calidad final del modelo. Es recomendable realizar una combinación de imágenes nadir, obtenidas a 90º respecto a la horizontal, junto a imágenes oblicuas, obtenidas a 60º o 70º (Fig. 1), para mejorar la precisión en la reconstrucción del modelo y reducir errores sistemáticos (Nesbit y Hugenholtz, 2019). Utilizando aplicaciones móviles como Litchi o Dronelink se puede automatizar la captura de imágenes por medio de mallas de vuelo (Fig. 1B) en las que el solape, inclinación de la cámara y altura de vuelo se mantengan constantes o varíen acorde a las necesidades del proyecto. No obstante, en zonas de especial interés o en relieves verticales, se deben realizar fotografías manualmente, es decir, en vuelo libre, que cubran de cerca todo el espacio de estudio. Esto puede requerir la obtención de imágenes horizontales, a 0º (Fig. 1A).

Para definir la escala, orientación y posición absoluta del modelo, se pueden situar puntos de control terrestre o GCPs (Ground Control Points), que son puntos de ajuste con posición conocida, necesarios cuando se necesita una elevada precisión y exactitud. Situar estos puntos de control lleva tiempo e incluso puede no ser viable por problemas de acceso a la zona de trabajo. Sin embargo, para aplicaciones como la de este trabajo, donde no es necesaria una elevada precisión, el uso combinado de imágenes nadir y oblicuas junto a mejoras en los algoritmos de procesado y en los sensores de posicionamiento de los drones, hace que el uso de GCPs no sea necesario para aplicaciones como las del presente trabajo (Carbonneau y Dietrich, 2016). Eliminado el uso de GCPs se reduce la complejidad y coste en la adquisición de imágenes.

Para la construcción del modelo 3D existen diversos programas que hacen uso de la técnica SFM-MVS. En este trabajo, nos hemos decantado por Agisoft Metashape por su facilidad de uso y disponibilidad de licencias educativas perpetuas a menor precio (~65€) que las licencias estándar (~200€). Existen otras opciones comerciales, como Pix4D, descartada en un principio por ser licencias mensuales (~30€/mes), o como Autodesk ReCap Pro, descartada por ser inferior en prestaciones. Existen opciones de software libres como Meshroom, que presenta problemas de compatibilidad con algunas tarjetas gráficas (modelos de AMD), y WebODM, cuya calidad final de los modelos es similar a la de Metashape, pero presenta dificultades para su instalación.

El proceso para crear un primer modelo en Agisoft Metashape es prácticamente automático gracias a sus flujos de trabajo integrados. Una vez se han importado las imágenes (JPEG, PNG, TIFF etc.), el primer paso en la reconstrucción del modelo 3D es el análisis por parte del programa de las diferentes imágenes en busca de

patrones comunes. A partir de la red de puntos comunes se deriva la posición y orientación relativa de estos a las cámaras individuales. Este paso tiene en cuenta la posición GPS guardada por el dron para cada imagen. El resultado es una nube de puntos a partir de la cual, por medio de triangulación e interpolación, se genera una malla 3D georreferenciada. La textura y color del modelo se genera a partir de las imágenes más cercanas a cada punto del modelo, asegurando así la máxima resolución.

Los modelos 3D obtenidos pueden ser exportados como mallas (archivo .OBJ) y subidos a repositorios online como Sketchfab, donde se pueden visualizar. También se pueden importar en un software de visualización 3D, como Agisoft Viewer, para realizar medidas de distancias, ángulos o volúmenes; o en un software de modelado 3D, como Blender, para añadir objetos, como barras de escala o elementos de interés, como planos de falla (Rocca, 2021). Además, una de las aplicaciones más útiles en la enseñanza, es la extracción de panorámicas de alta resolución ya sea por medio del programa Agisoft Metashape o simplemente mediante capturas de pantalla.

RESULTADOS Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN

La metodología anteriormente descrita ha sido aplicada en dos situaciones diferentes que podrían servir en la docencia universitaria de la geología y/o en los institutos. Los modelos aquí mostrados se pueden consultar en alta resolución y libremente desde los enlaces al repositorio online Sketchfab.

Discordancia de Santibáñez de Ayllón

Al oeste de la localidad de Santibáñez de Ayllón y a lo largo de 300 m, se puede observar una discordancia, en la que materiales del Neógeno, principalmente detríticos y carbonatos lacustres (Nozal y Herrero, 2005), se disponen horizontales sobre el basamento Silúrico formado por pizarras negras plegadas (Fig. 2). Esta discordancia es un punto de interés geológico con gran valor desde el punto de vista docente y de patrimonio geológico (Diez-Herrero et al., 2022). Sin embargo, aunque el acceso a la base de las pizarras es sencillo, éste se complica debido a las fuertes pendientes de las laderas.

Por ello la obtención de un modelo 3D resulta muy útil para su análisis. Para la elaboración del modelo (Fig. 2) se adquirieron un total de 165 imágenes de forma automática con la aplicación Litchi. Se realizaron dos vuelos de 25 min, uno N-S y otro E-O. La cámara se situó a 70º de inclinación y la altura sobre el suelo se mantuvo a 80 m. El modelo resultante cuenta con una resolución terrestre de 2.86 cm/pixel cubriendo un área de 0.12 km^2.

Desde Sketchfab se añadieron anotaciones en puntos de interés (Fig. 2, consultar en https://skfb.ly/oDMGB) a través de las cuales se pueden visualizar fotografías de detalle o bibliografía. Esta es una forma rápida de diseñar visitas virtuales autoguiadas a afloramientos que por limitaciones de tiempo o presupuesto no puedan ser visitados normalmente. Con estos datos el alumnado puede realizar un ejercicio de reconstrucción de los procesos geológicos ocurridos en la zona e ilustrarlo en esquemas o imágenes sacadas directamente del modelo.

Facies Buntsandstein en Motejo de Tiermes

En el término municipal de Montejo de Tiermes (Soria) se ubica el yacimiento arqueológico de Tiermes, emplazado a lo largo de la Fm. Areniscas de Río Pedro, (Facies Buntsandstein del Triásico Inferior). Uno de los lugares de interés geológico del yacimiento lo forma una pared vertical de areniscas y conglomerados de unos 20 m de altura, en la que se observan abundantes estructuras sedimentarias muy bien preservadas, en las que se pueden analizar en detalle los procesos que las formaron.

El principal problema para la construcción de un modelo 3D en esta zona es la verticalidad del relieve, por lo que se decidió adquirir todas las imágenes de forma manual (vuelo libre). El modelo final (Fig. 3A, consultar en https://skfb.ly/oPNXT) se construyó a partir de 163 imágenes, de las cuales, además de las fotografías oblicuas a 70º respecto a la horizontal y a 40-50 m de altura, también se realizaron numerosas fotografías a 0º y a escasos 5 m de la pared.

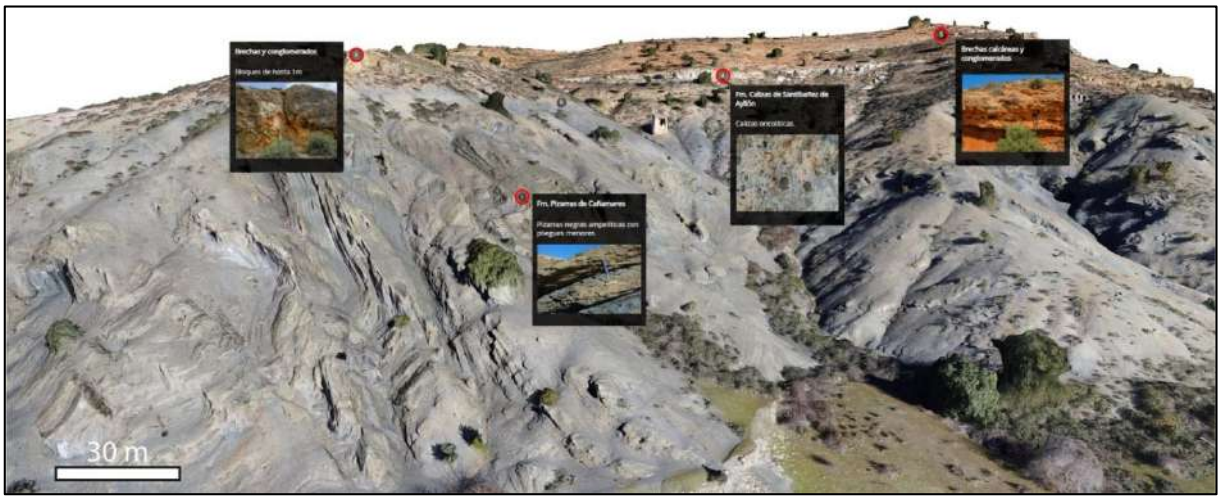


FIGURA 2. *Modelo digital 3D de la discordancia de Santibáñez de Ayllón visualizado en Sketchfab. En este repositorio se pueden incluir gratuitamente hasta 10 anotaciones que incluyan información adicional o fotografías de detalle. Ver en https://skfb.ly/oDMGB.*

En total se cubrió un área de 0.016 km^2 con una resolución media de 1cm/pixel, llegando a 0.2 cm/pixel para las imágenes más cercanas a la pared y de 2 cm/pixel para las más lejanas.

Un posible ejercicio basado en este modelo 3D es pedir al estudiantado que lo visualicen, bien de forma online en Sketchfab o, si descargan el modelo original, por medio de Agisoft Viewer, para después seleccionar zonas de interés y extraer imágenes detalladas de estas en las que se podrá dibujar y explicar, por ejemplo, las estructuras sedimentarias que se observen (Fig. 3B, 3C), bien imprimiendo las fotografías en papel o mediante programas de ilustración digital (Inkscape o Adobe Illustrator). Este ejercicio puede ser útil como complemento a una salida de campo al mismo afloramiento ya que puede incentivar una preparación previa por parte de los estudiantes.

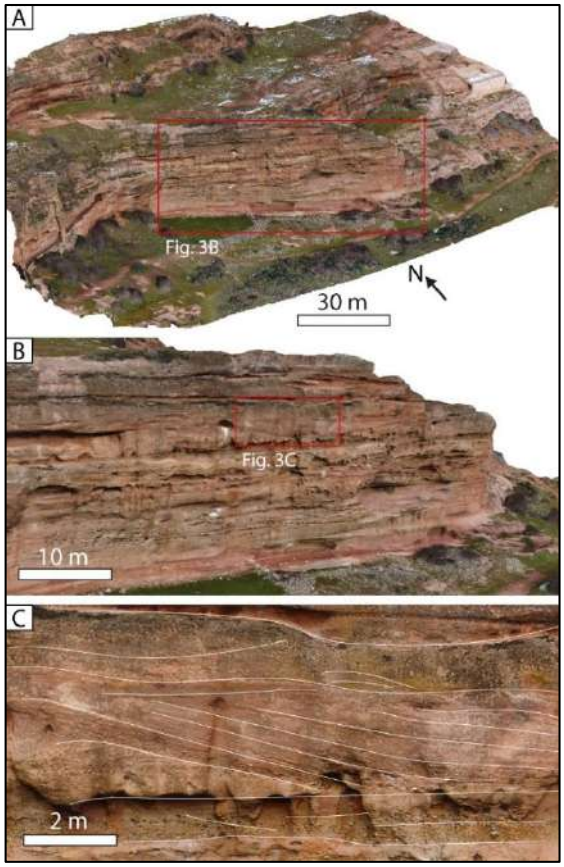


FIGURA 3. *A) Modelo digital de la Fm. Areniscas de Río Pedro en el yacimiento arqueológico de Tiermes. B y C) Detalles sucesivos del modelo 3D en el que la resolución de hasta 0.2 cm/pixel permite dibujar detallados paneles de análisis sedimentológico*

CONCLUSIONES

El uso de modelos digitales 3D construidos a partir de fotogrametría SFM-MVS ofrece variadas aplicaciones muy útiles en la enseñanza de la geología y es un complemento esencial en zonas de difícil acceso. Con la metodología adecuada, la construcción de estos modelos es barata, rápida y sencilla de aplicar. Su utilidad se fundamenta en la creación de afloramientos virtuales de gran extensión, fotorrealistas y de alta resolución. Los recursos derivados de los modelos 3D (ortofotos, panorámicas o mediciones directas en software) pueden servir como base de ejercicios que se realicen antes o durante las prácticas de campo. El desarrollo de drones más baratos y con buenas prestaciones, y la nueva normativa de uso de los drones ligeros (<250g), permiten que esta tecnología y su aplicación esté al alcance de un mayor número de personas y estudios académicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por una Beca de Colaboración en Dptos. Universitarios 2022-2023 del Ministerio de Educación y Formación Profesional.

REFERENCIAS

Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M., Akciz, S.O., Thiele, S.T., y Bangash, H.A. (2014): Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal Of Structural Geology*, 69: 163-178.

Buckley, S.J., Howell, J.A., Naumann, N., Lewis, C., Chmielewska, M., Ringdal, K., Vanbiervliet, J., Tong, B., Mulelid-Tynes, O.S., Foster, D., Maxwell, G. y Pugsley, J. (2022): V3Geo: a cloud-based repository for virtual 3D models in geoscience. *Geoscience Communication Discussions*, 5(1): 1-27.

Carbonneau, P. y Dietrich, J. (2016): Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade SUAS: Implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3): 473-486.

Diez-Herrero A., Lozano G. y Vegas J. (2022): Metodología para el diseño de rutas de geoturismo por el patrimonio geológico de la provincia de Segovia. En: *XIV Reunión de la Comisión de Patrimonio Geológico.* Geotemas, 19: 59-62.

Harknett, J., Whitworth, M., Rust, D., Krokos, M., Kearl, M., Tibaldi, A., Bonali, F.L., Van Wyk De Vries, B., Antoniou, V., Nomikou, P., Reitano, D., Falsaperla, S., Vitello, F. y Becciani, U. (2022): The use of immersive virtual reality for teaching fieldwork skills in complex structural terrains. *Journal of Structural Geology*, 163: 104681.

Fernández-Lozano, J. y Gutiérrez-Alonso, G. (2016): Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(1): 89-105.

Nesbit, P.R. y Hugenholtz, C.H. (2019): Enhancing UAV–SFM 3D model accuracy in High-Relief landscapes by incorporating oblique images. *Remote Sensing*, 11(3): 239.

Nozal, F. y Herrero, A. (2005). El Mioceno del borde meridional del corredor Aranda de Duero-Burgo de Osma (SE Cuenca del Duero). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 18(1-2): 21-42.

Park, S. y Choi, Y. (2020): Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review. *Minerals*, 10(8): 663.

Rocca, R. (2021): Virtual outcrops generated with drone: enhancements, animations and internet publishing using computer game software. En: *X Congreso Geológico de España.* Geotemas, 18: 590-593.

Sobre la conceptualización del karst. De disolver materiales a la comprensión 3D de la estructura geológica y las anisotropías de permeabilidad.

About the conceptualization of karst. From material solution to the understanding of the 3D geological structure and the permeability anisotropies.

Ó. Pueyo Anchuela[1] y J. Martín-García[1]

1 Grupo de Investigación Beagle. Área de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Departamento de Didácticas Específicas. Facultad de Educación. Universidad de Zaragoza. c/ Pedro Cerbuna, nº12, CP 50009 (Zaragoza). opueyo@unizar.es; araujo@unizar.es

Palabras clave: karst learning, 3D geological structure, solution, karstification, alternative ideas.

Resumen

La conceptualización del karst a través del proceso de disolución permite realizar análogos sencillos entre los procesos físico-químicos y las evidencias kársticas superficiales. Sin embargo, este enfoque a través de los procesos identificables en superficie (e.g. estructuras tipo karren) difieren de las variables y procesos asociados a la disolución de materiales en profundidad. La descriptiva geomorfológica superficial no puede explicarse únicamente a partir de un proceso de disolución en contacto. El origen del proceso requiere comprender la estructura geológica, las propiedades de las rocas involucradas, su textura, las características de las aguas y su movimiento. Es decir, el proceso de disolución requiere accesibilidad del agua subsaturada a los materiales susceptibles de ser disueltos. Sin embargo, la tipología, desarrollo y características de las formas generadas no puede generalizarse únicamente a partir del proceso físico-químico utilizado como aproximación. Este enfoque conduce a la generación de ideas alternativas asociadas a los procesos de disolución compartidas con los enfoques de ríos subterráneos. Además, en el karst, la propagación del proceso de disolución a superficie no es directa, sino que implica considerar las características y propiedades de la cobertera. Se propone una aproximación al estudio a través de una progresión relacionada con la conceptualización de la estructura geológica, el nivel freático y las anisotropías tanto de solubilidad como de permeabilidad para ejemplificar, entonces, la casuística de la disolución superficial como caso simplificado de la realidad geológica de la disolución y los procesos kársticos.

Abstract

Karst conceptualization from the chemical solution process allow to easy analogues to be constructed from the surficial karst evidence. However, such an approach from surficial evidence (e.g. karren type structures) differs from the real processes and variables related to the material solution in the underground. The geomorphological surficial evidence cannot be explained only from the solution by contact. Understanding the origin and the involved processes require the comprehension of the geological structure, the rock properties, their texture, the water characteristics and its flow. Learning through just the physicochemical approach, even as preliminary first introduction, drives into alternative ideas as has been highlighted in other subjects such as underground rivers. Moreover, understanding the cover material structure is necessary to comprehend the geomorphological surface evidence. An alternative approach is presented introducing first the understanding of the geological structure, water level, and solubility and permeability anisotropies to progress to karst features. In such context, the chemical solution in the surface represents the exception to the rule against the introductory or precursory conceptual model of the karst phenomenon.

De la sal a la halita, del cristal al mineral y del laboratorio escolar al medio natural.

From salt to halite, from crystal to mineral and from the school laboratory to the natural environment.

Ó. Pueyo Anchuela, J. Martín García, Z. Salvadó Belart y M.J. Sáez Bondía

1 Grupo de Investigación Beagle. Área de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Departamento de Didácticas Específicas. Facultad de Educación. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, nº12, CP 50009 (Zaragoza). opueyo@unizar.es; araujo@unizar.es; zoel.salvado@unizar.es; msaezbo@unizar.es.

Palabras clave: cristalización, experimentación, prácticas científicas, cristal, mineral.

Resumen

El concepto de mineral como entidad que presenta una composición química definida, una estructura ordenada y propiedades específicas, es el fundamento para, posteriormente, inferir las condiciones de formación de los minerales y las rocas. El proceso de cristalización en el laboratorio escolar permite introducir el cristal como modelo de estructura ordenada (estado de mínima energía) aislando y modelando las condiciones de formación del mismo. Esto permite emplearlo como análogo de los procesos naturales en el contexto geológico. El interés del uso de la cristalización y la definición de mineral va más allá de la generación del propio cristal y permite entender las condiciones de formación mineral que se desarrollan en la naturaleza, en un entorno mucho más complejo. Esta comunicación presenta una secuencia de indagación basada en modelos sobre el proceso de cristalización contextualizado en el yacimiento halítico de Remolinos (Zaragoza; Pueyo et al., 2019). En concreto, la secuencia está encaminada a identificar cambios en la cristalización de sal como aproximación sencilla de la realidad de formación de cristales iónicos en ambientes evaporíticos. Para ello se plantea que los estudiantes propongan, comprueben y analicen las posibles variables que repercuten en las condiciones de formación de los cristales en el laboratorio a través de la puesta en marcha de prácticas científicas. Esto facilita que el alumnado pueda transferir estos conocimientos para inferir la velocidad del proceso en el entorno natural teniendo en cuenta la forma, geometría, estructura y tamaño de los cristales identificados en la naturaleza. Esta aproximación permite el estudio de la formación mineral y la variabilidad a escala de afloramiento y puede usarse como aproximación de las condiciones evaporíticas tanto en entornos de formación subálveos como vadosos.

Abstract

Mineral concept, as a model of defined chemical composition, ordered structure and specific properties, is the foundation for further inferences about the formation conditions for minerals and rocks. The crystallization process conducted in the school laboratory allows for introducing the crystal as a model of an ordered structure (state of minimum energy) but also for isolating and modelling the formation conditions. Therefore, it allows an understanding of the mineral formation conditions that occur in nature, within a much more complex environment. This communication presents an inquiry-based sequence on the crystallization process contextualized in the halite deposit of Remolinos (Zaragoza; Pueyo et al., 2019). The sequence aims to identify changes in salt crystallization as a simplified approximation of the reality of the formation of ionic crystals in evaporitic environments. Students are encouraged to propose, verify, and analyze the possible variables affecting crystal formation in the laboratory through the implementation of scientific practices. This enables students to transfer this knowledge to infer the speed of the process in the natural environment, considering the shape, geometry, structure, and size of crystals identified in the field. This approach allows the study of mineral formation and variability at the outcrop scale, and it can be used as an approximation of evaporitic conditions in both subaqueous and vadose formation environments.

Referencias

Pueyo, Ó., Gracia, J., Revuelto, C.; Ramajo, J., López Julián, P.L., Mandado, J., Gale, C., Pocoví, A. y Querol, E. (2019) “Geolodía 19. Zaragoza. Remolinos: la sal de la vida” Colección Geolodia 19. Sociedad Geológica de España. https://geolodia.es/geolodia-2019/zaragoza-2019/

Cambiando el tono: haciendo más lúdico el aprendizaje sobre el uso de minerales

Changing the mood: gamifying the learning about minerals use

M. Regueiro y González-Barros[1], A. Alonso-Jiménez[2], K. Mezga[3], P. Vrhovnik[3], S. Rosado[4], L. Gullón Corral[4]

1 Vicepresidencia de Relaciones Internacionales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) c/ del Pinar 25. 28006. Madrid. m.regueiro@csic.es 2 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. a.alonso@igme.es 3 Institute SeMe, Environmental Awareness and Sustainable Development, Poljcane, Partizanska street 14, SI-2319 Poljčane, Slovenia. kim@i-seme.si, i-seme@outlook.com 4 Fundación Gómez Pardo. c/Alenza 1. 28003 Madrid. santiago.rosado@fgomezpardo.es, direccion.tecnica@fgomezpardo.es,

Palabras clave: gamificación, minerales, materias primas, minería, herramientas educativas

Resumen

En los últimos años, ha habido un cambio en los métodos de enseñanza, donde los juegos han reemplazado parcialmente los procesos tradicionales de aprendizaje (Kalogiannakis M, Papadakis S, Zourmpakis A. (2021)). Este cambio se debe a tres razones principales: el crecimiento notable de la industria de los videojuegos, el acceso a grandes cantidades de datos a través de las redes sociales y plataformas web para adaptar juegos a los usuarios, y el interés de las compañías de videojuegos en aprender de los usuarios e influenciarlos. La gamificación en la educación ha tenido éxito, por diversas razones como que el juego predispone al aprendizaje y produce sensación de bienestar (Brusi, D & Cornellà P. 2020), y como consecuencia de lo cual muchos estudiantes han desarrollado conductas de interacción repetitivas como refuerzo positivo (Putz L, Hofbauer F, Treiblmaier H. (2020). Prefieren responder preguntas con dispositivos electrónicos y obtener logros virtuales en lugar de estudiar textos o participar en experiencias de laboratorio. Además, el aprendizaje basado en juegos, que es principalmente en línea, permite a los estudiantes competir en tiempo real. "*La maleta didáctica de las aplicaciones de los minerales*" (https://www.thebriefcasegame.eu/) ejemplifica esta nueva tendencia de manera excelente (Alonso-Jiménez, A; Regueiro, M (2021)).

Abstract

In recent years, there has been a shift in teaching methods, where games have partially replaced traditional learning processes (Kalogiannakis M, Papadakis S, Zourmpakis A. (2021)). This change is attributed to three main reasons: the notable growth of the video game industry, access to large amounts of data through social media and web platforms to tailor games to users, and the interest of video game companies in learning from and influencing users. Gamification in education has been successful because students have developed repetitive interaction behaviors as positive reinforcement (Putz L, Hofbauer F, Treiblmaier H. (2020)). They prefer to answer questions with electronic devices and earn virtual achievements rather than study texts or engage in laboratory experiences. Furthermore, game-based learning, primarily conducted online, allows students to compete in real-time. "*The briefcase of mineral application*" (https://www.thebriefcasegame.eu/) is an excellent example of this new trend (Alonso-Jiménez, A; Regueiro, M (2021)).

Referencias

Brusi, D & Cornellà P. (2020). Aprender Jugando. Introducción al monográfico ECT – Vol.28.1 (2020)

Kalogiannakis, M., Papadakis, S. and Zourmpakis, A. (2021). Gamification in Science Education. A Systematic Review of the Literature. Education Sciences. 2021;11(1).

Putz L, Hofbauer F, Treiblmaier H. (2020). Can gamification help to improve education? Findings from a longitudinal study. Computers in Human Behavior. 2020 September 1; 110:106392.

Alonso-Jiménez, A; Regueiro, M (2021) EIT Raw Materials: BRIEFCASE, maletín de aplicaciones minerales. Geotemas (Madrid), ISSN 1576-5172, Nº. 18, 2021 (Ejemplar dedicado a: X Congreso Geológico de España), pág. 613

Herramientas digitales para el aprendizaje inclusivo: virtualización de la práctica de campo de la geología

Digital Tools for Inclusive Learning: Virtualizing Geology Field Practice

I. Rodríguez Santalla[1], S. Martín Velázquez[1], T. Martín Crespo[1], D. Gómez Ortiz[1], M. Abad de los Santos[1], A.R. Fraguas Herráez[1], J.M. López Díaz[2], N. Felgueras Custodio[2], T. Izquierdo Labraca[1] y A. Jiménez Díaz[1]

1 Dpto. Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, URJC. 28933 Móstoles, Madrid. Grupo de Innovación Docente Consolidado para la Difusión y Divulgación de la Geología y del Medio Ambiente, GEODA. inmaculada.rodriguez@urjc.es, silvia.martin@urjc.es, manuel.abad@urjc.es, david.gomez@urjc.es, angela.fraguas@urjc.es, tomas.martin@urjc.es, Tatiana.izquierdo@urjc.es, alberto.jimenez.diaz@urjc.es

2 Dpto. Ciencias de la Educación, Lenguaje, Cultura y Artes, Ciencias Histórico-Jurídicas y Humanísticas y Lenguas Modernas, Facultad de artes y Humanidades, URJC. 28300 Aranjuez, Madrid. Grupo de Innovación Docente Consolidado para el Conocimiento del Medio Ambiente, ICONO. josemaria.lopez@urjc.es, nerea.felgueras@urjc.es

Resumen: Las prácticas de campo son actividades presenciales donde los estudiantes aplican en el campo los conocimientos y habilidades adquiridos en el aula. En el caso de la geología, estas prácticas resultan esenciales en su formación, pues toman contacto con el objeto de estudio. En general, los recorridos que diseñan los profesores tienen en cuenta su interés geológico, pero pocas veces se considera su accesibilidad. En este trabajo se presenta una herramienta informática desarrollada por el Grupo de Innovación Educativa para la Difusión de la Geología y el Medio Ambiente (GEODA) de la Universidad Rey Juan Carlos, diseñada en el marco de la convocatoria de Proyectos de Innovación Educativa 2022/23 y 2023/24 de la universidad. El objetivo principal es el de garantizar el desarrollo y el aprovechamiento de las prácticas de campo a personas que presentan discapacidad física, auditiva, u otro tipo de necesidad educativa especial que dificulte su aprendizaje. Se trata de un recurso educativo abierto en el que, a través de grabaciones de vídeo, imágenes 360º y fotografías de detalle, se ha emulado en una plataforma cartográfica abierta (ArcGIS StoryMaps) una de las prácticas de campo que se desarrollan en la asignatura de Geología de diferentes titulaciones de la URJC. Los resultados de las encuestas realizadas a usuarios son significativamente satisfactorios.

Palabras clave: Geología, prácticas de campo, educación inclusiva, ArcGIS StoryMaps

Abstract: *Field practices are face-to-face activities in which students apply in the field the knowledge and skills acquired in the classroom. In the case of geology, these practices are essential in their training since they contact directly with the object of study. While teachers often design routes of geological interests, accessibility considerations are rarely integrated. This work introduces a computer tool developed by the Educational Innovation Group for the Dissemination of Geology and the Environment (GEODA) of the Rey Juan Carlos University (URJC), designed within the framework of the Educational Innovation Projects 2022/23 and 2023/24 of the URJC. The main objective is to guarantee the development and use of field practices for people with physical or hearing disabilities, as well as those who have special educational needs hindering their learning. This tool is an open educational resource which includes videos, 360º images and detailed photographs of one of the field practices developed in the subject of Geology from different degrees at the URJC. The results of the surveys carried out by the users are significantly satisfactory.*

Key words: *Geology, fieldwork, inclusive education, ArcGIS StoryMaps*

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la geología requiere de métodos propios para aplicar e identificar los contenidos teóricos y prácticos tratados en el aula. El trabajo de campo, entre otros, es una actividad formativa presencial donde los estudiantes aplican sus conocimientos y habilidades en una zona específica. Según Van Loom (2008) la geología se aprende con menos facilidad en los libros de texto en comparación con las otras ciencias naturales. Por lo tanto, formar a los estudiantes en el campo es esencial. El enfoque tradicional de la enseñanza de la geología en términos de prácticas de campo incluye un recorrido con diferentes estaciones o puntos de interés. Por lo general, estos puntos se seleccionan previamente y se describen en una guía que se proporciona a los estudiantes. Es una actividad muy dinámica en la que los estudiantes entran en contacto con el medio, realizan observaciones, y toman datos de las litologías, formaciones y estructuras

geológicas, así como de la geomorfología que conforma el paisaje.

El confinamiento ocasionado por la Covid-19 impidió la realización de estas prácticas de campo, y forzó a preparar materiales audiovisuales que permitieran la realización de estas prácticas de manera virtual (Rodríguez et al., 2021). Esta situación puso en evidencia la necesidad de crear herramientas que permitieran llenar este vacío y sirvieran de apoyo a las clases teórico-prácticas.

Por otra parte, la virtualización de las prácticas de campo permite generar un recurso docente y de aprendizaje en abierto, accesible a toda la comunidad educativa, especialmente si incluyen otros elementos como la interpretación a lengua de signos española o la lectura fácil de los textos. Así, además del apoyo comentado a la docencia presencial, este tipo de herramientas proporcionan un enfoque más transversal, eliminando las barreras de accesibilidad a las zonas de campo y permitiendo la adquisición de competencias en igualdad de oportunidades, independientemente de las limitaciones de los estudiantes. Con estas actividades de virtualización también se abordan las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 4.4, 6.4, 11.4, 11.5, 12.2, 13.3 de la Agenda 2030 de la ONU (www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/).

Con el desarrollo de las plataformas digitales de información geográfica, se han publicado diferentes ejemplos de visualización digital de recorridos geológicos. Algunos de ellos funcionan como una base de datos de lugares de interés geológico, tipo IELIG (https://info.igme.es/ielig/default.aspx), otros como meros recorridos fotográficos (Waterfalls Havasu Canyon, https://apl.maps.arcgis.com/apps/MapTour/index.html?appid=b1abc1f21de74064b01dadab90fce881), otros más completos recogen mapas e información geológica cronológicamente ordenada (https://staridasgeo.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=007b8ebcbfe34bfabf17c486b2445637#), e incluso existen ejemplos de salidas de campo virtuales en el Sistema Central (https://www.ucm.es/salidas-de-campo-virtuales/; Herrero Fernández et al., 2022; Rodríguez et al. 2021).

En este trabajo se presenta la adaptación virtual de uno de los recorridos geológicos formativos más conocidos por los estudiantes de Ciencias Geológicas y ciencias afines en la Comunidad de Madrid. Se trata de la práctica de campo con inicio en Valdepeñas de la Sierra (Guadalajara) y llegada a la zona del Pontón de la Oliva (límite provincial Guadalajara-Madrid). Una de las paradas de esta práctica de campo es una de las formaciones geomorfológicas más relevantes de este territorio: las cárcavas del Monte Guadarrama-Pontón de la Oliva (LIG TM055, https://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?Codigo=TM055). Esta práctica de campo se realiza en la asignatura de Geología de primer curso de los grados de Ciencias Ambientales, Ciencias Experimentales, Biología, Ingeniería de la Energía, Ingeniería Ambiental y Recursos Hídricos impartidos en la Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología (ESCET) de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC). El recorrido tiene una distancia de 9 km, un desnivel de 240 m, y unas pendientes máximas en ascenso y descenso de 15 % y -40 %, respectivamente. Consta de 6 paradas, 5 de ellas en los taludes de la carretera comarcal GU-1066 que une los pueblos de Valdepeñas de la Sierra y Alpedrete de la Sierra, y una última parada tras un tramo de 4 km por caminos de tierra en dirección SO hasta el paraje de las cárcavas. Desde este punto se desciende primero por una senda y después por una pista asfaltada hasta el Pontón de la Oliva. Estas características condicionan la realización de esta ruta no circular tanto a personas con discapacidad física o auditiva, como en situaciones de climatología adversa. El objetivo de la herramienta que aquí se presenta es permitir que esta actividad pueda ser abordada sin necesidad de ir al campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La aplicación se ha desarrollado en la plataforma ArcGIS Story Maps (aplicación de creación de historias basada en web, https://storymaps.arcgis.com/), por su versatilidad y capacidad para incorporar información gráfica y asociarla a elementos cartográficos, así como por ser un recurso digital con licencia en la URJC.

En la elaboración de los materiales se ha seguido el procedimiento habitual de las prácticas de campo presenciales, manteniendo la premisa de que el estudiantado desarrolle habilidades de observación del paisaje, identifique minerales y rocas, reconozca estructuras geológicas, y deduzca los procesos geológicos y su temporalidad relativa. Como paso previo a las visitas al campo, en las que se ha registrado todo el material gráfico, se prepararon los guiones de cada uno de los puntos de observación de los afloramientos o paradas. Ya en el campo, se realizaron los trabajos de adquisición de material gráfico en cada una de las paradas: i) grabación de un vídeo con la explicación resumida del contenido tratado habitualmente por el docente en la práctica de campo presencial; ii) adquisición de imágenes de 360º para contextualizar el entorno; y iii) adquisición de fotografías de detalle de los puntos singulares del afloramiento. Todo el material grabado en campo ha sido tratado posteriormente con el fin de ajustar los formatos a los requerimientos que presenta la plataforma Story Maps. Los textos y gráficos se han incorporado a la plataforma utilizando tipografías de letra y formatos adaptados al Diseño Universal (Alba Pastor, 2019), asegurando así su accesibilidad para el mayor número posible de personas. Un rasgo novedoso, que aporta un claro valor añadido a esta aplicación, es que se ha incorporado la figura del intérprete en lengua de signos española en cada uno de los vídeos. Este recurso proporciona una comprensión adecuada e inclusiva de los afloramientos y una aproximación a las prácticas de campo también a alumnos con hipoacusia o discapacidad auditiva.

Para comprobar el impacto de la herramienta se ha incluido en la aplicación una encuesta con una serie de ítems que preguntan sobre su utilidad y calidad de los materiales educativos digitales según la Norma UNE 71362 (AENOR, 2020).

RESULTADOS

Tanto las descripciones geológicas como el material audiovisual adquirido en campo se han incorporado a la plataforma digital ArcGIS Story Maps, de manera que pueda ser visualizado en cualquier dispositivo: ordenador, tablet e incluso teléfono móvil. Esta versatilidad permite acceder fácilmente a los contenidos geológicos elaborados.

El enlace a la aplicación "Virtualización de las prácticas de campo de Geología: Una aproximación a la educación inclusiva" es el siguiente (Fig. 1): https://storymaps.arcgis.com/stories/f3a5b0b37aef4a4f8b926969d2280595.

Todo el material se ha organizado en los siguientes apartados: Presentación del proyecto, Objetivos, Contexto geológico (Fig. 2) y cada una de las 6 paradas del recorrido (Fig. 3). En esta aplicación se pueden reconocer distintas litologías. Las más antiguas son rocas metamórficas paleozoicas (paradas 1 y 3) afectadas por la orogenia Varisca, que originó importantes relieves. Los procesos externos erosionaron estos relieves hasta que, en el Cretácico, toda la zona quedó sumergida por el mar (transgresión marina). En esta etapa se depositaron sedimentos marinos típicos de costas tropicales, que dieron lugar a rocas detríticas y carbonatadas (paradas 2, 4 y 5). Durante la orogenia Alpina (Cenozoico) se produjo la retirada paulatina del mar (regresión marina), y el plegamiento y fracturación de todas las rocas anteriores. Conforme los relieves se iban elevando también se iban erosionando, originando depósitos de abanico aluvial (parada 6) a los pies de los torrentes. Actualmente, toda la zona está siendo modelada por los ríos Lozoya y Jarama, dejando sucesivas terrazas fluviales. Cursos de aguas torrenciales están desmantelando las laderas, y han generado profundos barrancos en los materiales paleógenos-neógenos dando lugar a la formación de cárcavas (parada 6). Estos mismos cursos están provocando la disolución de los materiales carbonatados cretácicos, desarrollando cavidades y espeleotemas kársticos.

Los resultados obtenidos en la encuesta habilitada para evaluar la calidad y utilidad de la aplicación arrojan porcentajes significativamente altos. El 88% de las personas que han respondido opinan que este recurso docente permite sustituir las prácticas de campo en el caso de que no se puedan realizar debido a cuestiones sobrevenidas (meteorología adversa, enfermedad, etc.). La valoración de los ítems relacionados con la calidad de los contenidos, accesibilidad, interactividad, innovación, formato y diseño alcanza una puntuación de 4,15 sobre 5. La clasificación global de la herramienta es de 8,88 sobre 10.

Actualmente, los miembros del Grupo de Innovación Docente GEODA continúan desarrollando los contenidos, incluyendo nuevas paradas para que este recurso pueda ser utilizado en un mayor número de asignaturas, tanto de la URJC como de otras universidades que también realizan prácticas de campo en esta zona. Además, los autores están incorporando nuevas herramientas como la adaptación a Lectura Fácil de los textos explicativos de cada parada, con la finalidad de mejorar la accesibilidad. De esta forma, se pretende mejorar los ítems que habían obtenido valoraciones no tan positivas en la encuesta.



FIGURA 1. *Carátula inicial del recorrido geológico desarrollado con ArcGIS Story Maps.*



FIGURA 2. *Ejemplo de la localización geográfica (imagen superior) y contexto geológico (imagen inferior) de las paradas.*



FIGURA 3. *Ejemplo de la información geológica que se proporciona en cada parada (en este caso, parada 1): imagen 360º (imagen superior), fotografías de detalle con textos explicativos (imagen intermedia) y vídeo explicativo con interpretación a lengua de signos española (imagen inferior).*

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, la aplicación "Virtualización de las prácticas de campo de Geología: Una aproximación a la educación inclusiva" (https://storymaps.arcgis.com/stories/f3a5b0b37aef4a4f8b926969d2280595) se presenta como una herramienta muy útil para la realización y el aprovechamiento docente de prácticas de campo en condiciones de poca o ninguna accesibilidad física. No solo apoya la docencia presencial, sino que también proporciona un enfoque transversal, eliminando las barreras de accesibilidad a las zonas de estudio en campo y promoviendo la igualdad de oportunidades para la adquisición de habilidades geológicas, independientemente de las limitaciones. Además, aborda algunas de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) esbozados en la Agenda 2030, especialmente el Objetivo 4 (educación de calidad).

AGRADECIMIENTOS

Esta acción se ha desarrollado con los proyectos "Virtualización de las prácticas de campo de Geología: Un enfoque hacia la educación inclusiva" y "Acciones de mejora del proyecto piloto de virtualización de las prácticas de campo de geología: una aproximación a la educación inclusiva", financiados parcialmente por la Universidad Rey Juan Carlos a través de los Proyectos de Innovación Educativa 2022/23 y 2023/24.

REFERENCIAS

Alba Pastor, A. (2019): Diseño universal para el aprendizaje: un modelo teórico-práctico para una educación inclusiva de calidad. *Participación Educativa*, 6 (9): 55-66.

Herrero Fernández, M.J., Alvarez Gómez, J. A., La Horra del Barco, R.; Escavy Fernández, J.I., Fregenal Martínez, M. A., Galindo Aires, R., Insua Arévalo, J. M., Jiménez Molina, D., López Acevedo, F. J., Martínez Díaz, J., Menéndez-Pidal de Navascues, I., Morellón Marteles, M., Pérez Fortes, P., Sánchez Moya, Y., Sopeña Ortega, A., Trigos Luque, L., Sanz De Ojeda, J., Sanz Pérez, E. Varas Muriel, M. J. (2022): Innovación en contenidos virtuales vía tecnologías digitales: modelos geológicos 3D y salidas de campo virtuales en asignaturas de ciencias de la Tierra. En: *Jornada «Aprendizaje Eficaz con TIC en la UCM»* (L. Hernández Yáñez, coord.). Universidad Complutense de Madrid, 505-515.

AENOR (2020): Norma UNE 71362: Calidad de los materiales educativos digitales. (https://intef.es/formacion/educacion-digital-de-calidad/une-71362/).

Rodríguez, I., Navarro, N., de Luis, O., Llorente, I., Vila, R., Abad, M. y Fraguas, A. (2021): Ejemplos de acciones urgentes de virtualización para desarrollo de prácticas y salidas al campo durante el confinamiento de 2020. En: *Estrategias de adaptación metodológica y tecnológica ante la pandemia del COVID-19 en la universidad. (1st ed.)* (C. C. Taladriz, N. E. Sánchez, O. Borrás-Gené, D. B. Jiménez y M. del Carmen Gálvez de la Cuesta, eds.). Dykinson, S.L., 333-350.

Van Loom, A.J. (2008): Geological education of the future. *Earth-Science Reviews*, 86: 247-254.

“Volcanes y Dinosaurios”: un divertido juego para aprender Geología.

“Volcanoes and Dinosaurs”: a funny game to learn Geology.

A. Ruiz-Constán[1,2], B. Martínez-García[1,3], D. Sanz-Pérez[1,4,5], M. Chamizo-Borreguero[1] y R. Martín-Banda[1,6]

1 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
2 Instituto Geológico y Minero de España, Urbanización Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es
3 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
4 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. dasanz01@ucm.es
5 Departamento de Geología Sedimentaria y Cambio Ambiental, Instituto de Geociencias (IGEO-UCM), 28040 Madrid.
6 Instituto Geológico y Minero de España, Plaza España, S/n, 41013 Sevilla. r.martin@igme.es

Palabras clave: aprendizaje basado en juegos, pioneras de la Geología, juegos científicos

Resumen

El aprendizaje científico basado en juegos se ha convertido en una útil herramienta didáctica para complementar el currículo educativo en los cursos preuniversitarios, ya que permite que el alumnado adquiera conocimientos básicos de manera divertida. Por este motivo, la Comisión Mujeres y Geología ha desarrollado el juego “Volcanes y Dinosaurios”, basado en el juego clásico de “Serpientes y Escaleras”. Consiste en un tablero gigante con piezas de tatami y un dado de espuma, donde los dinosaurios permiten avanzar desde la cola hasta la cabeza y los volcanes obligan a descender por la lava. Este gran formato hace que las personas actúen como fichas andando sobre el tablero, pudiendo jugar de manera individual o por equipos. Además, a lo largo de las casillas se distribuyen dibujos plastificados que representan las vicisitudes a las que se enfrentan los grupos de investigación, de tal forma que las positivas permiten volver a tirar el dado y las negativas obligan a esperar un turno. En el caso de los retratos de pioneras de la geología los y las participantes deben completar unas pruebas relacionadas con las disciplinas a las que se dedicaban, que pueden adaptarse al nivel de conocimiento de base del estudiantado desde Educación Infantil a Bachillerato. Gracias a este juego, el alumnado descubre la dinámica de los equipos de investigación en geología, normaliza la presencia femenina en ciencias, conoce a las mujeres que nos abrieron camino y recibe unos conocimientos básicos en Ciencias de la Tierra de manera lúdica. “Volcanes y Dinosaurios” cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Abstract

Game-based scientific learning has become a useful teaching tool to complement the educational curriculum in pre-university courses, since it allows students to acquire basic knowledge in a fun way. For this reason, the Women and Geology Commission has developed the game “Volcanoes and Dinosaurs”, based on the classic game “Snakes and Ladders”. It consists of a giant board with tatami pieces and a foam die, where the dinosaurs allow to advance from the tail to the head and the volcanoes force to descend through the lava. This large format makes people act as pieces walking on the board, being able to play individually or in teams. In addition, laminated drawings are distributed throughout the boxes that represent the vicissitudes faced by the research groups, in such a way that the positive ones allow the die to be rolled again and the negative ones force them to wait a turn. In the case of the portraits of geology pioneers, participants must complete tests related to the disciplines to which they were dedicated, which can be adapted to the level of basic knowledge of the students from Early Childhood Education to Baccalaureate. Thanks to this game, students discover the dynamics of geology research teams, normalize the female presence in science, meet the women who paved the way for us, and receive basic knowledge in Earth Sciences in a playful way. “Volcanoes and Dinosaurs” has the collaboration of the Spanish Foundation for Science and Technology - Ministry of Science, Innovation and Universities.

Mi primer Geolodía: el reto de llegar al público de infantil y primaria

My first Geoloday: the challenge of reaching kindergarten and primary school audiences

A. Ruiz-Constán[1,2], B. Martínez-García[1,3], D. Sanz-Pérez[1,4,5], M. Chamizo-Borreguero[1], R. Martín-Banda[6], I. Pérez-Cáceres[1,7], R. Soto[8], A. Lucía[9] y D. Díez-Canseco[10]

1 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Urbanización Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es
3 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
4 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. dasanz01@ucm.es
5 Departamento de Geología Sedimentaria y Cambio Ambiental, Instituto de Geociencias (IGEO-UCM), 28040 Madrid.
6 Instituto Geológico y Minero de España, Plaza España (IGME,CSIC), s/n, 41013 Sevilla. r.martin@igme.es
7 Cámara Oficial Mineira de Galicia. Rua Juana Capdevielle 2 (Edificio Expocoruña), 15008 A Coruña. irepcaceres@gmail.com
8 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Campus Aula Dei. Av. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. r.soto@igme.es
9 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), c/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.lucia@igme.es
10 Departamento de Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente, Facultad de Ciencias II, Universidad de Alicante, 03080 Alicante. davinia.diezcanseco@ua.es

Palabras clave: talleres, salida de campo, público infantil y de primaria

Resumen

Geolodía es una iniciativa de divulgación consistente en excursiones guiadas por profesionales de la geología que se celebra a nivel nacional desde 2010, coordinado por la Sociedad Geológica de España, en todas las provincias. Al Geolodía acude público muy diverso y el contacto personal directo durante los recorridos permite adaptar las explicaciones a la variedad de asistentes y a sus conocimientos geológicos previos. Las encuestas realizadas tras la actividad señalan que la fórmula funciona y muestra de ello es que cada año asisten unas 9000 personas. Aun así, el segmento de la población comprendido entre 3 y 12 años es minoritario. Por ello, en 2023 la Comisión Mujeres y Geología decidió crear Mi primer Geolodía, una jornada en la que trasladar conceptos geológicos básicos e información sobre la historia geológica de su entorno a las y los más pequeños mediante diversos formatos: talleres, juegos, recorridos de campo, charlas, teatro, manualidades, cuentacuentos... En 2023, se celebró la primera edición en la provincia de Granada y en 2024 se ha extendido a otras 5 provincias (Alicante, Lugo, Madrid, Segovia, Zaragoza). Mi primer Geolodía cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Abstract

Geoloday is an outreach initiative consisting of excursions guided by geology professionals that has been held nationally since 2010, coordinated by the Geological Society of Spain, in all provinces. A very diverse audience comes to Geoloday and the direct personal contact during the tours allows the explanations to be adapted to the variety of attendees and their previous geological knowledge. The surveys carried out after the activity indicate that this formula works and proof of this is that about 9,000 people attend each year. Even so, the segment of the population between 3 and 12 years old is a minority. For this reason, in 2023 the Women and Geology Commission decided to create My First Geoloday, a day in which to transfer basic geological concepts and information about the geological history of their environment to the youngest children through various formats: workshops, games, field trips, talks, theater, crafts, storytelling... In 2023, the first edition was held in the province of Granada and in 2024 it was spread to 5 other provinces (Alicante, Lugo, Madrid, Segovia, Zaragoza). My first Geoloday has the collaboration of the Spanish Foundation for Science and Technology - Ministry of Science, Innovation and Universities.

GEAS Mujeres que estudian la Tierra

GEAS Women who study the earth

A. Ruiz-Constán[1,2], R.M. Mateos[1,2], B. Martínez-García[1,3], R. Martín-Banda[1,4], M. González[5], M. Chamizo Borreguero[1], D. Ponce de León[6], H. Aguilera[7] y C. Ayala[8]

1 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Urb.Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es; rm.mateos@igme.es
3 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
4 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) Plaza de España-Torre Norte. 41013 Sevilla r.martin@igme.es
5 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) Parc de Montjuïc s/n. 08038 Barcelona marta.gonzalez@icgc.cat
6 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) C. La Calera, 1. 28760 Tres Cantos (Madrid)
7 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) C. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid h.aguilera@igme.es
8 Geociencias Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. cayala@geo3bcn.csic.es

Palabras clave: libro ilustrado, exposición itinerante, pioneras, mujeres y geología

Resumen

"GEAS: Mujeres que estudian la Tierra" es un libro divulgativo ilustrado que nos invita a viajar en el tiempo para dar voz a 12 geólogas de épocas, contextos históricos y nacionalidades diferentes, pero con un denominador común: con sus logros científicos y su testimonio vital retaron a la sociedad de su época para avanzar en el difícil camino de la Ciencia. Publicado en español en 2021, recibió una gran acogida por parte de la comunidad de Geociencias europea y ha sido traducido a 16 idiomas en el marco del Proyecto ENGIE de la Federación Europea de Geólogos (búlgaro, croata, checo, esloveno, francés, griego, húngaro, inglés, italiano, portugués, serbio, turco, ucraniano) y de la Comisión Mujeres y Geología de la Sociedad Geológica de España (catalán, gallego, euskera). En paralelo se diseñó una exposición consistente en 7 paneles donde se detallan los principales hitos biográficos de cada una de las pioneras, disponible en 3 idiomas (español, catalán e inglés) y de la que existen varias copias itinerantes gestionadas por diversas instituciones (Instituto Geológico y Minero de España, Instituto Cartográfico de Cataluña, Geociencias Barcelona, Ciencia en el Barrio e Instituto Politécnico Nacional de México) y que pueden solicitarse gratuitamente. Además, el proyecto ha generado diferentes recursos (juegos virtuales tipo breakout educativo, charlas, poesía, teatro…) que han permitido trabajar las biografías con alumnado de diversas edades (desde centros educativos de infantil hasta universitarios).

Abstract

"GEAS: Women who study the Earth" is an illustrated informative book that invites us to travel in time to give voice to 12 geologists from different periods, historical contexts and nationalities, but with a common denominator: with their scientific achievements and their vital testimony they challenged to the society of their time to advance on the difficult path of Science. Published in Spanish in 2021, it received a great reception from the European Geosciences community and has been translated into 16 languages within the framework of the ENGIE Project of the European Federation of Geologists (Bulgarian, Croatian, Czech, Slovenian, French, Greek, Hungarian, English, Italian, Portuguese, Serbian, Turkish, Ukrainian) and the Women and Geology Commission of the Geological Society of Spain (Catalan, Galician, Basque). In parallel, an exhibition was designed consisting of 7 panels detailing the main biographical milestones of each of the pioneers, available in 3 languages (Spanish, Catalan and English) and of which there are several traveling copies managed by various institutions (Instituto Geológico y Minero de España, Instituto Cartográfico de Cataluña, Geociencias Barcelona, Ciencia en el Barrio and Instituto Politécnico Nacional de México) and which can be requested free of charge. In addition, the project has generated different resources (virtual break-out games, talks, poetry, theater...) that have allowed the biographies to be worked on with students of various ages (from preschool to university education).

“Game of Stones”: ¿Quieres descubrir cuánto sabes de Geología?

"Game of Stones": Want to find out how much you know about Geology?

D. Sanz-Pérez[1,2,3], A. Ruíz Constán[3,4], B. Martínez García[3,5], M. Chamizo Borreguero[3], R. Martín-Banda[3,6]

1 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. dasanz01@ucm.es
2 Departamento de Geología Sedimentaria y Cambio Ambiental, Instituto de Geociencias (IGEO-UCM), 28040 Madrid, España.
3 Comisión Mujeres y Geología, Sociedad Geológica de España. Pz. de la Merced s/n, 37008, Salamanca. mujeresygeologia@gmail.com
4 Instituto Geológico y Minero de España, Urbanización Alcázar del Genil 4, 18006 Granada. a.ruiz@igme.es
5 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Centro Geo-Q, Mendibile kalea, 48940 Leioa, Bizkaia. blancamaria.martinez@ehu.eus
6 Instituto Geológico y Minero de España, Plaza España, s/n, 41013 Sevilla. r.martin@igme.es

Palabras clave: trivial, divulgación, educación, ciencias de la Tierra, videojuego.

Resumen

"*Game of Stones*" es un videojuego diseñado para servir como herramienta didáctica y recurso adicional de las asignaturas de los planes de estudio preuniversitarios. Su principal objetivo es ampliar y fortalecer los conceptos científicos del alumnado. La Comisión Mujeres y Geología de la Sociedad Geológica de España desarrolló este juego online en formato trivial en 2022 enmarcado en el proyecto Geolodía. Contiene 240 preguntas de múltiple respuesta, organizadas en seis categorías que abarcan todas las disciplinas geológicas. Cada categoría está representada por una “Gema de la Sabiduría” y el objetivo principal del juego es reunirlas todas. Para lograrlo, cada participante debe acertar una pregunta de cada categoría y superar una ronda final de 6 preguntas. El juego permite la participación de uno a seis jugadores simultáneamente, y su dinámica está diseñada para ser más rápida que la de un trivial tradicional, permitiendo que las partidas se realicen en la duración de una clase típica de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato. "*Game of Stones*" se ha convertido en una herramienta de divulgación geológica ampliamente aceptada tanto por docentes como por el público general, sin restricciones de edad ni conocimiento científico previo, lo que la posiciona como un modelo a seguir para otras iniciativas didácticas similares. Este videojuego cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología - Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Abstract

"Game of Stones" is a video game designed to serve as a teaching tool and additional resource for pre-university curriculum subjects. Its main objective is to expand and consolidate the scientific concepts of the students. The Women and Geology Commission of the Geological Society of Spain developed this online game in trivial format in 2022 as part of the Geolodía project. It contains 240 multiple-choice questions organized into six categories covering all geological disciplines. Each category is represented by a "Gem of Knowledge" and the game's main objective is to gather them all. To achieve this, each participant must correctly answer a question from each category and pass a final round of 6 questions. The game allows the participation of one to six players simultaneously, and its dynamic is designed to be faster than traditional Trivial, allowing the games to be played in the duration of a typical class of Obligatory Secondary Education and Baccalaureate. "Game of Stones" has become a geological outreach tool widely accepted by both teachers and the general public, without age restrictions or prior scientific knowledge, which positions it as a model to follow for other similar educational initiatives. This game has the collaboration of the Spanish Foundation for Science and Technology - Ministry of Science, Innovation and Universities.

El Corte Geológico de un Valle Fluvial: Secuencia de Procesos Cuaternaria

The Geological Cross-section of a Fluvial Valley: The Establishment of the process sequence during the Quaternary

P.G. Silva[1], E. Roquero[2] y T. Bardají[3]

1 Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca. 05003-Ávila, España. pgsilva@usal.es
2 Dpto. Edafología, E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. elvira.roquero@upm.es
3 Dpto. Geología, Geografía y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá 28871 Madrid. teresa.bardaji@uah.es

Palabras clave: Terrazas fluviales, Dataciones, Paleontología, Registro lítico, Cuaternario.

Resumen

Los cortes geológicos constituyen una herramienta básica en el aprendizaje de la Geología que se han implantado en los estudios de secundaria y los primeros cursos de diferentes grados universitarios relacionados con las *Ciencias de La Tierra*. A partir de estos cortes geológicos se deduce la historia geológica de la zona, que suele abarcar varias épocas geológicas y contienen grandes discordancias, intrusiones magmáticas, fallas, etc., que complican la secuencia de procesos a extraer. No obstante, en este tipo de ejercicios se le ofrece muy poca importancia al Periodo Cuaternario, el cual como mucho aparece como el relleno homogéneo de un valle, que pone la guinda final a la historia geológica que se cuenta. La práctica que se propone consiste en desarrollar la historia geológica cuaternaria a través de la construcción de un valle fluvial a partir de un corte geológico y geomorfológico transversal del mismo. Para ello hay que utilizar criterios geomorfológicos básicos sobre los procesos de encajamiento y sedimentación involucrados en la construcción de terrazas fluviales, así como el conjunto de datos geocronológicos (OSL, ESR, Th/U) y paleomagnéticos que contiene el mismo. Se incluyen datos sobre fósiles cuaternarios (vertebrados y humana), industrias líticas y desarrollo edáfico (tipos de suelos) que comúnmente se han utilizado en la cronología relativa de valles fluviales. En definitiva, se trata de realizar la secuencia de procesos que ha generado el valle e identificar y datar los episodios de deformación, vulcanismo y otros que se observan en el corte. Se proponen tres niveles de dificultad (1.0, 2.0 y 3.0 Pro) todos ellos se han venido utilizando en las asignaturas de Geomorfología impartidas en la Universidad de Salamanca y el 3.0 Pro se utiliza en la asignatura de *"Cuaternario y Geomorfología Tectónica"* incluida en el Máster Universitario en *"Geología Ambiental y Aplicada"* de esta universidad.

Abstract

The geological cross-sections are a basic tool in the learning of Geology largely used in high school studies and the first courses of different university degrees related to Earth Sciences. From these sections the geological history of the area can be deduced, which usually covers several geological periods and contain large unconformities, magmatic intrusions, faults, etc., that complicate the sequence of processes to be deduced. However, in this type of exercises very little importance is given to the Quaternary Period, which at most appears as the homogeneous filling of a valley, being the "cherry on top" ending the conventional geological histories. The proposed exercise involves the deduction of the Quaternary history of a valley from a geological and geomorphological cross-section across the valley. For this, basic geomorphological criteria on the processes and assemblages involved in the deposit of fluvial terraces must be used, as well as the geochronological (OSL, ESR, Th/U) and paleomagnetic dataset contained in the section. It also includes data on Quaternary fossils (vertebrates and humans), lithic industries and soil types commonly used in the establishment of relative chronologies of fluvial valleys. In short, the proposed exercise is focused to the establishment of the sequence of processes that have generated the valley, and to identify and date the episodes of deformation and interference of volcanism observed in the sections. Three levels of difficulty are proposed (1.0, 2.0 and 3.0 Pro), all of them have been used in the teaching of Geomorphology at the University of Salamanca. The 3.0 Pro version is used in the course on *"Quaternary and Tectonic Geomorphology"* included in the Master on *"Applied and Environmental Geology"* of this university. *This contribution is included in the outreach products of the Research Project I+D+i PID2021-123510OB-I00 (USAL) funded by the MICIN AEI/10.13039/501100011033/.*

El cuento “Roqui, la piedra”; un recurso didáctico de Geología en Educación Infantil

The story “Roqui, the stone”; an educational tool in Geology in Early Childhood Education

R. Soto[1], G. Mendoza[2] y M. Casillas[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Av. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. r.soto@igme.es
2 Bolboreta Press, Espacio Harinera Zgz, Av. San José 201, 50007 Zaragoza. guillermo.menrem@gmail.com
3 CEIP Basilio Paraíso, C/ Mariano Supervía 29, 50006 Zaragoza. mcasillas@educa.aragon.es

Palabras clave: recurso didáctico, Educación Infantil, divulgación, cuento, elementos y procesos geológicos

Resumen

El descenso de la Geología en los diseños curriculares de todos los niveles educativos hace necesario un cambio de estrategia para que su divulgación se diversifique y aumente. El cuento “Roqui, la piedra” se presenta como un recurso didáctico en Educación Infantil (estudiantes de 3 a 5 años) para trabajar con varios elementos (e.g. rocas, montañas, río, lago y mar) y procesos geológicos (e.g. dinámica fluvial, erosión y depósito). Su contenido conecta curricularmente con el Real Decreto 95/2022, de 1 de febrero, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de Educación Infantil (LOMLOE, 2020), con las competencias clave y específicas establecidas, y con los saberes básicos propios de las áreas a través de las cuales se organizan los contenidos educativos de esta etapa. El cuento “Roqui, la piedra” como instrumento didáctico permitirá potenciar la escucha activa, memoria e imaginación del alumnado y ayudar a construir su percepción del entorno natural que les rodea desde edades más tempranas. El cuento está disponible de forma gratuita en formato pdf en https://guillermomendoza.es/Roqui-la-piedra.

Abstract

The decrease of Geology in the curricular designs of all educational levels makes necessary to change the strategy so that its dissemination diversifies and increases. The story "Roqui, the stone" is presented as a didactic resource in Early Childhood Education (students from 3 to 5 years old) to work with several geological elements (e.g. rocks, mountains, river, lake and sea) and processes (e.g. fluvial dynamics, erosion and deposition). Its content connects curricularly with the Royal Decree 95/2022, of February 1, which establishes the organization and minimum teaching for Early Childhood Education (LOMLOE, 2020); the keys and specific competences and the basic knowledge of the areas through which the educational contents of this stage are organized. The story "Roqui, the stone" as a didactic tool will allow to promote active listening, memory and imagination of students and help build their perception of the natural environment that surrounds them from an early age. The story is available free of charge in pdf format at https://guillermomendoza.es/Roqui-la-piedra.

Referencias

LOMLOE (2020). Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación (BOE de 30/12/2020).

Progresión de modelos escolares sobre la teoría de la evolución

Progression of school models on the theory of evolution

D. Torromé Sanz[1], Á.L. Cortés Gracia[2] y B. Mazas Gil[2]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza. dtorrome@gmail.com
2 Departamento de Didácticas Específicas, Facultad de Educación, Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza. bmazas@unizar.es, acortes@unizar.es

Palabras clave: Evolución; Modelos; Didáctica de la Geología, Educación Secundaria Obligatoria.

Resumen

El uso de modelos y la modelización forman parte de un tipo de prácticas científicas fundamentales para la adecuada construcción del conocimiento científico escolar (Gilbert, 2004; Oliva, 2019). En el caso de los procesos de enseñanza y aprendizaje de temas como la teoría de la evolución, las características de los seres vivos (o de sus restos fósiles) o los rasgos adaptativos, las destrezas asociadas al uso y comprensión de los modelos nos permiten describir, explicar o predecir cuestiones difícilmente abordables sin la ayuda de los mismos. Del mismo modo, el análisis de los modelos expresados por el alumnado y el nivel de complejidad alcanzado en los mismos es imprescindible para una adecuada evaluación del aprendizaje (Grünkorn et al., 2014). En este trabajo se presentan ejemplos de la progresión de modelos escolares relacionados con la teoría de la evolución a lo largo de una intervención didáctica en aulas de 4º de ESO en la que se recogen producciones del alumnado. Se parte de los modelos iniciales (M0) que el alumnado usa para describir y explicar hechos o fenómenos hasta alcanzar unos modelos finales (MF) más complejos y coherentes con los referentes científicos.

Abstract

The use of models and modelling are part of a type of scientific practices that are fundamental for the adequate construction of school scientific knowledge (Gilbert, 2004; Oliva, 2019). In the case of teaching and learning processes of topics such as the theory of evolution, the characteristics of living beings (or their fossil remains) or adaptive traits, the skills associated with the use and understanding of models allow us to describe, explain, or predict issues that are difficult to address without their help. Likewise, the analysis of the models expressed by the students and the level of complexity reached in them is essential for an adequate evaluation of learning (Grünkorn et al., 2014). This work presents examples of the progression of school models related to the theory of evolution throughout a didactic intervention in the 4th year of Compulsary Secondary Education classrooms in which productions of students are collected. It starts from the initial models (M0) that students use to describe and explain facts or phenomena until reaching final models (MF) that are more complex and coherent with scientific references.

Referencias

Gilbert, J.K. (2004). *International Journal of Science and Mathematics Education*, *2*, 115-130. https://doi.org/br8zhh

Grünkorn, J., Upmeier zu Belzen, A. and Krüger, D. (2014). *International Journal of Science Education*, *36*, 1651–1684. https://doi.org/gqndpw

Oliva, J. M. (2019). *Enseñanza de las ciencias*, *37*(2), 5-24. https://doi.org/mggc

El Mapa del mes: una iniciativa para la divulgación de la cartografía geocientífica del IGME.

The Map of the month: an initiative for the dissemination of IGME's geoscientific mapping.

L. Vega Martín[1], T. Orozco Cuenca[1] y A. Prieto Martín[2]

1 Servicio de Cartografía Digital. Área de Sistemas de Información Geológica, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. l.vega@igme.es, t.orozco@igme.es
2 Unidad de Desarrollo y Difusión de Sistemas de Información. Área de Sistemas de Información Geológica, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.prieto@igme.es

Resumen: La iniciativa "Mapa del mes", puesta en marcha el año pasado por el Servicio de Cartografía Digital del C. N. Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), tiene por finalidad dar más visibilidad a la colección de mapas disponibles en el Portal de cartografía digital, punto de acceso a la cartografía en formato digital del IGME. La idea es mostrar cada mes un mapa de la colección relacionándolo con un día destacado del calendario. El mapa va acompañado por un texto de un máximo de 4 párrafos cortos, donde se explique la razón por la que se ha seleccionado y la relación con alguna de las áreas de actividad del IGME (geología, aguas subterráneas, recursos mineros, riesgos geológicos, etc.).

Palabras clave: Cartografía digital, Divulgación científica, Portal web, Redes sociales

Abstract: *The "Map of the month" initiative, launched last year by the Digital Mapping Service of the Geological and Mining Institute of Spain (IGME-CSIC), aims to showcase the collection of maps available in the cartography portal, point of access to IGMEs digital cartography. The objective is showing a map each month, related to a standout date. Alongside the map, there is a 3 or 4 paragraph text explaining the reasons why that map was selected and the relationship with the different areas of activity of the IGME (geology, groundwater, mining resources, geological risks, etc.).*

Key words: *Digital mapping, Scientific dissemination, Web portal, Social Media*

INTRODUCCIÓN

A lo largo de sus 175 años de historia, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) ha generado un gran volumen de información geocientífica: mapas, inventarios, bases de datos, informes, memorias, etc. Hasta finales del siglo XX, toda esta información quedaba plasmada en formato papel cuya difusión se materializaba a través del Servicio de Publicaciones o del Centro de Documentación (Hernández, 2015). La digitalización de mucha información e Internet han facilitado la transferencia de esta información a la sociedad y su reutilización.

De toda la información digital que ofrece el IGME, la más demandada es la cartografía. Esta cuenta con un portal web que facilita la localización de la información cartográfica y permite el acceso a los mapas, tanto singulares como a aquellos que componen las series y atlas producidas por el IGME, en distintos formatos (https://info.igme.es/cartografiadigital/). También da acceso a las memorias, información complementaria, los metadatos que describen los datos, los servicios de mapas y visores que facilitan su visualización y consulta y cualquier información disponible de interés.

El responsable de este portal es el Servicio de Cartografia Digital que además tiene entre sus funciones impulsar la difusión y reutilización de los mapas recogidos en el portal. Por ello, en enero de 2023, puso en marcha la iniciativa "Mapa del mes" que nace con el objetivo de difundir y profundizar en el conocimiento de las Ciencias de la Tierra a través de los mapas disponibles en la colección de cartografía digital que gestiona.

Esta iniciativa muestra una selección mensual, de entre aquellos mapas en formato digital, relacionado con alguna de las áreas de actividad del IGME (geología, aguas subterráneas, recursos mineros, riesgos geológicos, etc.). Aunque las posibilidades de esta iniciativa son muchas (historia de los mapas, testimonios de especialistas, interacción con la audiencia, etc.), se decidió comenzar con un planteamiento modesto, tanto en el número de personas implicadas como en la definición de objetivos. Así, simplemente se ha añadido una nueva sección dentro del Portal de cartografía digital (http://info.igme.es/cartografiadigital/portada/mapa-del-mes.aspx) y se establecieron tres premisas:

1. Centrar la propuesta en aquello que pudiéramos acometer con medios propios, es decir, la cartografía disponible en el Portal de cartografía digital.

2. Acompañar al mapa con un texto explicativo que no sobrepase los 3 o 4 párrafos cortos.

3. Focalizar la temática entorno a un hilo conductor general comprensible para un usuario no especialista pero que a la vez sea flexible para adaptarse a los mapas del Portal de cartografía.

Como resultado la mayoría de los mapas del mes se han relacionado con días destacados del calendario, principalmente los días mundiales o internacionales, dando prioridad al de las Comunidades Autónomas y a los temáticos relacionados con las Ciencias de la Tierra. La tabla I recoge las entradas para cada uno de los doce meses del 2023.

MES	IDEA TEMÁTICA	MAPA SELECCIONADO
ENERO	Mapa más visitado en la web en 2022	MAGNA50 (2ª serie) Hoja 559 - Madrid
FEBRERO	Día Mundial de los Humedales	Mapa de clasificación geohidrológica y de servicios ecosistémicos de humedales costeros mediterráneos
MARZO	Día Mundial del Agua	Mapa Hidrogeológico de España 1:200.000. Hoja 29 - Valladolid
ABRIL	Día del Libro	Atlas Geocientífico de Almería
MAYO	Día de las islas Canarias	Mapa Geomorfológico de España 1:50.000. Isla de La Palma
JUNIO	Día Mundial de los Océanos	Atlas del Margen Continental de España
JULIO	Día de Galicia	Mapa de Patrimonio Minero de Galicia. 1:400.000
AGOSTO	Verano en el Hemisferio norte	Zona GEODE Z2211 - Baleares: Ibiza-Formentera
SEPTIEMBRE	Día de Extremadura	Mapa Metalogenético de España.1:200.000 (serie antigua)
OCTUBRE	Día Internacional de la Geodiversidad	Mapa Geológico de España y Portugal. 1:1.000.000 (2015)
NOVIEMBRE	Día Mundial del Enoturismo	Mapa Guía del medio físico de La Rioja. 1:200.000.
DICIEMBRE	Invierno en el Hemisferio norte	Mapa Geológico de Pirineos. 1:400.000

TABLA I. *Relación de los mapas del Portal de cartografía y la temática relacionada para cada mes del año 2023*

Uno de los aspectos a destacar es la repercusión que ha supuesto para el Mapa del mes el uso de las redes sociales, tanto del Museo Geominero como del propio IGME, junto con otras organizaciones, como la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección (SECFT) o la Sociedad Geológica de España (SGE), que se han hecho eco del mapa destacado propiciando la difusión de esta iniciativa entre un rango de público mucho más amplio.

Las visitas a la portada web del Mapa del mes se han traducido en una mayor cantidad de visitas al propio mapa en el Portal de cartografía, como queda reflejado en los gráficos de las figuras 1 y 2, correspondientes al mes de enero, donde se puede observar un pico que coincide con el día de su publicación en las redes sociales del IGME. Los mapas del mes más visitados han sido los mapas temáticos relativos a las aguas subterráneas, al Cuaternario de los Pirineos y la geomorfología del volcán de La Palma junto con los dedicados a celebraciones relacionadas con la geología como el Hidrogeodía y el Día Internacional de la Geodiversidad.

CONCLUSIONES

Esta actividad divulgativa ha tenido una buena acogida entre la sociedad. El Mapa del mes ha ayudado a descubrir mapas o series de cartografía poco conocidos, publicitar efemérides que se pueden relacionar con la cartografía del IGME, atraer al portal a nuevos visitantes y fomentar los usuarios recurrentes. La combinación de herramientas digitales, como las redes sociales y las páginas web con información detallada, proporcionan una mayor visibilidad, contribuyen a una difusión más eficaz y permiten la participación de los usuarios.

Esta iniciativa que nació con un objetivo modesto podría llegar a ser una vía de comunicación, de una forma paulatina, que involucre primero a más personal del IGME y posteriormente llegar a los usuarios del Portal de cartografía para conocer sus necesidades de información.

REFERENCIAS

Hernández, R. (2015): Nuevos desarrollos tecnológicos para la difusión de los datos geocientíficos del IGME. En: *Jornada técnica sobre la disponibilidad y utilización de datos cartográficos y geocientíficos de las Administraciones Públicas*. Gobierno del Principado de Asturias: 8-12.



FIGURA 1. *Acceso diario a la página web del Mapa del mes desde el 1 de enero hasta el 3 de febrero de 2023*

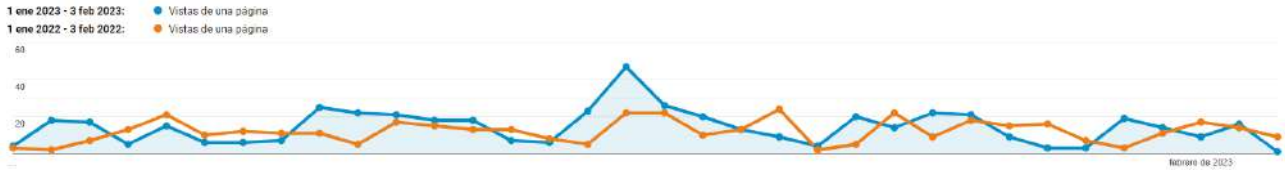


FIGURA 2. *Accesos a la página del portal correspondiente a la hoja MAGNA 559 en 2023 comparado con el año anterior*

Determinación del basamento mecánico y geológico mediante técnicas de sísmica pasiva en el entorno del Río Guadiamar: Implicaciones tectónicas

Determination of the mechanical and geological basement from passive seismicity techniques in the area of the Guadiamar River: Tectonic implications.

D. Amador Luna[1], A. Macau[2], M. A. Alonso-Landaeta[3], S. Berman Díaz[3] y F. M. Alonso-Chaves[1]

(1) Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva. Campus Univ. "El Carmen". 21007 Huelva. david.amador@dct.uhu.es; alonso@uhu.es
(2) Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuic, 08036 Barcelona. albert.macau@icgc.cat
(3) Universidad Internacional de Andalucía, Carretera Palos s/n, 21819 La Rábida, Palos de la Frontera. manuelalonso2305@gmail.com; sarabermand@gmail.com

Resumen: En la zona de Paterna del Campo (Huelva) y en el entorno del Río Guadiamar, en su tramo sobre los sedimentos neógenos de la Cuenca del Guadalquivir, se ha registrado ruido sísmico en 43 emplazamientos, los cuales forman parte de diferentes perfiles transversales al citado río. A partir de dichos registros se ha identificado la frecuencia fundamental del suelo (f_0) en cada estación, obteniéndose valores que varían entre 18 y 0,23 Hz. Se discute el significado de tales valores en relación con los datos geológicos de superficie y de sondeos. En este sentido se concluye que la f_0 calculada podría determinar la profundidad del basamento geológico (contacto entre el zócalo varisco y su cobertera) con una incertidumbre de 20-30 metros. El techo de la unidad sedimentaria basal podría corresponder con el basamento mecánico. El espesor de sedimentos se incrementa progresivamente desde el borde septentrional de la cuenca del Guadalquivir hacia el SE, alcanzando valores superiores a 600 m en la vertical de la localidad de Aznalcázar. Por otra parte, se identifica un sistema de fallas normales de dirección NNE-SSO, de dimensiones kilométricas que afecta al basamento; relacionándose dichas fallas con la extensión en el "forebulge" de una cuenca de antepaís.

Palabras clave: sismicidad pasiva, fracturación, cuenca de antepaís, Río Guadiamar, Cuenca del Guadalquivir.

Abstract: *In the area of Paterna del Campo (Huelva) and the surroundings of the Guadiamar River, in its section over the Neogene sediments of the Guadalquivir Basin, seismic noise has been recorded at 43 locations, which are part of different transversal profiles of the aforementioned river. From these records, the fundamental frequency of the soil (f_0) has been identified at each station, obtaining values that vary between 18 and 0.23 Hz. The significance of these values is discussed in relation to surface geological data and surveys. In this regard, it is concluded that the calculated f_0 could determine the depth of the geological basement (the contact between the Variscan base and its cover) with an uncertainty of 20-30 meters. The roof of the basal sedimentary unit could correspond to the mechanical basement. The thickness of sediments increases progressively from the northern edge of the Guadalquivir basin towards the southeast, reaching values greater than 600 m vertically below Aznalcázar. It's identified a normal fault system with NNE-SSW orientation that affect the basement over kilometer-scale distances; these faults are related to the extension in the "forebulge" of a foreland basin.*

Key words: *passive seismicity, fracturing, foreland basin, Guadiamar River, Guadalquivir Basin*

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de sísmica pasiva, basadas en el registro del ruido sísmico, permiten analizar las vibraciones continuas que se propagan por el suelo, ya sea de origen natural o antropogénico. El análisis de este fenómeno permite determinar la frecuencia fundamental del suelo (f_0), la cual está estrechamente relacionada con el espesor de los sedimentos que cubren la cuenca y por consiguiente deducir la profundidad del basamento rocoso subyacente. El diseño de una campaña geofísica como la que se propone en este trabajo permite, junto con el conocimiento geológico regional, discutir la geometría del relleno sedimentario de una cuenca, a la vez que se determina la existencia de un basamento mecánico (y/o geológico). Por otra parte, también se puede identificar estructuras tectónicas, tales como fallas profundas que afecten al basamento de la cuenca.

El objetivo de este trabajo es analizar el borde septentrional de la Cuenca del Guadalquivir combinando información geológica de superficie, datos de sondeos y registros de ruido sísmico. Los resultados de este estudio se relacionan con la evolución geodinámica neógena de la Cuenca del Guadalquivir, teniendo en cuenta rasgos tectono-sedimentarios, aspectos geomorfológicos y topográficos. Los datos que ahora se presentan completan las investigaciones previas realizadas en relación con el proyecto ALERTES-RIM y los trabajos de Alonso-Chaves et al. (2020) y Amador Luna et al. (2023) analizando la extensión y levantamiento del "forebulge" de la Cuenca del Guadalquivir.

MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

El Río Guadiamar nace a 500 m de altitud en las proximidades de Puerto Alto, coincidiendo con las

estribaciones meridionales de la Sierra de Aracena. La cabecera del río puede situarse a 9 km al SO de Zufre (Huelva). La mayor parte de su trazado discurre por la provincia de Sevilla. En su tramo inicial el trazado es NO-SE, y entre los paralelos de El Garrobo y Gerena la orientación de su cauce es N-S, aproximadamente. Desde Gerena hasta las proximidades de Villamanrique de la Condesa el curso fluvial se reorienta NNE-SSO (Fig. 1). La longitud de este último tramo es de 32 km y la pendiente paralela al cauce del río es muy baja, variando la altitud desde los 50 m en la parte más septentrional a 10 m en el extremo meridional. Por el margen occidental del citado río hay 4 afluentes con longitudes superiores a los 30 km, y una red notablemente jerarquizada (entre otros, el río Crispinejo o Agrio), mientras que por su margen oriental los afluentes tienen reducidas dimensiones, normalmente menos de 2 km y está menos jerarquizada su red fluvial. Algunos de esos ríos son de primer orden. En cualquier perfil topográfico transversal al río Guadiamar (ONO-ESE), entre Gerena y Villamanrique de la Condesa, se observa una fuerte asimetría. El margen oriental del río tiene en algunos tramos pendientes superiores al 30% y localmente alcanzan valores por encima del 50%. En el margen occidental, la superficie topográfica tiene normalmente pendientes inferiores al 10%.

Desde el punto de vista geológico y cartográfico, el rasgo más importante del área investigada es la discordancia zócalo - cobertera que separa la Zona Sudportuguesa (ZSP) de la cuenca neógena del Guadalquivir. El límite entre ambas provincias geológicas es una de las discordancias cenozoicas más importantes de la Península Ibérica y tiene un trazado N070ºE con un buzamiento hacia el sureste. Al norte de dicha discordancia en el entorno de Aznalcóllar aflora el Complejo Volcanosedimentario (CVS) y las rocas devónicas conocidas como Unidad de Pizarras y Cuarcitas (Unidad PQ). En el CVS se localizan importantes yacimientos de sulfuros masivos en los que se ha extraído calcopirita (mena de cobre), además de esfalerita y galena, menas de Cinc y Plomo, respectivamente.

El registro sedimentario de la cuenca neógena se inicia con unas calizas conglomeráticas, conglomerados y arenas de edad Tortoniense superior sobre las que se depositaron margas grises azuladas, actualmente muy compactadas de edad Tortoniense superior - Andaluciense inferior (Coullaut Sáenz de Sicilia et al. 1975). El espesor del tramo basal es de 20-30 metros y las margas no llegan a superar los 30-35 m de potencia en el entorno del propio el río Guadiamar (Leyva Cabello y Ramírez Copeiro del Villar, 1973) aunque llegan a alcanzar más de 2000 m al SE de Villamanrique de la Condesa. La sedimentación neógena se completa con limos más o menos arenosos con abundante fauna marina de edad Pliocena. Las citadas unidades se disponen de forma monoclinal con buzamientos muy bajos (normalmente inferior a 5 grados) hacia el SE. El registro cuaternario es de carácter continental y está bien representado en el entorno de los sistemas fluviales actuales. Merece la pena destacar la existencia de amplias

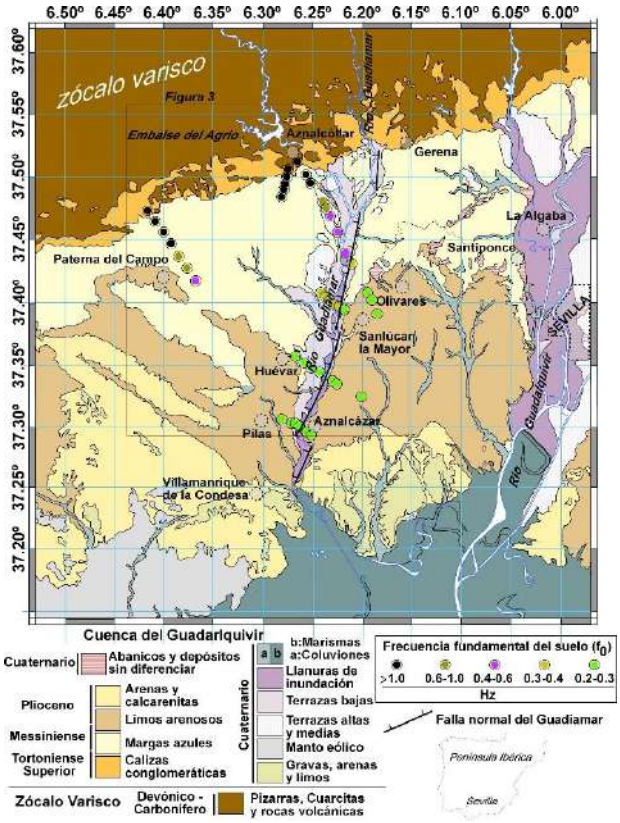


FIGURA 1. Mapa geológico de la zona occidental del valle del Guadalquivir, en las inmediaciones del río Guadiamar (basado en las cartografías del IGME).

extensiones de terrazas colgadas en el margen occidental del río Guadiamar y prácticamente la ausencia de las mismas en su margen oriental. Salvani et al. (2001) establecen regionalmente 3 terrazas además de una cuarta terraza erosiva que se corresponde con los depósitos actuales. La más alta de ellas podría ser del Pleistoceno y el resto son holocenas. Las propias llanuras de inundación del río, que llegan a tener más de 500 m en una sección transversal al cauce, representan los afloramientos más orientales del Holoceno. Salvany et al. (op. cit.) sugirieron la migración del eje del río hacia el E por causas tectónicas.

METODOLOGÍA

El método empleado para el registro del ruido sísmico en Paterna del Campo y en el entorno del río Guadiamar se basa en la determinación de la relación espectral H/V (o HVSR: Horizontal to Vertical Spectral Ratio). Se han realizado 43 estaciones de medida. La distribución espacial de dichas estaciones permite agruparlas de tal manera que queden integradas en cuatro perfiles, todos ellos de orientación NO-SE (transversales al río Guadiamar), un perfil localizado en el entorno de Paterna del Campo y uno de orientación aproximada N-S sobre Aznalcóllar. Las longitudes de perfiles varían entre 2 y 15 km. Los registros de ruido sísmico se adquirieron en junio de 2022 y agosto de 2023.

El registro del ruido sísmico se hizo con un sensor de banda ancha triaxial de la marca Lennartz (LE-3D, con una frecuencia propia de 0,2 Hz y un límite superior de frecuencia de 50 Hz, factor de transducción de 800 V,

ruido RMS a 1 Hz inferior a 1nm/s y con gama dinámica superior a 140 dB. Para la adquisición de la señal se empleó un digitalizador SARA SL06. El equipo registra también de forma simultánea una señal de tiempo y se controla mediante GPS el emplazamiento del mismo. La fuente de alimentación de la instrumentación es una batería de 12 V.

El tiempo mínimo de registro fue de 30 minutos para las zonas más septentrionales ya que el sustrato se encuentra más próximo a la superficie y de poco más de una hora para las estaciones más meridionales. Siendo el tiempo más frecuente de unos 45-50 minutos de muestreo.

La señal de ruido sísmico registrada fue, finalmente, tratada con software Geopsy (Wathelet et al., 2020), el cual se encarga de la transformación de la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, así como el filtrado de frecuencias altas y la obtención de la frecuencia fundamental del suelo. El cociente espectral H/V consiste en la división de las amplitudes de los espectros de Fourier de las componentes horizontales (N y E) respecto a la vertical (Z), obteniéndose una gráfica H/V vs frecuencia de la que se obtiene la frecuencia fundamental del suelo (f_0). Para ello, se utilizaron entre 7 y 19 ventanas de cálculo de unos 300 s de duración cada una, lo que permitió reconocer el pico de mayor amplitud de estas gráficas con bastante precisión, dada la calidad de los registros (obsérvese la Fig. 2).

La profundidad (H) de la discontinuidad mecánica, que separa zócalo cristalino y roca dura de sedimentos "blandos" de la cobertera está estrechamente relacionada con la frecuencia fundamental del suelo (f_0) y la velocidad de las ondas S de cizalla (V_S) (Atakan et al, 2004). De tal manera que a partir de una ecuación empírica tipo $H=a\cdot f_0^{b}$, de acuerdo con Macau et al. (2016) se puede estimar dicho valor de profundidad (1):

$$H=80{,}16\cdot f_0^{-1{,}48} \qquad (1).$$

Por último, se empleó QGIS para la representación de los puntos sobre el mapa y el software Surfer para la elaboración de mapas de contorno mediante interpolación de datos de tipo Kriging.

El emplazamiento de algunas estaciones coincidió en la vertical de sondeos realizados en la zona en relación con exploración minera. Siendo posible comparar el registro geofísico con los datos geológicos correspondientes a la testificación de los mismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de las 43 estaciones de registro de ruido sísmico permite identificar tres tipos de respuesta diferentes en el cociente espectral H/V:

a) Gráficas de H/V con picos de muy alta frecuencia y baja amplitud (>10 Hz). Tal respuesta se obtiene en zonas donde los zócalos están muy superficiales, casi aflorantes. Solo se ha reconocido un caso en la zona de Paterna del campo (37,4722º N, 6,4158º W).

b) Gráficas de H/V con picos de alta frecuencia (superiores a 1 Hz) y alta amplitud, las cuales se corresponden con zonas de baja profundidad del zócalo.

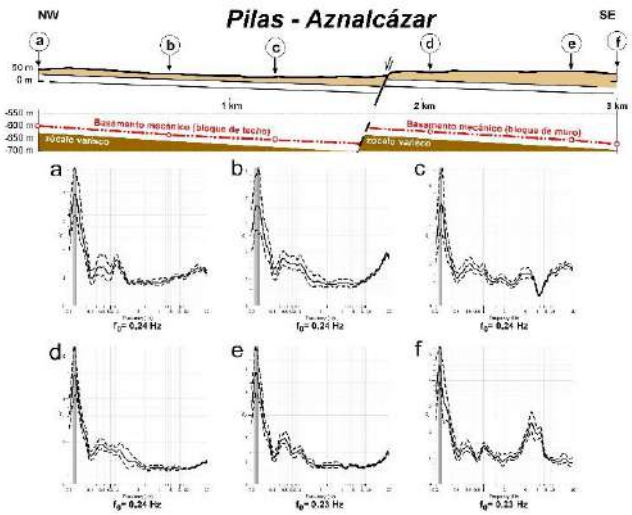


FIGURA 2: Gráficas H/Vvs f_0 entre Pilas y Aznalcázar e interpretación geológica

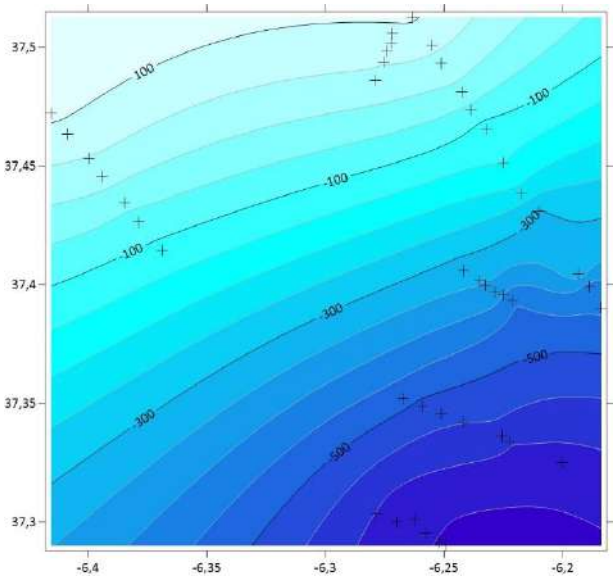


FIGURA 3. Mapa de contornos en el que se muestra las profundidades del basamento mecánico, resultado del muestreo y ubicación de los puntos muestreados.

c) Gráficas con picos de baja frecuencia (inferiores a 1 Hz) y alta amplitud, que se corresponden con zonas de gran profundidad del zócalo (Ver Fig. 2).

El rango de frecuencias fundamentales del suelo en la zona investigada varía entre 18 y 0,23 Hz. Las frecuencias más altas se localizan en las proximidades al contacto zócalo varisco-cobertera neógena. En todos los casos estudiados, los valores de f_0 disminuyen progresivamente hacia el SE a lo largo de los diferentes perfiles. Estos datos son compatibles con el lógico incremento del espesor de sedimentos en el borde de la cuenca desde el NNO al SSE y el incremento en la profundidad del zócalo.

Cuando ha sido posible comparar los datos geofísicos con los datos de sondeos, el registro del ruido sísmico identifica sistemáticamente una menor profundidad para el basamento mecánico que para el basamento geológico

(zócalo paleozoico de la ZSP). Las diferencias entre uno y otro dato son del orden de 20-30 m. Tales diferencias podrían explicarse por el comportamiento mecánico del tramo basal del relleno neógeno (calcarenitas) asimilable, teniendo en cuenta sus propiedades físicas, a una roca dura.

La profundidad del basamento mecánico (techo de la unidad basal) oscila desde escasos metros en la zona noroccidental del área estudiada hasta valores superiores a los 600 metros en el área más suroriental (Fig. 3). Las isolíneas correspondientes a la cota de basamento mecánico se disponen N070-080ºE, resultando ser coincidentes con la orientación de la cuenca del Guadalquivir. La pendiente estimada para la profundidad del basamento mecánico en cada uno de los perfiles, podrían aproximarse al buzamiento real del basamento mecánico resultando ser del orden de 1-3º hacia el SE. No obstante, se han reconocido rupturas de esa pendiente en áreas próximas al cauce del Guadiamar, como puede verse destacado, por ejemplo, en la Fig. 2. Las isolíneas parecen curvarse en bandas correlacionables con una orientación aproximada NNE-SSO. Esta observación podría estar relacionado con fracturas que afectan tanto al basamento mecánico (y geológico) como a los sedimentos neógenos que lo cubren.

En superficie no han podido reconocerse planos de falla que pudieran vincularse con las fracturas que se infieren de los datos geofísicos, aunque sí que puede verse un cambio significativo en la pendiente del relieve en el margen oriental del río, lo que invita a pensar que se trata del bloque levantado (Fig. 2). Este desnivel en el basamento mecánico podría relacionarse con una zona de falla aproximadamente paralela al cauce del Río Guadiamar. El labio levantado de dicha zona de falla se correspondería con el margen oriental del río. El labio hundido y ligeramente basculado hacia el SE se correspondería con el margen occidental del río. La zona de falla reconocida mediante sísmica pasiva tendría una extensión de más de 15 km y un salto vertical estimado de algo más de 50 m.

CONCLUSIONES

La comparación de datos de sondeos con los resultados obtenidos a través de sísmica pasiva (método de cocientes espectrales H/V) ha permitido identificar regionalmente un basamento mecánico no expuesto situado por encima del basamento geológico (zócalo varisco). El basamento mecánico tiene una dirección N070ºE y está basculado hacia el SE (se han deducido buzamientos del orden de 1-3º). Tal dirección es paralela al borde de la cuenca del Guadalquivir. Una familia de fallas normales activas durante el Cuaternario con una orientación NNE-SSO (paralelas al cauce del Río Guadiamar, tal y como describió Viguier, 1977) afecta a todo el relleno de la cuenca del Guadalquivir y a su basamento. Se trataría de fallas con un buzamiento al ONO y salto vertical superior a los 50 metros. El basculamiento regional hacia el SE y el sistema de fallas del Guadiamar se relaciona con la extensión del "forebulge" de la cuenca del Guadalquivir en relación con el avance hacia el oeste del frente orogénico alpino del arco de Gibraltar.

REFERENCIAS

Alonso-Chaves, F.M., Macau, A., Figueras, S., Benjumea, S., Gabas, A., Roca, A., García-Navarro, E., Puig, R. y Sedano, J. (2020): "Fracturación cortical inferida a partir de técnicas de sismicidad activa y pasiva: extensión neógena en el forebulge de la Cuenca del Guadalquivir". *Geogaceta*, **67**, 15-18.

Amador Luna, D., Macau, A., Bellmunt Traver, F., García-Navarro, E., Expósito, I., Jiménez-Bonilla, A., Díaz-Azpiroz, M., Cruzado Zarza, D., Alonso-Chaves, F. M. (2023): Imagen 3D del basamento mecánico de la Cuenca del Guadalquivir en la provincia de Huelva. En: *10ª Asamblea hispano-portuguesa de geodesia y geofísica*, 231-239.

Atakan, K., Duval, A.M., Theodulidis, N., Guillier, B., Chatelain, J.L., Bard, P.Y. Y Sesame-Team (2004): "The H/V spectral ratio technique: experimental conditions, data processing and empirical reliability assessment". En: *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada.

Coullaut Sáenz de Sicilia, J.L., Soler Sampere. M. y Portero García, J. M. (1978): "Mapa Geológico de España E.:1:50.000 y Memoria, Hoja 961 (11-39) Aznalcóllar", IGME. 45 p.

Leyva Cabello, F. y Ramírez Copeiro del Villar, J. (1977): "Mapa Geológico de España E.: 1:50.000 y Memoria, Hoja 983 (11-40) Sanlúcar la Mayor", IGME. 18 p.

Macau, A., Figueras, S., Benjumea, B., Alonso-Chaves, F.M., Gabàs, P., Bellmunt, F., Roca, A. (2016): "Microzonificación sísmica de la ciudad de Huelva (ALERTES-RIM). En: 9ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Madrid, España.

Salvany, J.M., Mediavilla, C., Mantecón, R. y Manzano, M. (2001): "Geología del Valle del Guadiamar y ñareas Colindantes". *Boletín Geológico y Minero*, Vol. Especial, 57-68.

Viguier, C. (1977): "Les grands traits de la tectonique du Basin neogene du Bas-Guadalquivir". *Boletín Geológico y Minero*, **88**-I, 39-44.

Wathelet, M., Chatelain, J.L., Cornou, C., Giulio, G. D., Guillier, B., Ohrnberger, M. y Savvaidis, A. (2020) "Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing". *Seismol. Res. Lett.* **91**(3), 1878-1889

Caracterización de las Plumas de Canarias y Madeira: Observaciones con Funciones Receptoras

Plume Characterization in Canary and Madeira: Insights from Receiver Functions

L. Bonatto[1], D. Schlaphorst[2], G. Silveira[2,3], J. Mata[2,4], C. Civiero[4,5], C. Piromallo[6], M. Schimmel[7]

1Departamento de Física, Universidad de La Serena, Av. Juan Cisternas, 1200, La Serena, 1700000, Coquimbo, Chile.
2 Faculdade de Ciências, Instituto Dom Luiz (IDL), Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016, Lisboa, Portugal.
3 Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, Lisbon, 1959-007, Portugal.
4 Institut de Ciències del Mar, ICM-CSIC, Pg. Marítim de la Barceloneta, 37, Barcelona, 08003, España.
5 Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze, Università di Trieste, via Weiss 2, Trieste, 34128, Italia.
6 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata, 605, Rome, 00143, Italia.
7 GeoSciences Barcelona, Geo3Bcn, CSIC, c/ Solé Sabarís sn, Barcelona, 08028, España.

Resumen

Investigamos la estructura del manto superior debajo de los puntos calientes de Canarias y Madeira utilizando funciones receptoras. Los resultados muestran que ambos puntos calientes se caracterizan por una zona de transición del manto (ZTM) delgada, con discontinuidades *410* y *660* nítidas a profundidades de 428±4 km, 421±3 km y 647±2 km, 664±3 km, debajo de Canarias y Madeira, respectivamente. Estos hallazgos confirman que la pluma de Canarias atraviesa la ZTM, mientras Madeira parece estar desconectada del manto inferior y afecta principalmente la porción superior de la ZTM. Además, detectamos la discontinuidad X debajo de Canarias, un resultado significativo que ofrece nuevas perspectivas sobre la mineralogía y composición del manto en esta región, indicando la naturaleza termoquímica de la pluma de Canarias.

Palabras clave: funciones receptoras, puntos calientes, Madeira, Canarias, pluma termoquímica

Abstract

We investigate the structure of the upper mantle beneath the Canary and Madeira hotspots using receiver functions. The results show that both hotspots are characterized by a thin mantle transition zone (MTZ), with sharp 410 and 660 discontinuities at depths of 428 ± 4 km, 421± 3 km and 647±2 km, 664±3 km beneath the Canary and Madeira islands, respectively. These findings indicate that the Canary plume crosses the MTZ, whereas the Madeira plume appears to be disconnected from the lower mantle and primarily affects the upper portion of the MTZ. Additionally, we detect the X discontinuity beneath the Canary Islands, a significant result that provides new insights into the mantle mineralogy and composition in this region, indicating the thermochemical nature of the Canary plume.

Key words: *receiver functions, hotspots, Madeira, Canaries, thermochemical plume*

INTRODUCCIÓN

Los archipiélagos de Canarias y Madeira (Figura 1) son dos grupos de islas con vulcanismo de intraplaca, situadas en el Océano Atlántico, frente a la costa noroeste de África. Aunque aún es un tema de debate, el vulcanismo de ambos puntos calientes se atribuye a la interacción entre la Placa Africana y las plumas del manto subyacente (por ej., Geldmacher et al., 2001; Civiero et al., 2021; Negredo et al., 2022). Sin embargo, la estructura detallada de estas plumas aún no se comprende completamente.

Estudios de tomografía han revelado distintas estructuras, mientras que la pluma de Canarias se extiende verticalmente a lo largo del manto superior, la pluma de Madeira es visible hasta una profundidad de 300 km, más allá de la cual la resolución de las imágenes se deteriora (Civiero et al. 2018 y 2019). En un análisis exhaustivo reciente que emplea tomografía y modelos de paleo-reconstrucción, Civiero et al. (2021) propusieron que los puntos calientes de Madeira y Canarias están alimentados por estructuras similares a plumas sobre la Anomalía Central-Este del Atlántico (CEAA), que presenta una baja velocidad sísmica y está conectada a la LLSVP africana (gran provincia de baja velocidad de cizalla). Sin embargo, la pluma de Canarias parece estar arraigada en la CEAA, mientras que la de Madeira parece desconectada y de menor tamaño.

Una manera de caracterizar la pluma y su dinámica en el manto superior es mediante la cartografía de las discontinuidades sísmicas del manto. Dos de las principales discontinuidades sísmicas se encuentran aproximadamente a profundidades de 410 km y 660 km, y están asociadas con la transición de fase de olivino a wadsleyita y la disociación de ringwoodita, respectivamente, en un manto dominado por olivino. Nos referiremos a estas discontinuidades como la *410* y la *660*, y a la región entre ellas como la Zona de Transición del Manto (ZTM). Las transiciones de fase del olivino asociadas con las discontinuidades *410* y *660* tienen pendientes de Clapeyron opuestas en el espacio de temperatura y presión. Esto significa que, en las regiones calientes, la *410* se deprime y la *660* se levanta, lo que lleva a una ZTM delgada; en las regiones frías, la *410* se levanta y la *660* se deprime, lo que lleva a una ZTM gruesa. Por lo tanto, mapear el adelgazamiento de la ZTM debajo de una pluma suele usarse como un termómetro para la temperatura del manto.

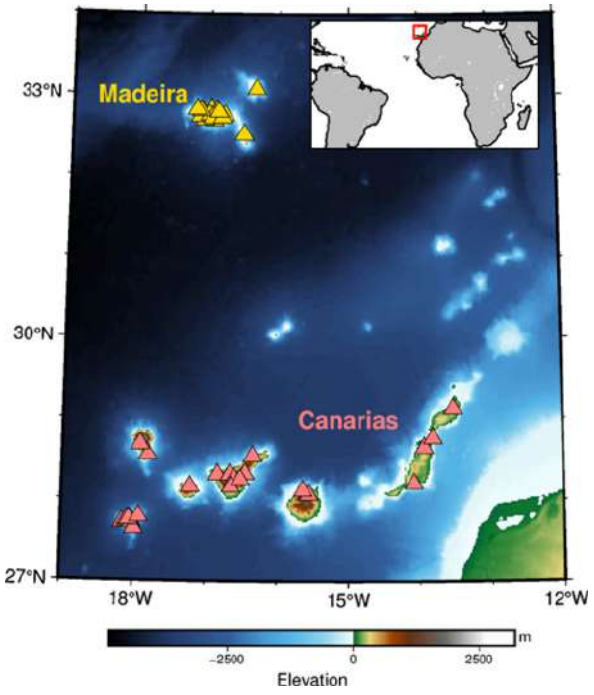


Figura 1: Zona de estudio y estaciones sísmicas: triángulos rojos (canarias) y triángulos amarillos (Madeira).

Por otro lado, las discontinuidades sísmicas que no se observan globalmente pueden indicar la presencia de heterogeneidad composicional. Por ejemplo, a una profundidad de alrededor de 300 km en algunas regiones del mundo, se encuentra una discontinuidad conocida como la discontinuidad X (por ejemplo, Schmerr et al., 2013). Aunque esta discontinuidad se asocia a varios fenómenos, en zonas de plumas con material enriquecido en sílice se asocia a una transición de fase de dicho mineral, de coesita a stishovitsa.

En este estudio, exploramos la estructura del manto superior debajo de los archipiélagos de Canarias y Madeira utilizando fases convertidas de P a S observadas en apilamientos de funciones receptoras (RF). Interpretando nuestras observaciones en el marco de la física de los minerales y la geodinámica, confirmamos la naturaleza termoquímica de la pluma mantélica en la zona estudiada. Un estudio más detallado se puede encontrar en Bonatto et al. (2023).

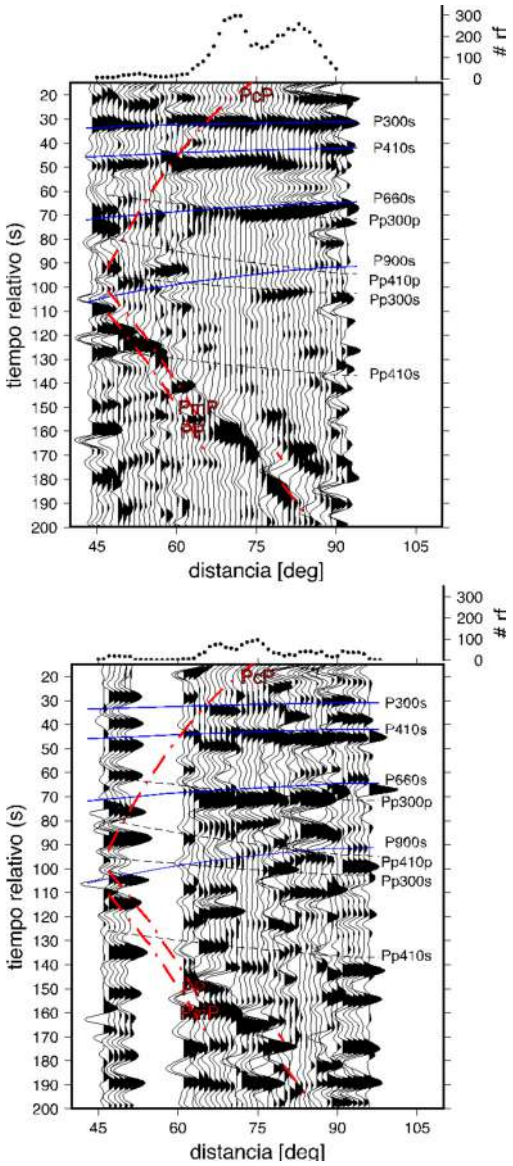


Figura 2: Secciones sísmicas de las RFs para Canarias (arriba) y Madeira (abajo). Se ven detecciones claras para P300s (solo en Canarias), P410s y P660s. Cada traza resulta del apilamiento de las RFs con distancias epicentrales dentro de un intervalo de 5° alrededor de una distancia epicentral dada en el eje horizontal.

DATOS Y MÉTODOS

El conjunto de datos utilizado en el estudio incluye formas de onda de 42 estaciones de diferentes redes sísmicas (códigos: ES, IU, Y7, PM).

En total, calculamos 1268 RFs de alta calidad que se utilizaron para detectar fases convertidas de P a S en las discontinuidades sísmicas debajo de la zona de estudio, mediante un enfoque de suma de puntos de

conversión común (e.g., Bonatto et al 2020) y para llevar a cabo un análisis detallado de las discontinuidades del manto. Las RF proporcionan información valiosa sobre la profundidad y las propiedades de las discontinuidades sísmicas.

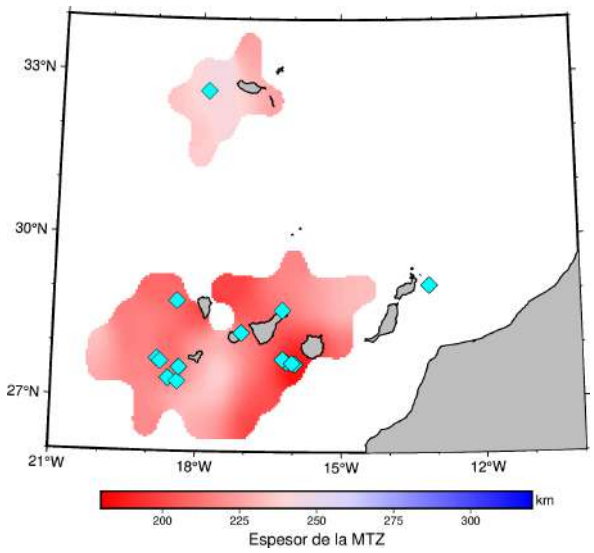


Figura 3. Espesor de la zona de transición del manto (ZTM): valores obtenidos a partir de estimaciones de profundidad de las discontinuidades 410 y 660, restringidas a regiones donde hay observaciones disponibles para ambas discontinuidades. Los rombos corresponden a detecciones de la discontinuidad X.

RESULTADOS Y DISCUSION

Detectamos fases convertidas de las principales discontinuidades a 410 km y 660 km, delineando los límites de la ZTM (Figura 2). Encontramos que ambos puntos calientes se caracterizan por una ZTM delgada (Figura 3), con discontinuidades *410* y *660* nítidas a profundidades promedio de 429-420 km y 647-664 km, respectivamente, debajo de Canarias y Madeira. Estos resultados indican que la pluma de Canarias atraviesa la ZTM, mientras que la pluma de Madeira afecta principalmente la porción superior de la ZTM. Estos resultados confirman las observaciones de Civiero et al. (2021), sugiriendo que debajo de Madeira la pluma parece estar desconectada del manto inferior, mientas que la pluma de Canarias parece conectarse con la CEAA.

Además, encontramos detecciones confiables de la discontinuidad X debajo de Canarias (Figuras 2 y 3) a 289 km de profundidad, lo cual es significativo porque proporciona nuevas evidencias sobre la mineralogía y composición del manto debajo del punto caliente de Canarias. Debajo de Madeira, solo hemos retenido una detección confiable de esta discontinuidad. La presencia de la discontinuidad *X* sugiere la acumulación de eclogita reciclada rica en sílice a estas profundidades.

CONCLUSIONES

Investigamos la estructura detallada del manto superior debajo de los archipiélagos de Canarias y Madeira utilizando funciones receptoras. Encontramos que ambos puntos calientes se caracterizan por una ZTM delgada. Sin embargo, mientras que en Canarias tanto la 410 como la 660 presentan topografía consistente con una anomalía caliente atravesando la ZTM, en Madeira, sólo la depresión de la 410 es consistente con la presencia de una anomalía caliente. Estos resultados indican que la pluma de Canarias atravesaría la ZTM, mientras que la pluma de Madeira afectaría principalmente la porción superior de la ZTM. El grosor de la ZTM y la presencia de la discontinuidad *X* proporcionan evidencias convincentes de una pluma termoquímica de origen profundo debajo de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución a los proyectos SIGHT (Ref. PTDC/CTA-GEF/30264/2017) y GEMMA (PTDC/CTA-GEO/2083/2021). Este trabajo también fue apoyado por la Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal I.P./MCTES a través de fondos nacionales (PIDDAC) – UIDB/50019/2020. LB quisiera expresar su sincera gratitud al Programa de Incentivo a la Investigación para Académicos (PIA) de la Universidad de La Serena por su generoso apoyo.

REFERENCIAS

Bonatto, L., Piromallo, C., & Cottaar, S. (2020). *Journal of Geophysical Research (Solid Earth),* 125 (8), e2020JB019446.

Bonatto, L. Schlaphorst, D., Silveira, G. et al. *ESS Open Archive.* November 08, 2023.

Civiero, C., Strak, V., Custódio, S., Silveira, G., Rawlinson, N., Arroucau, P., and Corela, C. (2018). Earth and Planetary Science Letters, 499 , 157-172.

Civiero, C., Custódio, S., Rawlinson, N., Strak, V., Silveira, G., Arroucau, P., and Corela, C. (2019). *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 124 (2), 1781-1801.

Civiero, C., Custodio, S., Neres, M., Schlaphorst, D., Mata, J., and Silveira, G. (2021). *Geophysical Research Letters*, 48 (13), e92874.

Geldmacher, J., Hoernle, K., van den Bogaard, P., Zankl, G., & Garbe-Schünberg, D. (2005). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111 (1), 55-87.

Negredo, A. M., van Hunen, J., Rodríguez-González, J., and Fullea, J. (2022). *Earth and Planetary Science Letters*, 584 , 117506.

Schmerr, N.C., Kelly, B.M., Thorne, M.S., 2013. *Geophysical Research Letters*. 40, 841-846.

Sobre las dependencias funcionales entre la densidad y las velocidades de las ondas P y S para rocas del Pirineo Central

On the dependencies between density, P-wave and S-wave velocities for the Central Pyrenees rocks

C. Cuchet[1], C. Ayala[2], J. Alcalde[2], E. Beamud[3], P. Clariana[4], R. Soto[4], R. Carbonell[2]

1 Université de Lorraine (Francia), chloe.cuchet4@etu.univ-lorraine.fr
2 GEO3BCN, CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, cayala@geo3bcn.csic.es; jalcalde@geo3bcn.csic.es, rcarbo@geo3bcn.csic.es
3 Paleomagnetic Laboratory CCiTUB –GEO3BCN CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona betbeamud@ub.edu
4 IGME, CSIC, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, p.clariana@igme.es, r.soto@igme.es

Palabras clave: P-wave velocity, S-wave velocity, density, Central Pyrenees.

Resumen

El conocimiento de las propiedades físicas de las rocas mediante medidas directas, ya sea en laboratorio o en sondeos, es fundamental para construir gemelos digitales precisos del "Sistema Tierra" en general y de contextos geológicos concretos, en particular. La obtención de medidas de propiedades físicas reales permite evaluar posibles relaciones entre ellas y, a partir de estas relaciones, extrapolar en zonas donde no se tengan datos. En este trabajo se presentan los primeros resultados de medidas de velocidades de las ondas P (Vp) y S (Vs) en muestras de rocas del Pirineo Central de distintas litologías realizadas con el dispositivo portátil A1220 MONOLITH 3D. Para ello se utilizaron muestras de roca, cortadas en cubos, de dos tamaños distintos (2 cm de lado y unos 10 cm de lado) donde previamente se había medido su densidad mediante el principio de Arquímedes. Ello permitió testar las posibles limitaciones del aparato en función del tamaño de las muestras y las ventajas de su uso cuando no se pueden obtener medidas directamente en el campo y/o cuando las muestras que se pretenden medir no tienen el tamaño suficiente como para utilizar instrumentos más sofisticados como el corescan. Los resultados indican una correlación lineal entre Vp y Vs para todo tipo de rocas mientras que la relación entre las velocidades de las ondas sísmicas y las densidades no es lineal, sino que muestra un rango de variación que no siempre puede ser ajustado mediante una función polinómica.

Abstract

Knowledge of the physical properties of rocks through direct measurements, whether in the laboratory or in drillholes, is essential to build accurate digital twins of the "Earth System" in general and of specific geological contexts, in particular. Obtaining measurements of real physical properties allows us to evaluate possible relationships between them and, from these relationships, extrapolate in areas where data are not available. This work presents the first results of the measurements of P-wave (Vp) and S-wave (Vs) velocities in rock samples from the Central Pyrenees carried out with the portable measuring instrument A1220 MONOLITH 3D. For this, rock samples were used, cut into cubes, of two different sizes (2 cm on a side and about 10 cm on a side) where their density had previously been measured using Archimedes's principle. This allowed us to test the possible limitations of the device depending on the size of the samples and the advantages of its use when measurements cannot be obtained directly in the field and/or when the samples to be measured are not large enough to use instruments more sophisticated like corescan. The results show a linear correlation between Vp and Vs for all types of rocks while the relationship between seismic wave velocities and densities is not linear, but rather shows a range of variation that cannot always be adjusted by a polynomial function.

Agradecimientos

This contribution is supported by the EU project AGEMERA, funded under the European Union's Horizon Europe research and innovation programme, grant agreement n. 101058178 and the IMAGYN project, PID2020-114273GB-C22, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033

Estructura cortical del margen noroeste de la península ibérica: nuevos datos de reflexión sísmica en 2D.

Crustal structure along and across the northwestern Iberian margin: Insights from new 2D seismic reflection data.

M.A. De la Fuente-Oliver[1], A. Muñoz-Martín[1], J.L. Granja-Bruña[1], M. Druet[2], G. de Vicente[1], A. Maestro[2], J. Gallastegui[3], F. Bohoyo[2], A. Muñoz-Cemillán[1].

1 Grupo de Tectonofísica Aplicada. Fac. CC Geológicas, Univ. Complutense. C/ José Antonio Nováis 2, 28040 – Madrid. miguelde@ucm.es, amunoz@ucm.es, jlgranja@ucm.es, gdv@geo.ucm.es, alfomu01@ucm.es.
2 Instituto Geológico y Minero de España. C/ Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. m.druet@igme.es, a.maestro@igme.es, f.bohoyo@igme.es.
3 Universidad de Oviedo. jgallastegui@uniovi.es.

Palabras clave: Margen cantábrico, Inversión tectónica, Herencia tectónica, Sísmica de reflexión, Golfo de Vizcaya.

Resumen

El margen noroeste de la Península Ibérica es resultado de la inversión parcial del antiguo margen continental hiperextendido desarrollado en proximidad a un punto triple por lo que se trata de un escenario ideal para el estudio de la herencia tectónica y evolución de los márgenes continentales pasivos e invertidos. El interés científico unido al déficit de información disponible motivó el desarrollo del proyecto anfibio MARIBNO entre 2019-2022 donde se adquirieron datos geofísicos y geológicos. En mar se adquirieron 835 km de sísmica de gran ángulo y 1500 km de sísmica de reflexión multicanal además de batimetría multihaz, gravimetría y magnetismo. La información adquirida en tierra incluye medidas de sísmica de gran ángulo, gravimetría y magnetismo a lo largo de 300 km repartidos en tres transectos.
En esta presentación se mostrarán los resultados del estudio de la corteza a lo largo del margen noroeste a partir de los datos marinos de sísmica de reflexión multicanal 2D, los cuales muestran cambios en la magnitud del acortamiento y el estilo de deformación de las estructuras invertidas. En la zona cantábrica el sistema de cabalgamientos imbricados se estrecha progresivamente hacia el oeste desde los 50 km de desarrollo, hasta estar reemplazado por una única falla inversa. En la zona atlántica vuelve a haber un sistema imbricado de 30 km de ancho. Ambos segmentos están separados por una zona de transferencia NW-SE. Estos cambios estructurales están relacionados con: a) estructuras de rift heredadas las cuales controlan la orientación del margen; b) la estructura y reología de la corteza continental afectada por el proceso de rift.

Abstract

The northwestern margin of the Iberian Peninsula is the result of the partial inversion of the ancient hyperextended continental margin developed in proximity to a triple point. For these reasons it can be considered as a natural laboratory to study the role of tectonic inheritance in the evolution of the extensional continental margins and their subsequent inversion. We will show results of the study of the along- and across-strike crustal structure in the offshore northwestern margin (NE-SW trending Atlantic margin and E-W trending Cantabrian margin) based on the data from the MARIBNO project. 2D multichannel seismic data show changes in the shortening magnitude and deformation style of the inverted structures. In the Cantabrian segment, there is a westward progressive narrowing of the imbricate thrust system from 50 km-wide to be replaced by one large reverse fault. In the Atlantic segment there is again a 30 km-wide imbricate system. Cantabrian and Atlantic segments separated by a NW-SE large transfer zone. These structural changes are mainly related to two factors: a) inherited rifting structures that ultimately control the orientation of the margin; b) the structure and rheology of the continental crust affected by the rifting process.

Desarrollo de software de inversión conjunta 3D de datos gravimétricos y magnético mediante regularizadores estructurales y su aplicación en ambientes volcánicos.

Software development of gravity and magnetic joint inversion using structural regularizers and their application in volcano environments.

A. Del Razo[1] y V. Yutsis[1]

1 División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí 78216, México. abraham.delrazo@ipicyt.edu.mx

Palabras clave: Inversión Conjunta, Gravimetría, Magnetometría.

Resumen

Este trabajo estudió el uso de funciones diferenciales como regularizadores de la función objetivo utilizada para resolver el problema de inversión conjunta 3D de datos gravimétricos y magnéticos (Del Razo-Gonzalez A, Yutsis V., 2023), enfocado en favorecer características esperadas en la distribución de las propiedades físicas de los modelos de inversión debido al contexto geológico, acotando soluciones dentro del infinito número de soluciones posibles.

La aplicación de modelos de inversión conjunta utilizando una combinación de datos gravimétricos terrestres y satelitales obtenidos del Global Gravity Model plus (GGMplus), así como datos magnéticos terrestres y aeromagnéticos obtenidos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en un maar del campo volcánico Santo Domingo, SLP, México pretende reducir la incertidumbre ocasionada por las limitaciones en resolución espacial de ambos tipos de datos e identificar la existencia de una diatrema formada durante el proceso eruptivo.

Abstract

This work studied the use of differential functions as regularizers of the objective function used to solve the problem of 3D joint inversion of gravity and magnetic data (Del Razo-Gonzalez A, Yutsis V., 2023), focused on promoting expected geological characteristics in the distribution of physical properties within the inversion models due the geological context, thereby constraining solutions within the infinite number of possible outcomes.

The application of joint inversion models, using a combination of terrestrial and satellite gravity data obtained from the Global Gravity Model Plus (GGMplus), as well as terrestrial magnetic and aeromagnetic data acquired by the Mexican Geological Service (SGM), was conducted in a maar of the Santo Domingo volcanic field in SLP, Mexico aim to mitigate uncertainty arising from the spatial resolution limitations of both data types and to identify the presence of a diatreme formed during the eruptive process.

Referencias

Del Razo Gonzalez A, Yutsis V. (2023). Robust 3D Joint Inversion of Gravity and Magnetic Data: A High-Performance Computing Approach. *Applied Sciences, MDPI*; 13(20):11292. https://doi.org/10.3390/app132011292

Mapa de anomalías magnéticas del Pirineo a partir del EMAG2v2; interpretación geológica.

Magnetic anomaly map of the Pyrenees from EMAG2v2; geological interpretation.

A. Gamisel-Muzás[1,2], R. Soto[2], C. Ayala[3], T. Mochales[2], F.M. Rubio[2], P. Clariana[2], C. Rey-Moral[2], J. Martín-León[2].

[1] Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT-CSIC, 18100 Armilla, Granada. a.gamisel@csic.es.
[2] Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, 28003, 28760, 50059. r.soto@igme.es, t.mochales@igme.es, fm.rubio@igme.es, p.clariana@igme.es, c.rey@igme.es, j.martin@igme.es.
[3] Geosciences Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. cayala@geo3bcn.csic.es

Palabras clave: Pirineos, anomalías magnéticas, derivadas, soluciones de Euler, espectro de potencia.

Resumen

Las propiedades magnéticas de la corteza del Pirineo y sus implicaciones tectónicas han sido investigadas localmente, pero su caracterización a escala del orógeno ha sido poco explorada hasta ahora. Este trabajo pretende (1) correlacionar las principales anomalías magnéticas con la geología de superficie, e (2) inferir la profundidad y naturaleza de los cuerpos que las originan, empleando los datos de intensidad magnética del EMAG2v2 (Maus et al., 2009). Se ha calculado el mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo (RTP), mapa de derivadas magnéticas, soluciones de Euler y espectro de potencia. El mapa RTP (-50,2 a +83,2 nT) muestra una configuración heterogénea de las principales anomalías, se correlacionan con diferentes cuerpos geológicos y reflejan asimetría respecto al eje estructural, en la Zona Axial pirenaica. Los mapas de derivadas permiten definir diferentes dominios tectónicos y texturas magnéticas. Las soluciones de Euler y el espectro de potencia permiten inferir las profundidades de los cuerpos generadores de anomalías. Este trabajo ha sido posible gracias al "Programa Investigo" (Comunidad de Madrid) financiado por la European Union-Next Generation EU en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Abstract

The magnetic properties and tectonic implications of the Pyrenean crust have been studied locally, but their characterization at the orogenic scale has deserved less attention. The objectives of this work are: (1) to correlate the main magnetic anomalies with the surface geology, and (2) to determine the depth and nature of the magnetic anomaly sources, through magnetic intensity data from the EMAG2v2 (Maus et al., 2009). We calculated the reduced to the pole (RTP) map, derivative maps, Euler solutions and Power Spectrum. The RTP map (–50.2 to 83.2 nT) displays a nonuniform distribution of the main magnetic anomalies, linked to different geological bodies and showing an asymmetry pattern with respect to the structural axis of the range, the Axial Zone. The derivatives allow depicting different tectonic domains and magnetic textures. The Euler solutions and the Power Spectrum allow inferring the depths of the geological causative bodies. This work is funded by "Programa Investigo" (Comunidad de Madrid) financed by the European Union-Next Generation EU in the frame of the Recovery, Transformation and Resilience Plan.

Referencias

Maus, S., Barckhausen, U., Berkenbosch, H., Bournas, N., Brozena, J., Childers, V. & Caratori Tontini, F. (2009). EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10(8).

European Plate Observing System - Nodo Español de EPOS

European Plate Observing System - EPOS Spanish Node

A. Geyer[1], R. Carbonell[1], I. Aniel-Quiroga[2], A. Azor[3], J. V. Cantavella[4], J. J. Curto[5], I. Domínguez-Cerdeña[6], J. Fernández[7], J. L. Fernández-Turiel[1], J. R. Hernández Machado[8], J. Macías[9], M. P. Mata[8], D. Núñez[10], J. A. Sánchez Sobrino[4], R. Urgelés[11]

1 Geosciences Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona, Spain. ageyer@geo3bcn.csic.es, ramon.carbonell@csic.es, jlfernandez@geo3bcn.csic.es
2 IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, Spain. inigo.anielquiroga@unican.es
3 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, Spain. azor@ugr.es
4 Instituto Geográfico Nacional (IGN), Madrid, Spain. jvcantavella@mitma.es, jassobrino@mitma.es
5 Observatori de l'Ebre (OE), CSIC-Universitat Ramon Llull, Roquetes, Tarragona. jjcurto@obsebre.es.
6 Instituto Geográfico Nacional, C/La Marina 20, -2, 38003 Santa Cruz de Tenerife, Spain. ifdominguez@mitma.es
7 Instituto de Geociencias, (IGEO), CSIC-UCM, Madrid. jose.fernandez@csic.es
8 Instituto Geológico y Minero de España (IGME). CSIC, Ríos Rosas 23, 28003, Spain. r.hernandez@igme.es, p.mata@igme.es
9 Departamento de Análisis Matemático, Universidad de Málaga, Málaga, Spain. jmacias@uma.es
10 Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, Spain. dianan01@ucm.es
11 Institut de Ciències del Mar, CSIC, 08003 Barcelona, Spain. urgeles@icm.csic.es

Palabras clave: infraestructura; repositorios; bases de datos; servicios; software

Resumen

EPOS (European Plate Observing System) (https://www.epos-ip.org/) se constituye actualmente como la única infraestructura europea de Investigación multidisciplinar y global en Ciencias de la Tierra. EPOS es un portal único a través del cuál se integran una gran variedad de observaciones sobre el planeta Tierra, lo cual lo hace indispensable para hacer frente a desafíos como el uso sostenible del subsuelo o la monitorización de peligros naturales. EPOS contempla, no solo el acceso a datos brutos, también a aquellos productos resultado del procesado de datos, servicios, software y acceso a instalaciones. EPOS-España busca, entre otras acciones: (i) implementar y/o consolidar los nodos españoles de los 10 servicios temáticos; (ii) Fortalecer las relaciones con otras organizaciones y programas internacionales; (iii) Actuar como altavoz y punto de información de las acciones e iniciativas que se están llevando a nivel europeo; (iv) Promover el uso de EPOS en programas e iniciativas de investigación y formación nacionales e internacionales; y (v) Potenciar la base de servicios digitales de las instituciones nacionales que contribuyen a EPOS. EPOS-España persigue fortalecer el papel e importancia de España, y sus grupos de investigación participantes, en el desarrollo e implementación de EPOS. Ayuda EPOS-SpN RED2022-134516-E financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Abstract

The European Plate Observing System (EPOS) (https://www.epos-ip.org/) currently stands as the sole European infrastructure for multidisciplinary and global research in Earth Sciences. EPOS serves as a unique portal through which a wide array of observations about the planet Earth are integrated, making it indispensable for addressing challenges such as sustainable use of the subsurface, or monitoring of natural hazards. EPOS encompasses, not only access to raw data, but also to data products, services, software, and access to facilities. EPOS-Spain seeks, among other actions: (i) to implement and/or consolidate Spanish nodes of the 10 thematic services; (ii) to strengthen relationships with other international organizations and programs; (iii) to act as information point regarding actions and initiatives being carried out at the European level; (iv) to promote the use of EPOS in national and international research and training programs and initiatives; and (v) to enhance the digital services base of national institutions contributing to EPOS. Additionally, EPOS-Spain aims to strengthen the role and importance of Spain, and the participating research groups, in the development and implementation of EPOS. The EPOS-SpN RED2022-134516-E project is funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

The lithosphere and upper mantle of the Western-Central Mediterranean region from geophysical-geochemical modelling.

La litosfera y el manto superior del Mediterráneo Occidental-Central a partir de modelización geofísico-geoquímica.

I. Jiménez-Munt[1], M. Torne[1], W. Zhang[1,2], A.M. Negredo[3,4], J. Vergés[1], E. Bravo-Gutierrez[1], D. García-Castellanos[1]

1 1Geosciences Barcelona, Geo3BCN-CSIC, Barcelona, Spain.
2 Department of Earth and Ocean Dynamics, University of Barcelona, Barcelona, Spain.
3 Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.
4 Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM), Madrid, Spain.

Palabras clave: Estructura termo-mecánica de la litosfera y manto superior, anomalías sublitosféricas, cuña mantélica, Placa de Adria, Apeninos y Dinarides.

Resumen

Este estudio presenta un modelo que integra datos geofísicos-geoquímicos para investigar la estructura termoquímica de la litosfera y el manto sublitosférico a lo largo de la Cuenca del Tirreno, los Apeninos, el Mar Adriático, los Dinarides y los Cárpatos-Balcanes. El modelo revela la presencia de dos cuñas del manto astenosférico alineadas con el retroceso de la placa continental que subduce en los Apeninos y los Dinarides, y la presencia de anomalías térmicas sublitosféricas (-200 °C) debajo de los márgenes NE y SO de Adria. En la región norte de Adria, la litosfera experimenta un adelgazamiento sincrónico en el dominio del Tirreno y un engrosamiento hacia el frente de los Apeninos septentrionales. Esto está asociado con la migración hacia el noreste del margen SO de la placa Adriática, lo que produce la posterior delaminación del manto continental. En la región sur de Adria, la complejidad de la estructura profunda resulta de las distintas orientaciones de las placas y el cambio de casi 90 grados en la dirección tectónica entre los Apeninos del sur y el Arco de Calabria. En el margen SO de Adria, debajo de los Apeninos septentrionales, la anomalía sublitosférica térmica está conectada a la litosfera más superficial, mientras que en los Apeninos del sur la anomalía térmica está separada de la litosfera. Una posibilidad es que este espacio se deba a un reciente desgarro horizontal de la placa. En el margen NE de Adria, la anomalía térmica penetra a profundidades de aproximadamente 200 km en los Dinarides septentrionales y 280 km en los Dinarides meridionales, más superficial que la anomalía en el SO de Adria, que se extiende hasta al menos 400 km de profundidad. (Zhang et al., 2022, Zhang et al., 2024).

Abstract

This study presents a geophysical-geochemical modelling methodology to explore to the thermochemical structure of the lithosphere and sublithospheric mantle, along the Tyrrhenian Basin, Apennines, Adriatic Sea, Dinarides, and Carpathians-Balkanids. The modelling reveals the existence of two asthenospheric mantle wedges corresponding to the Apenninic and Dinaric continental mantle slab rollback. Additionally, it identifies a cold (-200ºC) sublithospheric anomalies beneath the NE and SW margins of Adria. In the northern Adria region, the lithosphere experiences simultaneous thinning in the Tyrrhenian domain and thickening towards the forefront of the northern Apennines. This is linked to the northeastward migration of the SW Adriatic slab rollback, leading to subsequent delamination of the continental mantle. In the southern Adria region, the intricate deep structure results from the variably oriented lithospheric slabs, and a nearly 90-degree shift of the tectonic grain between the southern Apennines and the Calabrian Arc. At the SW Adria margin, beneath the northern Apennines, the thermal sublithospheric anomaly is connected to the shallower lithosphere, while a slab gap is modelled in the southern Apennines. One plausible explanation is that the gap may be a result of a recent horizontal slab tear. At the NE margin of Adria, the thermal anomaly penetrates to depths of approximately 200 km in the northern Dinarides and 280 km in the southern Dinarides, shallower than SW Adria anomaly, which extends to at least 400 km depth. (Zhang et al., 2022, Zhang et al., 2024)

Zhang et al. (2020). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi: 10.1029/2022JB024800.
Zhang et al. (2024). Journal of Geophysical Research: Solid Earth. doi: 10.1029/2023JB028435

Cartografía del ecocarácter del margen continental y de las llanuras abisales adyacentes del sector norte y noreste de Iberia

Echo-character mapping of the continental margin and the adjacent abyssal plains of the north and northeast sector of Iberian

A. Maestro[1], A. Gallastegui[1], M. Moreta[1], F. Fernández Saéz[1], E. Llave[1], S. Mink[1], F. Bohoyo[1], M. Druet[1], J. Navas[1], M. Catalán†[2], M. Gómez Ballesteros[3], A. Carbó†[4], A. Muñoz Martín[4] y J.L. Granja[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC. C/ Calera, 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. a.maestro@igme.es; albagv9415@gmail.com; mercedesbermejo9@hotmail.com; ffdezsaez@gmail.com; e.llave@igme.es; s.mink@igme.es; f.bohoyo@igme.es; m.druet@igme.es; j.navas@igme.es

2 Real Instituto y Observatorio de la Armada, C/ Cecilio Pujazón s/n, 11110 San Fernando, Cádiz. mcatalan@roa.es

3 Instituto Español de Oceanografía, CSIC. C/ Corazón de María, 8, 28002 Madrid. maria.gomez@ieo.csic.es

4 Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Novais, 12, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid. carbo@geo.ucm.es ; amunoz@geo.ucm.es; jlgranja@geo.ucm.es

Resumen: La cartografía y análisis de las facies acústicas que se determinan a partir de la interpretación y correlación de los perfiles sísmicos de muy alta resolución, es una herramienta muy útil para la caracterización de los procesos sedimentarios recientes y su distribución en ambientes marinos profundos. Este trabajo presenta el primer mapa de ecocarácter del Margen Continental de Galicia y las llanuras abisales adyacentes. El mapa se realizó sobre la base del análisis e interpretación de los datos de batimetría y reflectividad de las ecosondas multihaz SIMRAD EM12, EM120 y EM1002, y los perfiles sísmicos de muy alta resolución de la ecosonda paramétrica SIMRAD TOPAS PS18. Sobre la base de la morfología del fondo marino, la reflectividad y los caracteres del eco acústico, se identificaron 30 tipos de ecos en la secuencia sedimentaria más superficial. Estos tipos de eco se han clasificado en cuatro grupos principales: bien definidos, irregulares, hiperbólicos y ondulados. Esta información ha sido adquirida en el marco del 'Programa de Investigación Científica de la Zona Económica Exclusiva Española', coordinado por el Ministerio de Defensa, durante las campañas oceanográficas que se han realizado a bordo del BIO Hespérides del 2001 a 2003, del 2006 a 2009, 2014 y 2015.

Palabras clave: batimetría, ecocarácter, Margen Continental de Galicia, perfiles sísmicos de muy alta resolución, reflectividad.

Abstract: *The acoustic facies mapping and analyses from the interpretation and correlation of very high-resolution seismic profiles, is a very useful tool for the characterization of the recent sedimentary processes and their distribution in the deep-sea environments. This work presents the first echo-character map of the Galicia Continental Margin and the adjacent abyssal plains. The map was carried out based on the analysis and interpretation of the bathymetry and reflectivity data from the SIMRAD EM12, EM120 and EM1002 multibeam echosounders, and the high-resolution seismic profiles from the SIMRAD TOPAS PS18 parametric echosounder. Based on the seafloor morphology, backscatter and acoustic echo-characters, 30 echo types were identified in the uppermost sedimentary sequence. These echo-types have been classified into four main groups: Distinct, Irregular, Hyperbolic and Undulated echoes. This information has been acquired in the framework of the 'Scientific Research Program of the Economic Exclusive Zone of Spain', which is coordinated by the Ministry of Defence, during the oceanographic cruises carried out on board of the R/V Hesperides in 2001 to 2003, 2006 to 2009, 2014 and 2015.*

Key words: *bathymetry, echo-character, high-resolution seismic profiles, Iberian continental margins, backscatter.*

INTRODUCCIÓN

Desde los años 50 del siglo XX, el análisis de facies acústicas usando registros sísmicos (3,5 kHz, pinger, 12 kHz, Sonda Paramétrica o TOPAS) ha constituido una técnica relevante para el estudio del tipo de sedimento, así como de los procesos sedimentarios en ambientes profundos. Aunque B. C. Heezen fue el primer geólogo marino que llevó a cabo dichos estudios a partir del análisis de la reflectividad del fondo (Heezen et al., 1959), fue J. E. Damuth quien propuso la primera clasificación de la respuesta acústica en ambientes profundos, divulgando su metodología a la comunidad científica marina (e.g., Damuth, 1975, 1978, 1980). Desde entonces, son numerosos los trabajos que confirman la efectividad de utilizar el ecocarácter como método indirecto para la caracterización de procesos sedimentarios.

En este trabajo se presenta la cartografía de ecocarácter del margen continental de Galicia realizado a partir de la clasificación de las facies acústicas observadas en los registros sísmicos de alta resolución procedentes de la sonda paramétrica TOPAS adquiridos

durante las campañas de la Zona Económica Exclusiva Española (ZEEE) de los años 2001 a 2003, del 2006 a 2009, 2014 y 2015. Para este análisis se utiliza la metodología propuesta por Damuth (1975, 1978, 1980) donde se realizan los siguientes pasos: i) Análisis de la malla de perfiles sísmicos de alta resolución; ii) Clasificación específica de los diferentes ecos observados; y iii) Cartografía de cada tipo de eco a lo largo del trazado de la línea sísmica y la consiguiente interpolación entre líneas adyacentes.

MARCO GEOLÓGICO

La actual configuración del margen norte de Iberia se debe a su evolución tectónica desde el Mesozoico. Entre el Valanginiense-Barremiense y el Aptiense, se sucedieron varios episodios de transtensión y extensión de la corteza continental relacionados con la apertura del Océano Atlántico, siendo el Golfo de Vizcaya una rama del rift principal (e.g., Malod y Mauffret, 1990). Este proceso supuso una rotación en sentido antihorario de la Placa Ibérica respecto a la Placa Euroasiática (e.g., Olivet et al., 1984). La tectónica extensional dio lugar al desarrollo de grandes fallas normales y bloques basculados de dirección aproximadamente ONO-ESE a E-O en el margen norte de Iberia, y N-S y NE-SO en el margen de Galicia. En el Cenomaniense superior y hasta al menos el Oligoceno, el empuje de la Placa Africana hace converger a Iberia con Eurasia, dando lugar a la formación del Orógeno Pirenaico y a la inversión tectónica parcial del margen noribérico y la subducción del Margen Cantábrico (e.g., Mauffret y Montadert, 1987). Desde el Mioceno hasta la actualidad han tenido lugar eventos tectónicos de menor intensidad relacionados con una dirección de acortamiento NO-SE a ONO-ESE (e.g., Olaiz et al., 2009). Los estudios estratigráficos y sedimentológicos (e.g., Comas y Maldonado, 1988; Ercilla et al., 2008) muestran que el registro sedimentario desarrollado desde el Cretácico hasta el Cuaternario está fundamentalmente controlado por la evolución tectónica de la zona. Los depósitos sedimentarios cenozoicos incluyen turbiditas, (hemi)pelagitas, contornitas y debritas. Durante el Mioceno superior predominan los depósitos de tipo contornítico y de debritas, mientras que las secuencias plio-cuaternarias se caracterizan por la presencia de sedimentos de origen turbidítico, debritas, contorníticos y (hemi)pelágicos.

MARCO OCEANOGRÁFICO

En el sector norte y noreste del margen ibérico existen cinco masas de agua principales que fluyen hacia el norte a lo largo del margen a distintas profundidades (e.g. Iorga and Lozier 1999; González-Pola 2006): (1) el Agua Profunda Inferior (Lower Deep Water, LDW), compuesta principalmente por Agua de Fondo Antártica (Antarctic Bottom Water, AABW) y que fluye regionalmente por debajo de los 4.000 m principalmente a través de las llanuras abisales; (2) el Agua Profunda del Atlántico Norte (North Atlantic Deep Water, NADW), que fluye en varias direcciones entre los 4.000 y los 2.200 m de profundidad; (3) el Agua del Mar del Labrador (Labrador Sea Water, LSW), que circula regionalmente hacia el suroeste entre los 2.200 y los 1.500 m de profundidad (el núcleo principal se localiza a ~1.800 m); (4) el Agua de Salida del Mediterráneo, situada entre 1.500 y 600 m de profundidad, con el núcleo principal a ~1.200 m, que fluye hacia el norte y el oeste a lo largo del talud medio alrededor del margen ibérico hacia el Golfo de Vizcaya; y (5) el Agua Central del Atlántico Norte (NACW), caracterizada por un patrón de circulación complejo que implica diferentes corrientes y direcciones entre 600 m y la superficie (el núcleo principal selocaliza a ~350 m).

METODOLOGÍA

Los datos analizados en este trabajo proceden de las campañas oceanográficas realizadas en el marco del Programa de Investigación Científica de la Zona Económica Exclusiva Española (ZEEE) desarrolladas en el Margen Continental de Galicia, a bordo del BIO Hespérides, durante los años 2001 a 2003, del 2006 a 2009, 2014 y 2015. La zona cartografiada abarca una superficie de 274.773 km^2.

Este estudio está basado en el análisis e interpretación de los datos batimétricos y de reflectividad obtenidos con las ecosondas SIMRAD EM12 (hasta 2004), EM120 (desde 2005) y la EM1002 (en 2006), y de registros sísmicos de reflexión de muy alta resolución, adquiridos con la sonda paramétrica SIMRAD TOPAS PS18. Se han analizado e interpretado un total 760 perfiles sísmicos con una longitud total de 49.570 km.

4. CLASIFICACIÓN DEL ECOCARÁCTER

Se ha elaborado una clasificación específica para el área de estudio utilizando la metodología y basándonos en las clasificaciones propuestas por Damuth (1975, 1978, 1980). Los tipos de ecos se han agrupado en 4 clases principales: 1) Eco bien definido, 2) Eco irregular, 3) Eco hiperbolado y 4) Eco ondulado (Fig. 1 y 2).

1) Eco bien definido. Este tipo de eco se caracteriza por presentar un eco marcado continuo y uniforme de la superficie del fondo. Dentro de esta primera clase de eco marcado se han diferenciado un total de 14 subtipos de ecos, del A al N, que ocupan una superficie de la zona cartografiada de 149.020 km^2.

2) Eco irregular. Este tipo de eco es típico de zonas escarpadas o abruptas del fondo marino. Se ha descrito tres subtipos de ecos, de A a D. Los ecos de tipo irregular cubren una superficie en el área cartografiada de 3.371 km^2.

3) Eco hiperbolado. Este tipo de eco puede darse tanto en áreas con morfologías suaves como fuertemente irregulares. Cubre una superficie de 75.416 km^2. Este eco se ha dividido en seis subtipos, de A a F, en función de la relación que existe entre los vértices de

las hipérbolas con respecto al fondo marino o los reflectores del subfondo.

4) Eco ondulado. Las morfologías del fondo onduladas producen ecos que en apariencia pueden ser casi-hiperbolados y que muestran una gran variedad de formas y tamaños. Este tipo de eco cubre una superficie de 46.966 km^2 dentro de la zona cartografiada. Se han diferenciado tres subtipos, desde A a F.

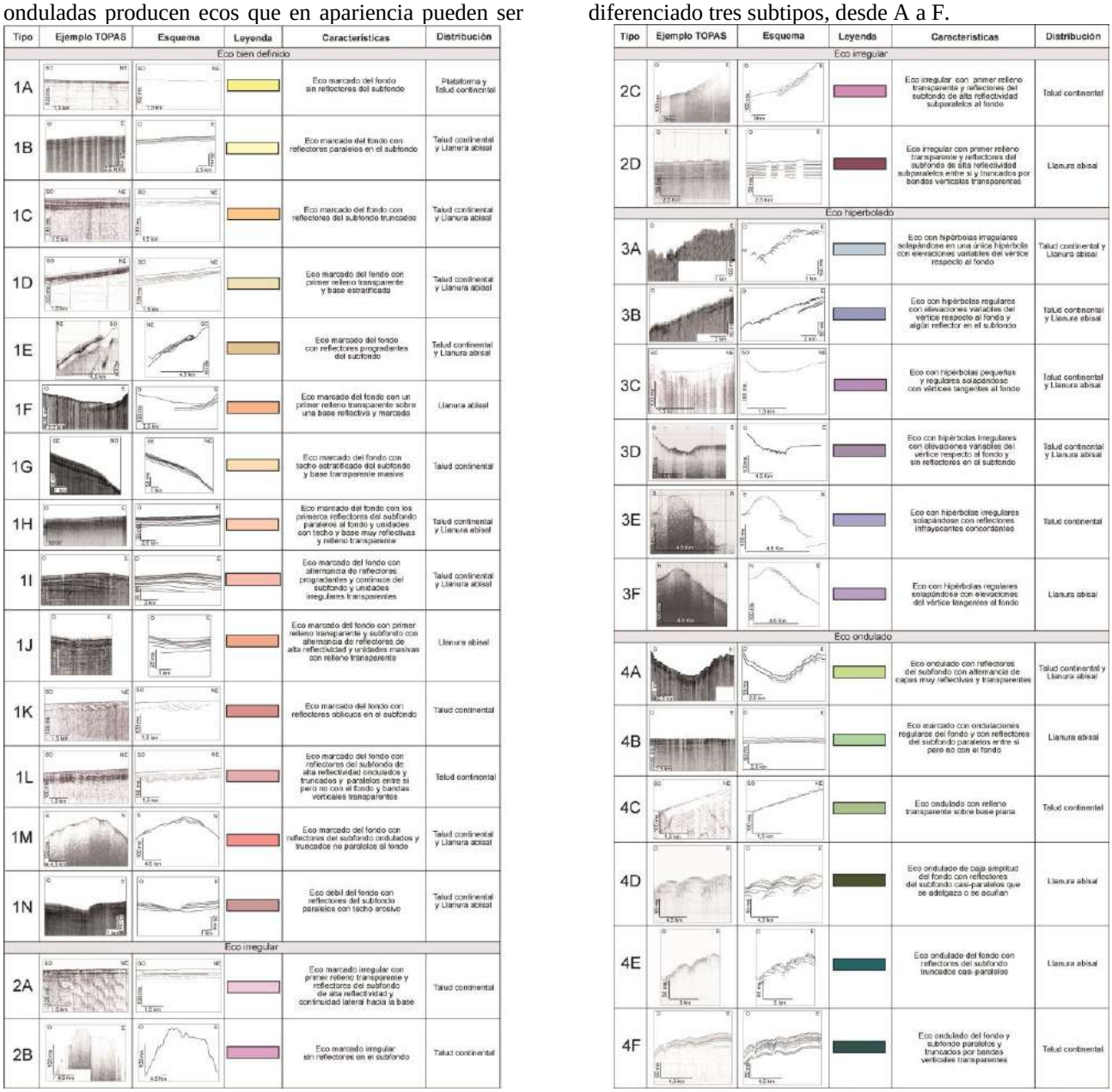


FIGURA 1. *Clasificación de tipos y subtipos de ecocarácter establecida para el sector norte y noreste del margen Ibérico.*

CONCLUSIONES

El mapa de ecocarácter del Margen Continental de Galicia y las llanuras abisales adyacentes que se presenta en este trabajo se realizó mediante la interpretación y correlación de los datos de batimetría y reflectividad de las ecosondas multihaz SIMRAD EM12, EM120 y EM1002, y los perfiles sísmicos de alta resolución de la ecosonda paramétrica SIMRAD TOPAS PS18. Estos datos se obtuvieron en nueve campañas oceanográficas realizadas a bordo del BIO Hespérides en los períodos 2001 a 2003, del 2006 a 2009, 2014 y 2015. El mapa ha sido elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, en el marco del 'Programa de Investigación Científica de la Zona Económica Exclusiva de España', coordinado por el Ministerio de Defensa.

El mapa muestra la localización y distribución de las diferentes facies acústicas identificadas sobre el modelo digital del fondo marino sombreado. Sobre la base de la morfología del fondo marino, la reflectividad y los caracteres del eco acústico, se identificaron 30 tipos de ecos en la secuencia sedimentaria más superficial. Estos tipos de eco se han agrupado en cuatro clases de ecos principales: bien definidos, irregulares, hiperbólicos y ondulados. El propósito de este mapa es que sirva como herramienta que permita inferir la distribución de los sedimentos en el fondo marino, y especialmente para interpretar los procesos deposicionales, erosivos y gravitacionales recientes, ya que los tipos de ecos están

controlados principalmente por la topografía de la superficie del fondo marino, la geometría del subsuelo y la textura de los sedimentos y rocas superficiales y sub-superficiales.

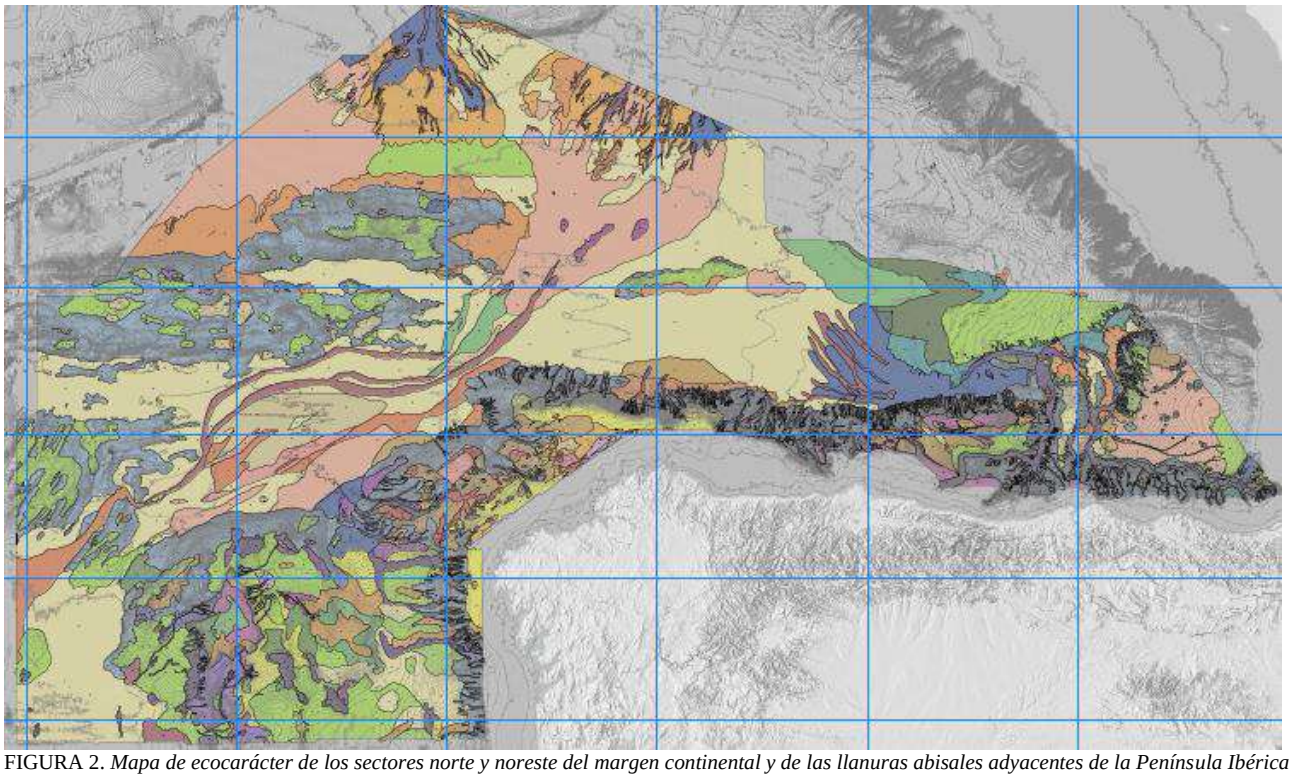


FIGURA 2. *Mapa de ecocarácter de los sectores norte y noreste del margen continental y de las llanuras abisales adyacentes de la Península Ibérica donde se muestran los distintos tipos de ecos definidos. La leyenda de colores está indicada en la Figura 1.*

AGRADECIMIENTOS

Estamos especialmente agradecidos a todos los que participaron en las campañas oceanográficas del proyecto de investigación de la ZEEE, coordinados por el IHM y el ROA, y los comandantes y tripulaciones del BIO Hespérides. Esta investigación fue financiada por los proyectos SEASTORAGE (proyecto de Transición Ecológica y Transición Digital con referencia TED2021-129816B-I00, financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/PRTR-C21 y por la Unión Europea NextGenerationEU) y ALGEMARES (PID2021-123825OB-I00). Este trabajo está dedicado a la memoria del Dr. Manuel Catalán Morollón, que nos dejó el pasado 12 de diciembre de 2023.

REFERENCIAS

Comas, M.C. y Maldonado, A. (1988): Late Cenozoic sedimentary facies and processes in the Iberian Abyssal Plain, Site 637, ODP Leg 103. En: *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (G. Boillot, E.L. Winterer, et al., eds.), 635-655.

Damuth, J.E. (1975): Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Marine Geology*, 18: 17-45.

Damuth, J.E. (1978): Echo character of the Norwegian-Greenland Sea: relationship to Quaternary sedimentation. *Marine Geology*, 28: 1-36.

Damuth, J.E. (1980): Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echo- grams in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. *Marine Geology*, 38: 51-75.

Ercilla, G., Casas, D., Estrada, F., Vázquez, T., Iglesias, J., García, M., Gómez, M., Acosta, J., Gallart, J., Maestro-González, A. y Marconi Team (2008): Morphosedimentary features and recent depositional architectural model of the Cantabrian continental margin. *Marine Geology*, 247(1/2): 61-83

González-Pola, C. (2006): *Variabilidad climática en la región sureste del Golfo de Vizcaya*. Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo, 196 p.

Heezen, B.C., Tharp, M. y Ewing, M. (1959): The floors of the oceans, 1. The north Atlantic. *Geological Society of America Special Publication*, 65, 122 p.

Iorga, M. y Lozier, M.S. (1999); Signatures of the Mediterranean outflow from a North Atlantic climatology 1. Salinity and density fields. *Journal Geophysical Research*, 104: 25985-26009.

Malod, J.A. y Mauffret, A. (1990): Iberian plate motions during the Mesozoic, *Tectonophysics*, 184: 261-278.

Mauffret, A. y Montadert, L. (1987): Rift Tectonics on the passive continental margin off Galicia. *Marine and Petroleum Geology*, 4: 49-70.

Olaiz, A.J., Muñoz-Martín, A., De Vicente, G., Vegas, R. y Cloetingh, S. (2009): European continuous active tectonic strain-stress map. Tectonophysics, 474: 33-40.

Olivet, J.L., Bonnin, J., Beuzart, P. y Auzende, J.M. (1984): Cinématique de l'Atlantique nord et central. Rapport Science et Technologie, Paris, CNEXO, 54, 5 pl., 108 pp.

Tomografía eléctrica de la Falla de Alhama de Murcia (SE de España).

Electric resistivity tomography of the Alhama de Murcia Fault (SE of Spain)

J.F. Mediato[1], R. Pérez-López[2], F. Rubio Sánchez-Aguililla[1], J. López-Gutiérrez[1], A. García-García[1], M. Rodrigo-Viñuela[2], J.M. Llorente-Delgado[2], B. del Moral[2], F.J. Fernández-Naranjo[1], P. Fernández-Canteli[1].

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Rios Rosas 23, Madrid, jf.mediato@igme.es

2 Instituto Geológico y Minero de España (CN-IGME-CSIC). La Calera,1, Tres Cantos

Palabras clave: Falla, Alhama de Murcia, tomografía eléctrica, rambla, depocentro,

Resumen

La Falla de Alhama de Murcia es una de las fallas más activas de España y responsable de los últimos terremotos destructivos. Se trata de una falla inversa como componente en desgarre siniestra, con varios sectores activos en dirección SO-NE y una extensión de más de 100 km. Los objetivos de realizar perfiles de tomografía eléctrica a lo largo de falla son: determinar la ubicación exacta de la falla en los diferentes tramos porque, normalmente, se encuentra cubierta o parcialmente cubierta por los depósitos actuales de rambla o depósitos aluviales y no tiene porqué mostrar expresión morfológica en superficie; y comprobar el comportamiento hidrogeológico de cada uno de los sectores para identificar lugares propicios para la monitorización de su actividad a partir de los distintos gases y líquidos que circulan a través de ella.

La campaña de campo realizada hasta el momento, en las Ramblas Vilerda, La Hoya y Lebor, indica cambios en los depocentros de los depósitos actuales, siendo mayor la actividad en la Rambla de Vilerda y La Hoya, y mucho menor en la Rambla de Lebor. Además, se observa en contacto con la falla la presencia de zonas mucho menos resistivas, que se entienden asociadas a la presencia de fluidos.

Abstract

The Alhama de Murcia Fault is one of the most active tectonic faults of Spain and it was responsible for the last destructive earthquake. This fault is a left-oblique fault, reverse with a strike-slip component, direction NE-SW and extended more than 100 km. The goals of electrical resistivity tomography profiles along the fault are: to determine the exact location of the fault in the different sections because, normally, it is covered or partially covered by the current rambla deposits or alluvial deposits and it does not have to morphological expression in surface; and analyse the hydrogeological behaviour of each of the sectors to identify favourable places for monitoring its activity based on the different gases and liquids that circulate through it.

The field trip carried out so far, in the Ramblas Vilerda, La Hoya and Lebor, indicates changes in the depocenters of the current deposits. Rambla Vilerda and La Hoya show greater activity and much less in the Rambla de Lebor. Furthermore, the presence of much less resistive zones is observed in contact with the fault, which are understood to be associated with the presence of fluids.

Nuevos datos gravimétricos y magnéticos marinos en el Margen Cantábrico occidental

New marine gravity and magnetic data in the western Cantabrian Margin

A. Muñoz-Martín[1]*, J.L. Granja-Bruña[1], M.A. de la Fuente[1], J. Fiz[2], M. Druet[3], A. Maestro[3], J. Gallastegui[4], M. Gómez-Ballesteros[5], A. Muñoz-Cemillán[1], M. Catalán†[2] & A. Carbó†[1]

1 Depto. GEODESPAL, Fac. de CC Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Novais, 2, 28040 Madrid. amunoz@ucm.es; jlgranja@ucm.es; miguelde@ucm.es.
2 Real Instituto y Observatorio de la Armada, C/ Cecilio Pujazón s/n, 11110 San Fernando, Cádiz. jfiz@roa.es
3 Instituto Geológico y Minero de España. C/ Calera, 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. a.maestro@igme.es; m.druet@igme.es.
4 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, Oviedo, España, jgallastegui@uniovi.es
5 Instituto Español de Oceanografía. C/ Corazón de María, 8, 28002 Madrid. maria.gomez@md.ieo.es

Palabras clave: Gravimetría, Magnetismo, Margen Cantábrico.

Resumen

Este trabajo muestra los resultados de los levantamientos gravimétricos y magnéticos marinos obtenidos en las campañas de la ZEEE a bordo del B/O Hespérides (2003, 2006–2009, 2014 y 2015), y del Proyecto MARIBNO (14/09 al 17/10 de 2021) a bordo del B/O Sarmiento de Gamboa. Se han adquirido nuevos datos gravimétricos y magnéticos a lo largo de secciones transversales y longitudinales del margen Cantábrico occidental. Estos datos permitirán constreñir la estructura profunda y la naturaleza del basamento, completando la información sísmica adquirida. Se han adquirido 4180 km lineales de datos gravimétricos y 1958 km de datos magnéticos (intervalo de muestreo de 1 s) usando un Gravímetro Air&Sea L&R y un magnetómetro Marine Magnetics SeaSpy. Los datos gravimétricos se han enlazado a la red terrestre con un gravímetro Scintrex CG-5 en la base del IGN en Vigo, incluyendo deriva instrumental. Para el cálculo de anomalías de Bouguer y de la corrección de fondo hasta los 22 km se han utilizado los datos de batimetría multihaz (haz central) y la malla procedente de la ZEE (resolución horizontal de 200 m). Las anomalías magnéticas se han corregido con el valor de IGRF para las fechas y posición de cada medida, y la variación diurna con el registro magnético de San Pablo (Toledo, IGN). El análisis de los datos muestra una gran variación de los perfiles de anomalías entre sí (rangos de variación de 460 nT y de 352 mGal), que permiten inferir una variación lateral de la estructura del margen y permitirá la delimitación de los dominios tectónicos y de la estructura de la corteza a lo largo del margen.

Abstract

This work shows the results of the gravimetric and marine magnetic surveys obtained in the EEZ campaigns on board the B/O Hespérides (2003, 2006–2009, 2014 and 2015), and the MARIBNO Project (09/14 to 10/17 2021) aboard the B/O Sarmiento de Gamboa. New gravimetric and magnetic data have been acquired along cross- and longitudinal sections of the western Cantabrian margin. These data will allow us to constrain the deep structure and nature of the basement, completing the seismic information acquired. Gravimetric data have been acquired over 4180 km, and 1958 km of magnetic data (1 s sampling interval) using an Air&Sea L&R Gravimeter and a Marine Magnetics SeaSpy magnetometer. Gravimetric data have been linked to the ground network with a Scintrex CG-5 gravimeter at the IGN base in Vigo, including instrumental drift. To calculate Bouguer anomalies and background correction (up to 22 km), multibeam bathymetry data (central beam) and the mesh from the EEZ (200 m horizontal resolution) have been used. The magnetic anomalies have been corrected with the IGRF value for the dates and position of each measurement, and the diurnal variation with the San Pablo magnetic record (Toledo, IGN). The data analysis shows a significant variation in anomaly profiles among themselves (variation ranges of 460 nT and 352 mGal), which allow inferring a lateral variation of the margin structure and will enable the delimitation of tectonic domains and crustal structure along the margin.

AGRADECIMIENTOS. Este trabajo está dedicado a la memoria de los Doctores Manuel Catalán Morollón y Andrés Carbó Gorosabel, que nos dejaron el pasado 2023.

Inversión gravimétrica 3D en Gran Canaria constreñida por datos de resistividad.

3D gravity inversion in Gran Canaria constrained by resistivity data.

A. Olaiz[1], A. García-Craviotto[1], J.L Huedo[1], I. García-Saiz[1], J. Torres-Torremocha[1], J. Álvarez[1], J. Diez-Masip[1], A. Arnáiz[1] y G. Marro[1].

1 Repsol Exploración. Dirección de Bajas Emisiones en Carbono. C/Méndez Álvaro, 44, 28045, Madrid. antoniojose.olaiz@repsol.com, axel.garcia@repsol.com, joseluis.huedo@repsol.com, i.garcia.saiz@repsol.com, javier.torres@repsol.com, jalvarezga@repsol.com, jdiezm@repsol.com, aarnaiz@repsol.com, gmarrof@repsol.com

Resumen: Con motivo de las actuales estrategias de descarbonización, las empresas energéticas se están posicionando en el sector de la geotermia. La aplicación de técnicas geofísicas no invasivas es determinante para ahondar en el conocimiento de la estructura interna de áreas volcánicas como la Isla de Gran Canaria. Los recientes datos gravimétricos adquiridos por Repsol en 2023, junto con los datos de dominio público disponibles, han posibilitado un análisis detallado de la distribución de densidades en profundidad mediante inversión 3D. Posteriormente, se ha empleado el modelo de resistividades 3D generado a partir de la inversión de los datos registrados en las nuevas estaciones magnetotelúricas desplegadas durante la misma campaña, y del que se extrae la superficie superior del cuerpo de alta resistividad. Al incluir dicha superficie en el modelo geológico inicial y realizar una nueva inversión gravimétrica, la distribución de densidades obtenida responde de forma más coherente con los estudios previos, principalmente de MT. La integración de gravimetría y MT contribuye a avanzar en la comprensión de las estructuras subsuperficiales en regiones volcánicas.

Palabras clave: gravedad, magnetotelúrico, inversión tridimensional, Gran Canaria.

Abstract: *Due to current decarbonization strategies, energy companies are strategically entering the geothermal sector. Employing non-invasive geophysical techniques is crucial for deepening our understanding of the internal structure of volcanic areas, such as the Island of Gran Canaria. The recent gravimetric data obtained in 2023, in conjunction with publicly available data, have facilitated a detailed analysis of density distribution in depth through 3D inversion. Subsequently, the resistivity model, derived from the 3D inversion of newly deployed magnetotelluric stations during the same campaign, has been utilized. This model extracts the upper surface of the high resistivity body. By incorporating this surface into the initial geological model and conducting a new gravity inversion, the obtained density distribution aligns more coherently with previous studies, mainly MT. This integration of gravity and MT contributes to advancing our comprehension of subsurface structures in volcanic regions.*

Key words: *gravity, magnetotelluric, inversion, Gran Canaria*

INTRODUCCIÓN

En el año 2023, en el marco de la actividad de exploración geotérmica del permiso Lisa, otorgado por el Gobierno de Canarias, se ha realizado la adquisición de una campaña geofísica en la isla de Gran Canaria que incluye la adquisición de datos magnetotelúricos y gravimétricos. Estas técnicas no invasivas permiten estudiar la distribución en profundidad de resistividad y densidad.

Los primeros estudios de gravimetría realizados en la isla de Gran Canaria son los publicados por Bosshard y MacFarlane (1970) y Camacho et al., (2000), aunque la cobertura no es completa en toda la isla. Sin embargo, no es hasta el trabajo de Montesinos et al. (2022) en el que registran 263 nuevas estaciones, que junto a las del Instituto Geográfico Nacional (265 estaciones) y las del Bureau Gravimétrico Internacional (87 estaciones), cuando el mapa gravimétrico es continuo con una separación entre estaciones de 2-3 km.

MARCO GEOLÓGICO

A pesar de que no hay afloramientos, la actividad volcánica en Gran Canaria, al igual que en las otras islas, comienza con un vulcanismo submarino de gran volumen. La actividad volcánica más antigua datada en la isla (14 Ma) está constituida por coladas basálticas en escudo (Carracedo et al., 2002). Posteriormente, entre 13.9 y 13.3 Ma se reconoce un cambio composicional, con mayor contenido félsico (Carracedo et al., 2002). En este periodo la cámara magmática colapsó y se formó la Caldera de Tejeda, la cual fue cubierta por depósitos

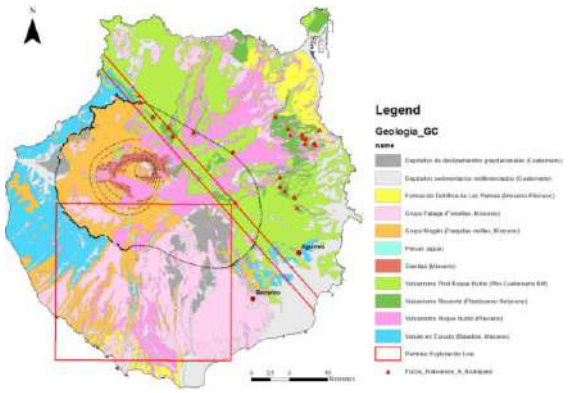


FIGURA 1. *Mapa geológico de Gran Canaria (modificado de Rodríguez-González et al., 2018) y el área permiso Lisa.*

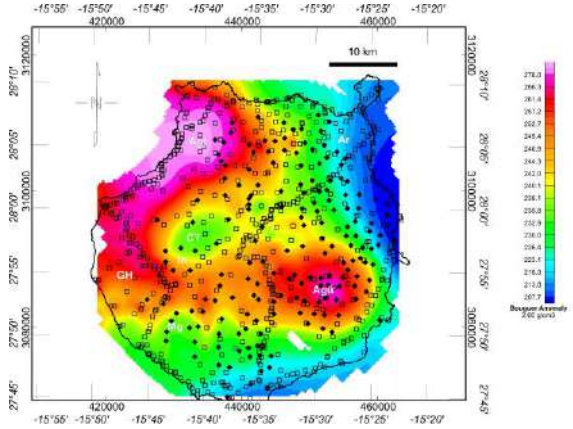


FIGURA 2. *Mapa de anomalía completa de Bouguer, con densidad de corrección 2.60g/cm^3. Los puntos huecos representan las estaciones previas que aparecen en el BGI, IGN y Montesinos et al., 2022. Los puntos rellenos representan las estaciones adquiridas en 2023.Agt: Agaete, Agü. Agüimes, Ar; Arucas; CT: Caldera de Tejera; GH: Güigüi-Horgazales, In: Inagua y Mg: Mogán*

ignimbríticos y un complejo de diques sieníticos (Carracedo et al., 2002). Posteriormente, un nuevo periodo de rejuvenecimiento de la actividad volcánica está datado entre 4.9 y 2.6 Ma con la creación de un estratovolcán conocido como Roque Nublo, en el que se depositaron rocas piroclásticas y lavas basaníticas. Por último, un periodo conocido como Post Roque Nublo y que se extiende entre 3.0 Ma y 3000 años, formó una serie de edificios volcánicos monogénicos en el noreste de la isla (Rodriguez-González et al., 2018) (Fig. 1). A partir de los eventos descritos se han generado las superficies que se incluirán en el modelo geológico de partida: Edifico Submarino (ES), Escudos Antiguos (EA), Post Escudos Antiguos (PEA), Roque Nublo (RN), Post Roque Nublo (PRN) y Sedimentos (S). En las dos primeras superficies, se observa claramente la geometría de la Caldera de Tejeda, mientras que las superficies posteriores están más controladas por la topografía (Figs. 1).

METODOLOGÍA

En la campaña de Repsol 2023 se adquirieron 175 nuevas estaciones distribuidas por toda la isla, con una separación de unos 2 km, excepto en el cuadrante noroeste donde la separación es próxima a los 4 km. Para la campaña de campo se han utilizado 3 gravímetros Scintrex CG-5 y GPS Topcon Hiper SR. De cara a una correcta integración con los datos gravimétricos previamente adquiridos en la isla, se crearon 8 estaciones base, que se enlazaron a las estaciones absolutas establecidas por el IGN, mediante un doble itinerario de ida y vuelta entre cada una de las nuevas bases y la absoluta, con una desviación estándar < |0.01|. En cada jornada de trabajo, se abrieron y cerraron los recorridos en dos estaciones, obteniendo variaciones por debajo de 0.1 mGals, a pesar de las variaciones de altitud de los recorridos. Como control de calidad de los datos, se han repetido un 12% de las estaciones con unas diferencias no mayores de 0.03 mGals.

Tras la adquisición, se ha procedido a integrar la nueva información con la previamente existente, pudiendo así procesar todos los datos de forma conjunta. Se ha tomado la gravedad observada tanto de las estaciones publicadas como de las de la campaña de 2023. Posteriormente se han aplicado las correcciones de Aire Libre, Bouguer y Topográfica, obteniendo un mapa de Anomalía Completa de Bouguer, con paso de malla de 1 km, interpolada con el método de inverso a la distancia. Para la corrección Topográfica se han usado distintos modelos digitales del terreno, desde los 2 metros de pixel suministrado por el IGN a partir de LIDAR, para las distancias menores de 1000 metros; hasta modelos suavizados a 500 metros para distancias mayores (entre 10 y 167 km). Aunque se han probado distintas densidades de corrección, para la interpretación se han escogido los mapas con densidad 2.60 g/cm^3 ya que es la más apropiada para las litologías previstas (Montesinos et al., 2022) (Fig. 2).

A partir de los mapas geológicos de Gran Canaria y de la información del subsuelo disponible, como por ejemplo los pozos geotérmicos Agüimes y Barranco perforados en 1981 y que alcanzaron los 648 y 670 m respectivamente, se han generado las superficies de las principales unidades geológicas: ES, EA, PEA, RN, PRN y S.

La inversión gravimétrica tridimensional se ha realizado con el software GMSYS incluido en Oasis Montaj, basado en los algoritmos de Parker (1972). Inicialmente se genera un modelo geológico, cuyas propiedades vienen definidas por las superficies (ES, EA, PEA, RN, PRN y S) y las densidades (Tabla 1). Una vez establecido el modelo geológico, se calcula la respuesta gravimétrica generada y se calcula la diferencia con la señal gravimétrica observada. En esta aproximación, si la diferencia es positiva, existe deficiencia de masa en el modelo geológico, mientras que, si la diferencia es negativa, el modelo tiene exceso de masa. De forma iterativa, modificando las superficies o la distribución de densidades, la diferencia entre la gravedad calculada y la observada se reduce hasta llegar a una convergencia. El modelado gravimétrico es una técnica en la que distintos modelos geológicos pueden producir la misma señal, debido a su no unicidad inherente al método geofísico, por ello es necesario constreñir de la mejor forma posible

el modelo de partida y las variaciones que se producen en cada iteración.

DISCUSIÓN

Los valores máximos (> 270 mGals) de anomalía de Bouguer se observan en la parte noroccidental de la isla, próximo a Agaete. Dicho máximo se prolonga hacia el sur, hasta el norte de Mogán. Al este, en Agüimes, se observa otro máximo relativo (> 260 mGals), que parece prolongarse hacia el oeste hasta unirse la anomalía de Güigüi-Horgazales. Estos valores máximos rodean un mínimo gravimétrico, casi circular, ligeramente desplazado respecto a la caldera del Volcán de Tejeda. Esta disposición de máximos es muy similar a la anteriormente observada por Montesinos et al. (2022), radicando sus mayores diferencias al sur de Mogán y en Inagua, al cubrirse nuevas localizaciones con datos inéditos presentados en este trabajo.

En este proyecto se ha generado un modelo geológico con las superficies del Edifico Submarino, Escudos Antiguos y Post Escudos Antiguos, por considerarse las que mayor contraste de densidad presentan, tener mayor expansión lateral y observarse una buena correlación con la señal gravimétrica. Las densidades iniciales con las que generar el modelo de partida se han usado las publicadas por García-González et al. (2020) en distintas localizaciones en la isla. Además, en aquellas unidades donde no existen datos publicados se han utilizado densidades por analogía con otras islas o con datos bibliográficos en función de la litología (Tabla I). Tras sucesivas iteraciones, se obtiene una reducción considerable entre la anomalía gravimétrica teórica y observada, persistiendo una ligera deficiencia de masa en la zona noroeste. Los resultados de esta inversión muestran que la Caldera de Tejeda (CT) alcanza una profundidad de 3000 metros bajo el nivel del mar, aumentando considerablemente la profundidad respecto a las interpretaciones previas. Así mismo, la densidad obtenida a esta profundidad es 3.0 g/cm^3 (Fig. 3).

Junto con la adquisición de datos gravimétricos, se realizó una campaña magnetotelúrica (García-Craviotto et al., 2024), que define un modelo de resistividades mediante inversión 3D. De esta forma, se define un cuerpo continuo de 400 ohm*m, que ocupa la parte central de la isla. Por analogía con otros modelos de resistividad en zonas volcánicas (Cumming y Mackie, 2010), se puede asociar esta superficie como el límite del cuerpo resistivo que define la geometría de las intrusiones sieníticas (Fig. 1). Finalmente, se han usado los valores de resistividad del pozo Agüimes, para definir un valor de densidad de 2.8 g/cm^3, que está alineado con los valores que se encuentran en la bibliografía. para las sienitas

El modelo geológico de partida se modifica con la inclusión del volumen limitado por la superficie de 400 ohm*m, reajustando la gravedad observada. Se repite el proceso iterativo de inversión, pero manteniendo la densidad de la intrusión sienítica. De esta forma, la geometría de la caldera permanece constreñida por la geometría calculada en el modelo de resistividades obtenido de los datos magnetotelúricos. Los resultados de la inversión gravimétrica muestran que inicialmente, a nivel del mar, las densidades son similares a las obtenidas en la inversión gravimétrica previa en la zona de la caldera, con valores en torno a 2.35 g/cm^3, aunque el cuerpo resistivo define una zona con mayor resistividad en el sur. A 1000 metros por debajo del nivel del mar, la distribución de densidades es radicalmente distinta a la del modelo previo, donde se mantenía próxima a 2.35 g/cm^3, mientras en la segunda inversión pasa a 2.80 g/cm^3, aumentando progresivamente hasta 2.90 g/cm^3(Fig. 3).

Ejemplo	Densidad (g/cm^3)
Escudo Submarino	2.90 (2.60-3.00)
Escudo Antiguo	2.80 (2.40-3.00)
Post Escudo Antiguo	2.50 (2.40-2.80)
Roque Nublo	2.50 (2.30-2.80)
Post Roque Nublo	2.35 (2.30-2.80)
Sienita	2.90

TABLA I. *Valores de densidad de las unidades incluidas en el modelo geológico inicial. Entre paréntesis, el rango de variación en la inversión. gravimétrica 3D.*

CONCLUSIONES

Los nuevos datos gravimétricos adquiridos en 2023 y presentados en este trabajo confirman la interpretación previa propuesta por Montesinos et al. (2022), aumentando la resolución de la malla y mejorando la cobertura en la zona suroeste de Gran Canaria. Estos autores relacionan las anomalías con los escudos propuestos por Schminke y Sumita (1998), quedando excluido el escudo de Arucas y limitando su extensión hacia el sur el escudo de Güigüi-Horgazales.

La inversión gravimétrica, combinada con los resultados de modelos de distribución de resistividades obtenida de datos magnetotelúricos, permite definir la distribución de densidades en Gran Canaria. Estas densidades están asociadas a los rasgos estructurales y de la evolución volcánica de la isla.

La creación del modelo geológico inicial y cómo se limitan las variaciones a aplicar en cada iteración son determinantes en los resultados finales y deben ser validadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento en primer lugar a Repsol por permitir la publicación de los resultados de este trabajo, y a las empresas Geoinvest y Schlumberger, por su labor durante la adquisición y el procesado de los datos. Nos gustaría dar las gracias a los revisores por sus detallados comentarios que han mejorado el texto original.

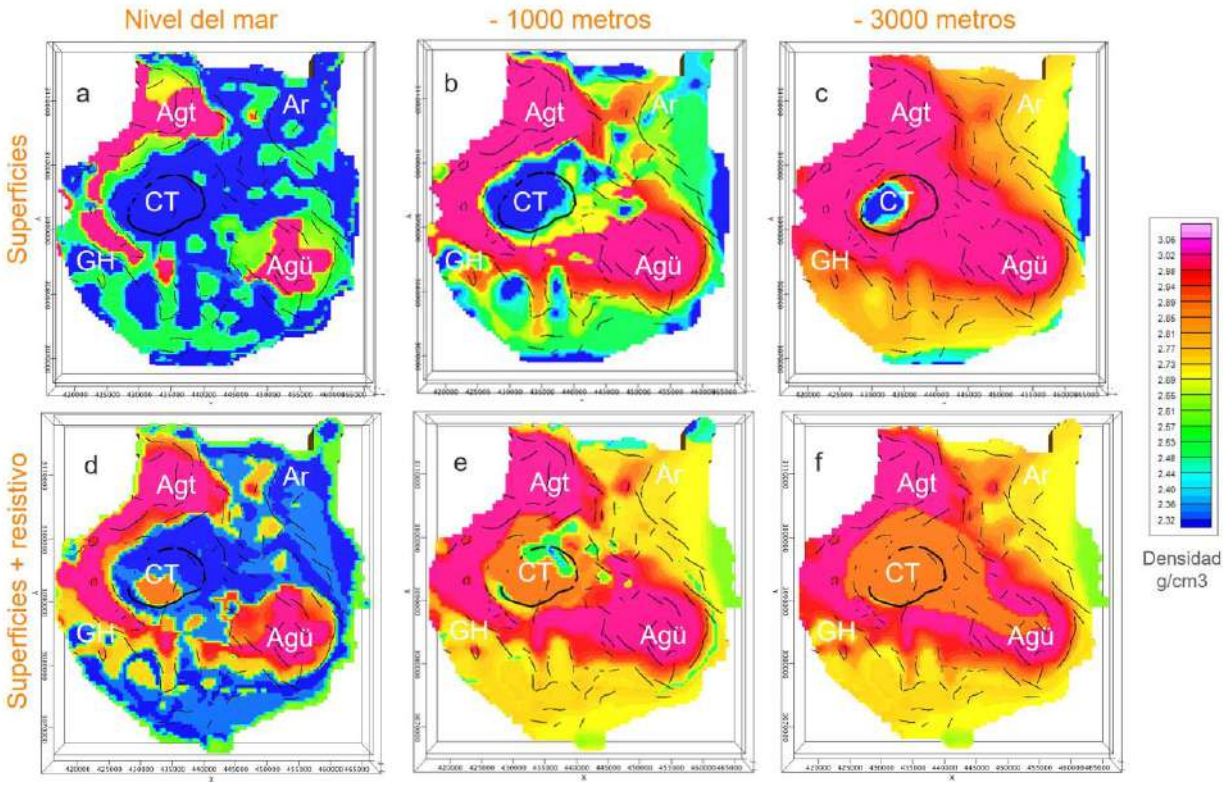


FIGURA 3. Distribución de densidades después de la inversión gravimétrica. a) nivel del mar sólo superficies; b) -1000 metros sólo superficies; c) -3000 metros superficies iniciales; d) nivel del mar con cuerpo resistivo; e) -1000 metros con cuerpo resistivo; f) -3000 metros con cuerpo resistivo. *En trazo fino se muestran los lineamientos definidos desde el análisis cualitativo de la anomalía de Bouguer. Línea gruesa Caldera de Tejeda. Agt: Agaete, Agü. Agüimes, Ar; Arucas; CT: Caldera de Tejera; GH: Güigüi-Horgazales,*

REFERENCIAS

Bosshard, E., y MacFarlane, D. J. (1970). Crustal structure of the Western Canary Islands from seismic refraction and gravity data. *Journal of Geophysical Research*, 75(26), 4901–4918.

Camacho, A., Montesinos, F., y Vieira, R. (2000) A 3-D gravity inversion by means of growing bodies. *Geophysics*, 65, 95–101.

Carracedo, J.C., Perez-Torrado, F.J., Ancochea, E., Meco, J. Hernán, F., Cubas, C.R. and Ahijado, A. (2002). Cenozoic volcanism: II the Canary Islands. En The geology of Spain F.A.W. Gibbons and T. Moreno (Eds.), Geological Society of London, 438-472

Cumming, W., y Mackie, R. (2010). Resistivity imaging of geothermal resources using 1D, 2D and 3D MT inversion and TDEM static shift illustrated by a Glass Mountain case history. En: *Proceedings of the World Geothermal Congress*.

García-Craviotto, A., Huedo, J.L., Torres, J., García, I., Olaiz, A., Arnáiz (2024). Nuevo modelo 3D de resistividades MT de la isla de Gran Canaria. Implicaciones en cuanto a su potencial geotérmico. En: *XI Congreso Geológico de España*. En revisión.

García-Gonzalez, C., Yepes, J., y Franesqui M.A. (2020). Geomechanical characterization of a relation with the rock properties, *Transportation Geotechnics*, 24, 100383.

Montesinos, F. G., Arnoso, J., Gómez-Ortiz, D., Benavent, M., Blanco-Montenegro, I., Vélez, E., Martín-Crespo, T., Gorbaitikov, A.V.,y Stepanova, M.Y. (2022). Imaging the volcanic structures beneath Gran Canaria Island using new gravity data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024863.

Parker, R. L. (1972). The Rapid Calculation of Potential Anomalies, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31, 447-445.

Rodriguez-Gonzalez, A., Pérez-Torrado, F. J., Fernandez-Turiel, J. L., Aulinas, M., Paris, R., y Moreno-Medina, C. (2018). The Holocene volcanism of gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Journal of Maps*, 14(2), 620–629.

Schmincke, H. U., y Sumita, M. (1998). Volcanic evolution of Gran Canaria reconstructed from apron sediments: Synthesis of vicap project drilling. En *Proceedings of the Ocean drilling Program, scientific results* (P. P. E. Weaver, H. U. Schmincke, J. V. Firth, & W. Duffield *eds.*), Vol. 157, pp. 443–469.

Batimetría de la cuenca Powell (Antártida): resultados de la campaña oceanográfica ElGeoPoweR

Bathymetry of Powell basin (Antarctica): results from ElGeoPoweR oceanographic expedition.

D. Palomino[1], M. Gómez-Ballesteros[2], M. Catalán[3] y equipo ElGeoPoweR

1 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Centro Oceanográfico de Málaga, Puerto Pesquero s/n, 29640 Fuengirola. desiree.palomino@ieo.csic.es
2 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Servicios Centrales, C/ Corazón de María 8, 28002, Madrid. maria.gomez@ieo.csic.es
3 Real Observatorio de la Armada, Departamento de Geofísica, San Fernando, Spain. En memoria

Palabras clave: Batimetría, campaña oceanográfica, Cuenca Powell, Antártida

Resumen

En este trabajo se presenta la batimetría del fondo marino de la cuenca Powell (Antártida). Estos datos fueron obtenidos durante la campaña oceanográfica ElGeoPoweR, que tuvo lugar del 31 de diciembre de 2021 al 21 de enero de 2022 a bordo del B/O Sarmiento de Gamboa y bajo la jefatura de D. Manuel Catalán Morollón. Los datos se adquirieron con una ecosonda multihaz Hydroweep DS que ha permitido realizar un modelo digital de elevaciones con 75 m de resolución. Además, se adquirieron datos del subsuelo marino con sonda paramétrica con la que se obtuvieron perfiles sísmicos de muy alta resolución. La cuenca Powell es una cuenca oceánica que se encuentra rodeada de corteza continental (Catalán et al., 2023). Es relativamente pequeña y plana y abarca profundidades desde unos 3000 m hasta 3550 m. En la zona central presenta pequeñas elevaciones de 50 a 70 m de altura que aparece cubiertas de sedimento en los perfiles de alta resolución. Gracias a Dr. Manuel Catalán, se presenta por primera vez un mapa batimétrico de alta resolución de la cuenca Powell en la Antártida, que permitirá conocer la geomorfología de esta cuenca oceánica y entender los procesos geológicos y oceanográficos de la zona.

Abstract

In this work, bathymetric data obtained during ElGeoPoweR oceanographic expedition are presented. This expedition took place from December 31, 2021 to January 21, 2022 on board the R/V Sarmiento de Gamboa under the leadership of Mr. Manuel Catalán Morollón. Data were acquired with a Hydroweep DS multibeam echosounder, which has allowed to create a digital elevation model with 75 m grid resolution. In addition, parametric echosounder data were acquired and very high resolution profiles of the subseafloor were obtained. The Powell Basin is an oceanic basin that is surrounded by continental crust (Catalán et al., 2023). It is relatively small and flat and covers depths from about 3000 m to 3550 m. In the central area of the basin small elevations of 50 to 70 m high can be found, that appear covered with sediment in the high resolution profiles. Thanks to Manen Catalán, a high-resolution bathymetric map of the Powell Basin in Antarctica, is presented for the first time, which will allow to know the geomorphology of this oceanic basin and understand the geological and oceanographic processes of the area.

Referencias

Catalán, M., Negrete-Aranda, R., Martos, Y.M., Neumann, F., Santamaría, A. y Fuentes, K. (2023): On the intriguing subject of the low amplitudes of magnetic anomalies at the Powell Basin. *Front. Earth Sci*. 11:1199332.

Nuevos datos sobre la extensión en profundidad de la raíz cortical cantábrica: resultados preliminares del proyecto CANALAB

New data on the deep extent of the cantabrian crustal root: preliminary results of the CANALAB project

D. Pedreira[1], A. Olivar-Castaño[2], J. A. Pulgar[1], A. Díaz[1], S. Cabezas[1], J. Gallastegui[1] y J. M. González-Cortina[1]

1 Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo, C/J. Arias de Velasco, s/n, 33005 Oviedo. dpedreira@uniovi.es
2 Institute of Geosciences, University of Potsdam, Campus Golm, 14476 Potsdam (Alemania)

Palabras clave: Cordillera Cantábrica, raíz cortical, funciones receptoras, orogenia Alpina

Resumen

Uno de los objetivos principales del proyecto en curso CANALAB (PID2020-118228RB-C21, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033) es la determinación de la estructura litosférica de la Cordillera Pirenaico-Cantábrica mediante técnicas de sísmica pasiva a lo largo de dos transectas de dirección N-S: una por el borde oriental del macizo paleozoico asturiano, y otra por la parte centro-oriental de la Zona Vasco-Cantábrica. Para ello, se planeó la instalación de estaciones sísmicas de banda ancha con un corto espaciado entre ellas, en dos despliegues sucesivos. En este trabajo se presentan los resultados preliminares del primer despliegue por el borde oriental del macizo paleozoico asturiano, extendiendo hacia el norte y hacia el sur la zona cubierta por el perfil de sísmica de reflexión ESCIN-2, que mostraba en su extremo septentrional la inclinación hacia el norte de la Moho ibérica bajo la cordillera (Pulgar et al., 1996). El nuevo perfil de sísmica pasiva de alta resolución se obtuvo utilizando 29 estaciones entre la costa cantábrica y las inmediaciones de Saldaña (Palencia), con espaciados entre ellas de 2.2 a 5.5 km. Los resultados preliminares del análisis de funciones receptoras de telesismos muestran claramente cómo la Moho Ibérica se hunde en el manto hacia el norte hasta al menos 52 km de profundidad bajo la línea de costa, lo cual tiene importantes implicaciones para la cuantificación del acortamiento alpino y la validación de los diversos modelos tectónicos propuestos para la zona.

Abstract

One of the main objectives of the ongoing CANALAB project (PID2020-118228RB-C21, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033) is the determination of the lithospheric structure of the Pyrenean-Cantabrian mountain belt using passive seismic techniques along two N-S transects: one along the eastern border of the Asturian Paleozoic massif, and another through the central-eastern part of the Basque-Cantabrian Zone. To this end, the installation of broadband seismic stations with a short spacing between them was planned, in two successive deployments. This work presents the preliminary results of the first deployment along the eastern border of the Asturian Paleozoic massif, extending towards the north and south the area in which the ESCIN-2 seismic reflection profile imaged the northward inclination of the Iberian Moho under the mountain range (Pulgar et al., 1996). The new high-resolution passive seismic profile was obtained using 29 stations between the Cantabrian coast and the vicinity of Saldaña (Palencia), with spacing between them of 2.2 to 5.5 km. Preliminary results of the analysis of teleseismic receiver functions show how the Iberian Moho sinks into the mantle towards the north to at least 52 km depth below the coastline, an observation that has important implications for the quantification of the Alpine shortening and the validation of the various tectonic models proposed for the area.

Referencias

Pulgar, J.A., Gallart, J., Fernández-Viejo, G., Pérez-Estaún, A., Alvarez-Marrón, J. and ESCIN Group, (1996). *Tectonophysics* 264, 1–19.

Identificación de cavidades en la Cueva del Arco (Cieza), aplicación de georradar y modelo 3D con láser escáner.

Identification of cavities in the Cueva del Arco (Cieza), application of georadar and 3D laser scanner model.

M. Reyes[1], A. Espín[1], A. Gil[1], G. Frías[1], F. Carreño[1].

(1) Centro Tecnológico del mármol, Carretera de Murcia s/n, Cehegín, Murcia (España), monica.reyes@ctmarmol.es

Resumen: La Cueva del Arco ubicada en el paraje del Cañón de Almadenes en Cieza (Murcia), es un conjunto de cavidades con alto valor arqueológico y geológico. Las cavidades se han generado siguiendo la estratificación entre dos formaciones carbonatadas, unas calizas del Coniaciense y unas dolomías del Turoniense, donde se han formado morfologías kársticas asociadas a cuevas hipogénicas por la acción erosiva de acuíferos con elevadas concentraciones en CO_2. En este estudio se pretende realizar una exploración de las cavidades correspondientes a dicha cueva mediante georradar (GPR) en la superficie exterior de la cueva, para posteriormente correlacionar los datos obtenidos con un vuelo de dron preciso y un modelo tridimensional realizado con escáner laser del interior de la cueva. Los resultados obtenidos reflejan la idoneidad del uso del georradar para la identificación de cavidades dado que ha sido posible establecer una relación entre los reflectores detectados por georradar a profundidades de entre 5 y 30 metros con el modelo tridimensional georreferenciado de la cueva.

Palabras clave: geofísica, GPR, modelo 3D, cueva, laser.

Abstract: *The Cueva del Arco, located in the Almadenes Canyon in Cieza (Murcia), is a set of caves with great archaeological and geological value. The cavities have been generated following the stratification between two carbonate formations, limestone from the Coniacian and dolomites from the Turonian, where karstic morphologies associated with hypogene caves have formed due to the erosive action of aquifers with high CO_2 concentrations. The aim of this study is to explore the cavities corresponding to this cave using georadar (GPR) on the exterior surface of the cave, with precise drone flight and to subsequently correlate the data obtained with a three-dimensional model made with a laser scanner from inside the cave. The results obtained reflect the suitability of the use of georadar for the identification of cavities, given that it has been possible to establish a relationship between the reflectors detected by GPR at depths of between 5 and 30 metres with the georeferenced three-dimensional model of the cave.*

Key words: *geophysics, GPR, 3D-model, cave, laser.*

INTRODUCCIÓN

La Cueva del Arco, ubicada en el paraje del Cañón de Almadenes en Cieza (Murcia), es un conjunto de cavidades alrededor de un gran arco de roca natural. A nivel arqueológico, es conocida por el descubrimiento de dos cavidades con arte paleolítico en la década de 1990 (Salmerón et al., 1997; 1998).

El sitio se encuentra en una pequeña meseta, parcialmente erosionada, situada entre el cañón de Almadenes al norte y la Sierra de la Palera (654 m) al sur. Esta meseta está formada por rocas sedimentarias del Cretácico que pertenecen al dominio conocido como Prebético Interno (Jerez Mir et al., 1972). El complejo de cuevas está ubicado en el límite entre dos formaciones geológicas distintas (Fig. 1): al este de la cueva se encuentra una formación de calizas blanquecinas del Coniaciense, mientras que al oeste se encuentra una formación dolomítica (dolomicrita) del Turoniense (Martín-Lerma et al., 2023).

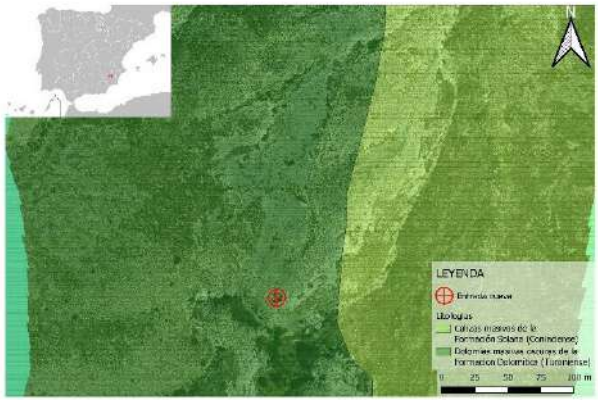


FIGURA 1.- *Localización y cartografía de detalle de las formaciones presentes en la zona.*

La Cueva del Arco es una cueva hipogénica, este tipo de cuevas no presentan formas kársticas habituales debido a que el proceso de génesis de estas cavidades está asociado a la presencia de acuíferos confinados o profundos, y en algunos casos ligadas a procesos hidrotermales con contenidos importantes en CO_2 u otros agentes corrosivos. Estas aguas muy agresivas desarrollan formas, en la roca, muy características y que

permiten identificar este tipo de procesos hipogénicos, tales como redes laberínticas, reticuladas e irregulares, con un desarrollo arborescente y ascendente (Ros et al., 2014).

En este trabajo se realiza un estudio aplicando la técnica geofísica de georradar en superficie cuya finalidad es la identificación de las cavidades asociadas a la Cueva del Arco. Los perfiles obtenidos se solapan con un vuelo de dron preciso y compara todo con el modelo tridimensional generado a partir del escaneo de la cavidad en su totalidad, para corroborar si se han detectado correctamente las cavidades con el GPR.

METODOLOGÍA

Georradar

El radar de penetración de tierra (GPR), o georradar, es un método electromagnético no invasivo ampliamente usado por su velocidad de recogida de datos y su nivel de detalle obtenido del análisis del subsuelo.

La obtención de los datos geofísicos se realiza con el equipo georradar MALÅ utilizando la antena RTA de baja frecuencia tipo "serpiente" de 25 MHz. Esta antena permite alcanzar una profundidad de penetración de hasta 50 m en condiciones ideales. Se plantean 14 perfiles de georradar dispuestos en diferentes direcciones en superficie y cubriendo la mayor extensión posible, con el fin de detectar el contacto entre las dolomías y las calizas, donde se generan las cavidades (Fig. 2).



FIGURA 2.- *Disposición de las líneas de medidas realizadas con GPR.*

Escaneo laser y georreferenciación

Se realizará un escaneo mediante un escáner láser Leica RTC360 de la Cueva del Arco para general un modelo 3D completo de todas las galerías exploradas, con el objetivo de posteriormente georreferenciar la cueva y de este modo superponer los datos obtenidos mediante el georradar, lo que permitirá identificar si las galerías detectadas con el georradar se corresponden con las reales. Tras el escaneo de diferentes dianas dispuestas en las galerías se generará un modelo 3D aplicando el ajuste geométrico de mínimos cuadrados.

Para la georreferenciación del modelo 3D generado mediante el escáner laser se emplea una estación total modelo Leica TS02. Con el uso de esta estación se realiza la medida de puntos presentes en la Cueva del Arco y que sean posibles de identificar en el visor del modelo 3D de la cueva.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Georradar

Se toma como referencia los resultados obtenidos por el perfil de georradar 5 y 13, el primero con una dirección de recorrido NE-SO y una longitud de 132,18 m y el segundo con dirección NO-SE y 103,31 m. Mediante el post procesado de los datos recogidos se obtienen los perfiles mostrados en las Figuras 3 y 4, donde se observan en primer término los reflectores que representan la superficie y también es posible identificar otros reflectores bien marcados entre los 5 y los 30 metros por debajo de la superficie que corresponden con el contacto entre las calizas y las dolomías.

En el perfil 5 (Fig. 3) los reflectores identificados en la parte derecha del perfil están relacionados con las galerías de entrada a la Cueva del Arco, se localizan más superficiales que el resto y por la posición del perfil en su parte más suroccidental es la más próxima a la entrada de la cueva. Los reflectores marcados de mayor tamaño se identifican con el contacto entre las calizas en la parte superior y las dolomías en la inferior, y es en este nivel donde se generan las cavidades.

En el perfil 13 (Fig. 4) se identifica una disposición de los reflectores similar a la del perfil anterior. Estos reflectores se corresponden con el contacto calizas-dolomías, este contacto es el que condiciona la formación de las cavidades localizadas que también se detectan en este perfil. En concreto, se han identificado dos extensas galerías en la parte central del perfil. También ha sido posible la identificación de galerías verticales por la disposición que muestran los reflectores en la parte central del perfil, tal y como se señala en la Figura 4.

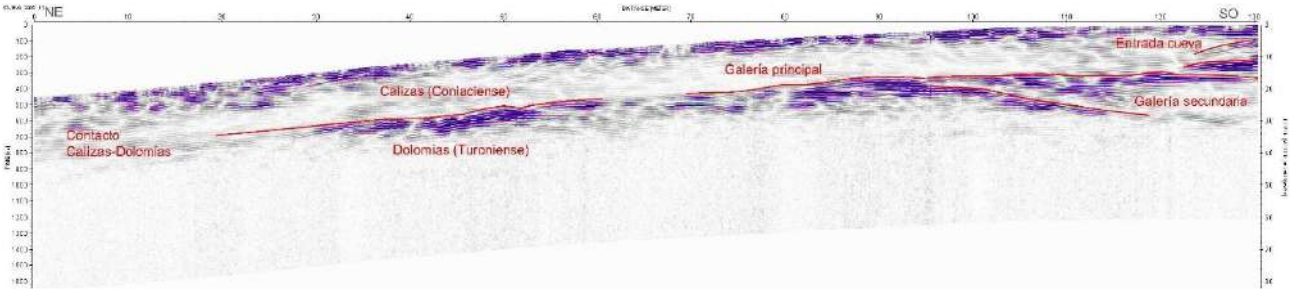


FIGURA 3.-*Perfil 5 de georradar.*

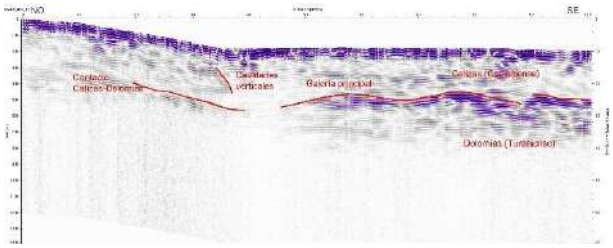
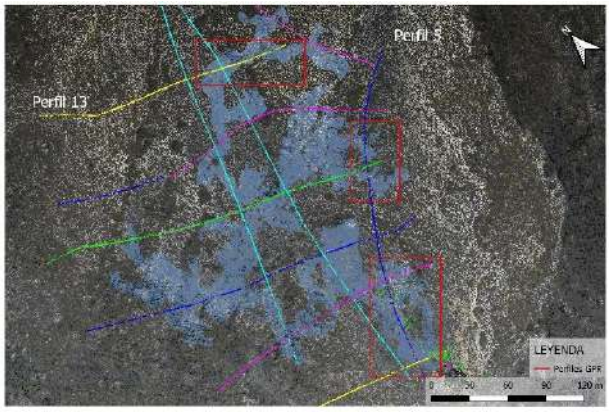


FIGURA 4.- *Perfil 13 de georradar.*

Modelo 3D

El resultado final del modelo tridimensional georreferenciado de la Cueva del Arco se muestra en la figura 5. En dicho modelo es posible corroborar los resultados obtenidos con el georradar donde los reflectores más marcados (colores morados) corresponden a las galerías, como se ha mencionado anteriormente, y los que aparecen menos marcados (colores grises) correspondían al contacto entre las litologías.



En la figura 6 se muestra una vista del escaneado interior de la cueva en el software Autodesk ReCap en el espectro visible (RGB) y otra del escaneo en grises. Mediante ambas vistas y debido a la alta resolución espacial de las imágenes es posible identificar las formaciones kársticas tales como estalagmitas, estalactitas, etc., y también la presencia de estilolitos que corresponden a grietas de presión, siendo esta una debilidad importante de la roca. Este software permite realizar un recorrido por las galerías de la cueva desplazándose por cada uno de los puntos donde se escanearon las cavidades.

Con el uso de las coordenadas situadas en la parte inferior de la vista del software es posible comparar la localización de cada punto de escaneo con la posición de cada línea de medida realizada con el GPR, y de este modo determinar la diferencia entre la cota tomada con esta técnica y la cota a la que se sitúa la cavidad, ya que el objetivo pretendido es localizar la zona donde la cueva se encuentra más cerca de la superficie.



FIGURA 7.- *Vista de escáner de la cavidad.*

Un ejemplo se muestra en la figura de la cual se extraen las coordenadas 624474,181 / 4233120,632 / 324,132 correspondientes al punto de escaneo, y junto con la cota en superficie del perfil de GPR a 339,10 m es posible estimar que la cavidad se encuentra a aproximadamente 25 m de profundidad con respecto a la superficie.

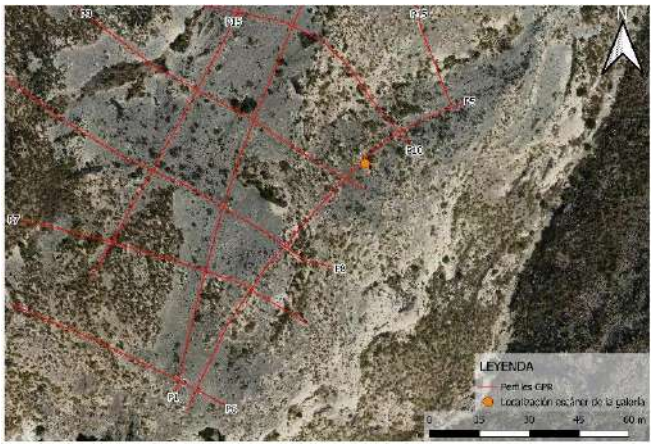


FIGURA 8.- *Localización del escaneo de la cavidad con respecto al perfil 5 de georradar.*

CONCLUSIONES

La aplicación de la técnica geofísica de GPR resulta altamente adecuada en la detección de la presencia de cavidades, que ha sido validado mediante la comparación con el modelo tridimensional de la cueva.

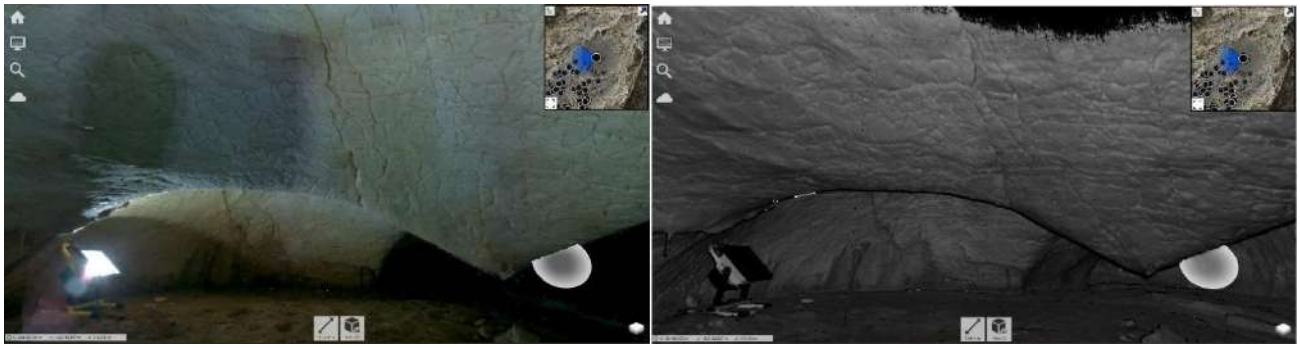


FIGURA 6.- *Vista RGB y escáner del interior de la Cueva del Arco.*

También se ha podido comprobar que existen algunas zonas donde existe cavidad y no ha sido escaneada, bien porque no tiene continuidad con la cueva abierta en la actualidad o porque no se llegó a escanear por presencia de algún obstáculo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Grupo de Espeleología Ciezano Atalaya (GECA-OJE) su aportación en este trabajo.

REFERENCIAS

Jerez Mir, L., García-Monzón, G. y Jerez Mir, F. (1972). *Mapa Geológico de España 1:50:000, hoja nº 890 (Calasparra)*. IGME, Madrid.

Martín-Lerma, I., Román, D., Armellini, J., Sánchez-Martínez, N. y Angelucci, D.E. (2023). First Data from the Prehistoric Site Complex of Cueva del Arco (Murcia, Spain). *Journal of Paleolithic Archaeology* 6:19.

Ros, A., Llamusí, J. L., & Sánchez, J. (2014). Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia–España. Centro de Estudios de la Naturaleza y el Mar. Murcia. 46pp.

Salmerón Juan, J., Lomba Maurandi, J., Cano Gomariz, M. y Grupo Almadenes (1997): Avance al estudio del arte rupestre paleolítico en Murcia: las cuevas de Jorge, Las Cabras y El Arco (Cieza, Murcia). En: *XXIII Congreso Nacional de Arqueología*. Volumen 1, 201-216.

Salmerón Juan, J., Lomba Maurandi, J. y Cano Gomaríz, M. (1998). El arte rupestre Paleolítico de Cieza. Primeros hallazgos en la Región de Murcia. Resultados de la I Campaña de Prospecciones "Losares-Almadenes 93". *Memorias de Arqueología*, 13: 94–111.

Investigación gravimétrica de las pegmatitas de Giraúl (SW de Angola)

Gravity study of the Giraúl pegmatites (SW Angola)

C. Rey-Moral[1*], F. Rubio[1], E. Merino-Martínez[2], J.L. García-Lobón[1], J.M. Llorente[1], A. García[1] y P. Spitalny[3]

1 IGME-CSIC. c/ La Calera 1. 28760 Tres Cantos. Madrid. *Corresponding author: c.rey@igme.es
2 IGME-CSIC. c/ Ríos Rosas, 23. 08003. Madrid.
3 Tyranna Resources Ltd, L3, 101 St Georges Terrace, Perth WA 6000, Australia.

Palabras clave: pegmatitas, elementos críticos, gravimetría, modelización, Angola.

Resumen

El complejo Pegmatítico de Giraúl (Namibe, Angola) contiene más de 1000 pegmatitas, algunas de ellas enriquecidas en Li, Be, B, Cs, Rb, Sn y Ta, estructuradas en dirección WNW-ESE y abarcando un área de 150 km^2. El complejo está instalado en los metasedimentos del Grupo Namibe, de densidad similar a la de las pegmatitas y en diversas intrusiones básicas a ultrabásicas (gabros, dioritas y escasas piroxenitas) dispersas, que generan un claro contraste de densidad. En el área de Muvero hay pegmatitas enriquecidas en Li, actualmente en explotación por Tyranna Resources Ltd y Angolitio Exploração Mineira (SU) Lda. La campaña gravimétrica cubrió una superficie de 307 800 m^2 (570 x 540 m) y se dividió en dos áreas en función del potencial de la mineralización: área interna (separación de estaciones 25 m) y área externa (separación de estaciones de 50 m). Se midieron 236 estaciones según perfiles N-S y E-W usando el gravímetro CG-6 AUTOGRAV™ y el GPS PENTAX G-7. Se aplicaron las correcciones estándar de datos gravimétricos con una densidad de reducción de 3.1 g/cm^3, estimada mediante la correlación entre la anomalía gravimétrica y la topografía Nettleton (1939), Yamamoto (1999), y en concordancia con la presencia de anfibolitas interestratificadas y de cuerpos (ultra-)básicos. En el mapa de anomalías de Bouguer los mínimos gravimétricos relativos se relacionan con estructuras pegmatíticas. Los cuatro modelos gravimétricos 2.5D desvelan la existencia de cuerpos pegmatíticos a profundidades < 40 m, con resultados prometedores para la futura exploración de pegmatitas y minerales asociados.

Abstract

The Giraúl Pegmatitic Field (Namibe, Angola) contains more than 1000 pegmatites, including several enriched in Li, Be, B, Cs, Rb, Sn and Ta, occurring in a corridor oriented in a WNW-ESE direction and covering an area of 150 km^2. The pegmatites have intruded Namibe Group metasediments, of presumably similar density to the pegmatites and diverse basic to ultrabasic intrusions (gabbros, diorites, and sparse pyroxenites) scattered throughout the area, which creates a clear density contrast. This study focuses on the gravity survey of the Muvero Prospect, which contains Li-enriched pegmatites and is currently being exploited by Tyranna Resources Ltd and Angolitio Exploração Mineira (SU) Lda. The gravity survey covered an area of 307,800 m², divided into two sections based on mineralisation potential: the inner area (25 m station spacing) and the outer area (50 m station spacing). 236 gravimetric stations were measured along N-S and E-W profiles using the CG-6 AUTOGRAV™ gravimeter and the PENTAX G-7 GPS. Standard gravity data corrections were applied and a reduction density of 3.1 g/cm^3 was used, estimated by correlation between Bouguer anomalies and topography of Nettleton (1939) and Yamamoto (1999), and in agreement with the presence of interstratified amphibolites in the Namibe Group and basic to ultrabasic bodies. Relative gravity minima are observed in the Bouguer anomaly map, related to pegmatitic structures. The four 2.5D gravity models performed indicate the presence of pegmatitic bodies at depths < 40 m. These results are promising for future exploration of pegmatites and associated minerals.

Referencias

Nettleton, L.L. (1939). *Geophysics* 4, 176-183.
Yamamoto, A. (1999). *Estimating the optimum reduction density for gravity anomaly: A theoretical overview*. Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7. Geophysics, 11, Nº 3, 577-599.

Determinación de la profundidad de Curie mediante métodos espectrales en La Palma (Islas Canarias) a partir del mapa de anomalías magnéticas.

Determination of the Curie depth on La Palma (Canary Islands) from the magnetic anomaly map using spectral methods.

M.C. Romero-Toribio[1], F. Martín-Hernández[1] y J. Ledo[1].

1 Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas, UCM. 28040 Madrid. mromer30@ucm.es

Resumen: El estudio de anomalías magnéticas en La Palma (Islas Canarias) resulta esencial para permitir el desarrollo del potencial geotérmico de la isla gracias al vínculo que ofrecen con las propiedades térmicas de los cuerpos anómalos. En este estudio aplicamos por primera vez métodos espectrales (métodos del centroide y fractal) para estimar la profundidad a la que se encuentra la isoterma de Curie (~580 º C) en La Palma. Los resultados preliminares muestran tendencias generales similares para ambos métodos aplicados. El método del centroide muestra profundidades de 1 a 2.5 km bajo el nivel del mar para el complejo volcánico joven del sur de la isla, donde se encuentra la recientemente afectada zona del volcán Tajogaite, mientras que, para el antiguo complejo de Taburiente y las zonas marinas colindantes, la profundidad de Curie se encuentra a 4-5 km, revelando una corteza más fría a las mismas profundidades.

Palabras clave: Geofísica, temperatura, energía geotérmica, anomalías magnéticas, métodos espectrales.

Abstract: *The study of magnetic anomalies in La Palma (Canary Islands) is essential to allow the development of the geothermal potential of the island thanks to the link they offer with the thermal properties of the anomalous bodies. In this study we apply spectral methods (centroid and fractal methods) to estimate the depth of the Curie isotherm (~580º C) on La Palma for the first time. Preliminary results show similar general trends for both methods applied. The centroid method shows depths of 1 to 2.5 km below sea level for the young volcanic complex in the south of the island, where the recently affected area of the Tajogaite volcano is located, whereas, for the old Taburiente complex and the surrounding marine areas, the Curie depth is located at 4-5 km, revealing a cooler crust at the same depths.*

Key words: *Geophysics, temperature, geothermal energy, magnetic anomalies, spectral methods*

INTRODUCCIÓN

En las Islas Canarias la utilización de las energías renovables autóctonas es fundamental, tanto por motivos estratégicos como de coste. Actualmente, su implementación es del orden del 9% cuando en la península se ha alcanzado el 17%. Dado el registro histórico de erupciones producidas, la isla de La Palma es la que presenta un mayor potencial para el desarrollo de la energía geotérmica de alta entalpía. Sin embargo, antes de realizar las instalaciones necesarias para su aprovechamiento es necesario llevar a cabo estudios en detalle de las características principales del reservorio geotérmico. Para ello, la caracterización geofísica resulta esencial permitiendo comprender los procesos y propiedades del subsuelo y ayudar así a mejorar significativamente el potencial desarrollo de la energía geotérmica en La Palma.

Existen diferentes técnicas basadas en datos geofísicos que permiten caracterizar geotérmicamente una zona. Una metodología ampliamente reconocida en la actualidad en la caracterización de reservorios geotérmicos supone aplicar métodos espectrales al mapa de anomalías magnéticas (p.e.: Carrillo-de la Cruz et al., 2020; Suleiman et al., 2021). Estos métodos se basan en la suposición de que las anomalías vienen dadas por la alta concentración en magnetita (alta susceptibilidad frente a otros minerales) presente en las rocas, siendo la temperatura de Curie, a la cual la magnetita pierde su magnetización, 580 ºC. Generalmente para la corteza continental se asume que la isoterma calculada con estos métodos es 580 ºC, aunque dependiendo del contexto geológico, esta temperatura puede variar.

El método del centroide, de acuerdo con Tanaka et al. (1999), se aplica tomando el espectro de amplitud radial para calcular la profundidad a la que los minerales de la corteza pierden su magnetización o, equivalentemente, a la que se alcanza la isoterma de Curie (CPD). A partir de los espectros calculados en ventanas espaciales cuadradas mediante ajuste lineal en diferentes rangos de números de onda es posible inferir la CPD. El método fractal descrito por Bouligand et al. (2009) ajusta el espectro de potencia completo con una solución analítica dependiente de cuatro parámetros: profundidad hasta el comienzo del bloque magnético,

grosor de dicho bloque, una constante y un parámetro fractal.

De manera complementaria, al mapa de anomalías magnéticas se pueden aplicar métodos como la deconvolución de Euler para obtener información de la profundidad a la que se encuentran los materiales que producen dichas anomalías.

En este trabajo hemos calculado la profundidad de Euler así como la profundidad de Curie por primera vez en La Palma mediante el método del centroide descrito en Tanaka et al. (1999) y el método fractal de Bouligand et al. (2009). En este resumen se presentan únicamente los resultados preliminares de la CPD utilizando el método del centroide descrito en Tanaka et al. (1999).

MARCO GEOLÓGICO Y ANTECEDENTES

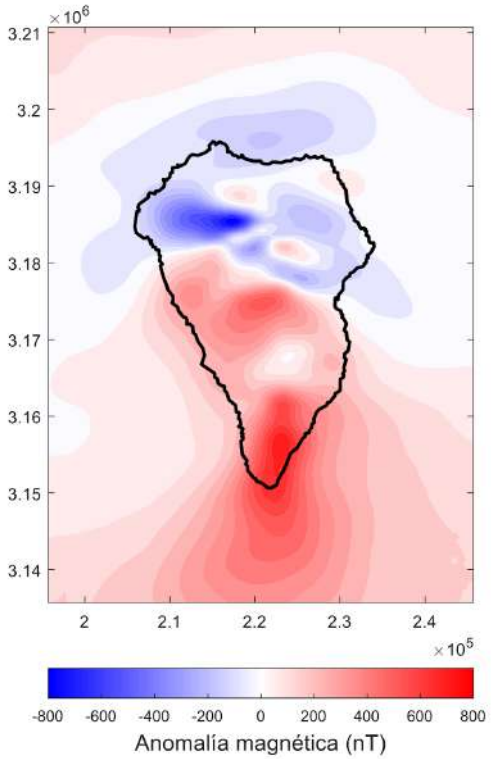
La isla de La Palma está caracterizada geológicamente por dos grandes cuerpos volcánicos: el más antiguo, al norte, es un gran complejo volcánico (edificios Garafía, Taburiente, Cumbre Nueva y Bejenado, 1,7-0,4 Ma) con una depresión central llamada Caldera de Taburiente, actualmente elevada a 1500 m de altitud sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Hacia el sur, a casi 2000 m.s.n.m. y alargada aprox. 17 km en dirección N-S, hay una dorsal de jóvenes volcanes entre los que se encuentra el reciente volcán Tajogaite.

El primer modelo geoeléctrico de La Palma (Di Paolo et al., 2020) muestra una zona de alta resistividad debajo de la Caldera de Taburiente, interpretada como un antiguo cuerpo intrusivo altamente consolidado, así como anomalías de baja resistividad alrededor de Cumbre Vieja que pueden estar asociadas con la presencia de rocas altamente fracturadas y/o alteradas hidrotermalmente. El modelo de D'Auria et al. (2022) evidencia un rápido ascenso magmático desde la base de la corteza oceánica debajo de la isla que causo la última erupción (Tajogaite, 2021). Además, identifican tres estructuras distintas: (1) una región superficial localizada (< 3 km) de alteración hidrotermal; (2) corteza oceánica espacialmente extensa, consolidada, que se extiende hasta 10 km de profundidad y; (3) una gran intrusión de volumen de roca llena de magma subcortical que se extiende de 7 a 25 km de profundidad. Piña-Varas et al., (2023). La monitorización volcánica con datos magnetotelúricos ha ofrecido información clave sobre la evolución espacio-temporal de la resistividad eléctrica del subsuelo, permitiendo la caracterización de estructuras que actúan como vías preferentes de fluidos magmáticos.

DATOS, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para este estudio hemos recuperado los datos de anomalías (Figura 1) del vuelo aeromagnético (a 3200 m.s.n.m) realizado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en 1993 (Socías y Mezcua, 1996). Para la aplicación del método de Tanaka et al. (1999) se utiliza PyCurious (Mather y Fullea, 2019), un módulo de Python que además utiliza un marco de inferencia bayesiana para estimar las incertidumbres asociadas a la técnica.

A partir de los datos magnéticos del vuelo, se ha creado una malla de dimensión espacial 50 km por 75 km (Figura 1), con nodos separados cada 500 m en las



direcciones N-S y E-O, e interpolada con el método *Kriging*.

FIGURA 1. *Mapa de anomalías magnéticas de La Palma obtenido a partir del vuelo aeromagnético descrito en Socías y Mezcua (1996). El área abarca 50 km en la dirección E-O y 75 km en la dirección N-S. Los ejes X e Y se presentan en coordenadas cartesianas UTM en metros.*

Según Nuñez Demarco et al. (2021), no existe un consenso entre autores respecto al tamaño de las ventanas espaciales en las que se divide el área de estudio y sobre las que se calculan los espectros. Resulta ampliamente aceptado que la ventana debe ser mayor que el grosor de la banda magnética que se quiere estimar. En este trabajo, dado que la isla es una zona volcánica activa y de reducidas dimensiones, se espera que la banda magnética no alcance grandes profundidades y se encuentre en los primeros kilómetros de corteza. Siguiendo, además, la herramienta de exploración de parámetros de PyCurious (Mather y Fullea, 2009), se ha optado por utilizar ventanas de 25 km x 25 km, como también sugieren diferentes trabajos recopilados por Nuñez Demarco et al. (2021), que señalan un tamaño de al menos 3 o 4 veces la profundidad de la capa magnética estudiada. Paralelamente, la selección de ventana se ha visto limitada por el tamaño de la malla de datos magnéticos disponible (50 km x 75 km) y por discrepancias entre

las magnitudes de las anomalías de los datos utilizados y modelos globales, no permitiendo un solapamiento adecuado e imposibilitando la extensión del área de estudio.

En el mapa final de profundidades de Curie se utilizan ventanas móviles cada 10 km en las direcciones N-S y E-O. En cada ventana se calculan los espectros de amplitud radiales necesarios (filtrados con ventana Hanning). A partir de ellos se infieren mediante ajuste lineal en diferentes rangos de los números de onda las profundidades hasta el fondo de las fuentes magnéticas. Siguiendo las indicaciones de Nuñez Demarco et al. (2021) para la correcta implementación de la técnica, se ha optimizado, además de la ventana espacial para el cálculo de la CPD, el rango de números de onda utilizado para calcular el ajuste en los espectros.

Los resultados preliminares obtenidos tras la aplicación del método espectral del centroide se recogen en la Figura 2.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El cálculo de la profundidad de Curie está muy influenciado por los parámetros empleados para su cálculo; en particular, en el método de Tanaka et al. (1999) por el tamaño de la ventana, y el rango y valor de los números de onda. El tamaño de la isla entre otros factores ha condicionado la elección de las ventanas para el cálculo de los espectros del campo magnético a cuadrículas de 25 km x 25 km. Ventanas con mayores dimensiones no permiten obtener valores fiables en el interior de la isla, mientras que ventanas inferiores dan lugar a la disminución de valores en el espectro que no permiten ajustar las profundidades de manera adecuada.

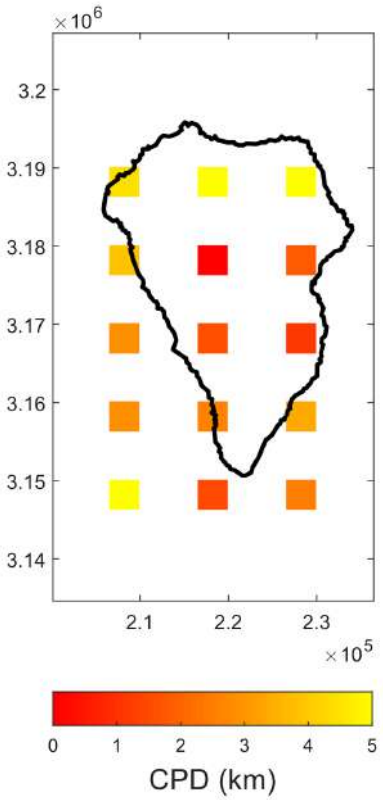


FIGURA 2. *Profundidades de Curie (CPD) en La Palma tras la aplicación del método de Tanaka et al. (1999). Los ejes X e Y se presentan en coordenadas cartesianas UTM en metros.*

El análisis de las incertidumbres de CPD y su correlación con modelos de inversión, así como con las profundidades de Euler permitirán caracterizar de manera más detallada las propiedades físicas del sistema geotermal. Asimismo, una vez determinada la CPD se puede calcular el gradiente geotérmico y comparar dichos resultados con otras propiedades físicas (p.e. resistividad eléctrica y velocidades de propagación de ondas sísmicas) que proporcionan variaciones relativas de temperatura con una mejor cobertura espacial que la proporcionada por la CPD.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido desarrollado dentro del proyecto *Multidisciplinary and multiscale geophysical and geochemical imaging of La Palma Island geothermal system* (GEOTHERPAL, TED2021-131882B-C41).

REFERENCIAS

Bouligand, C., Glen, J. M., y Blakely, R. J. (2009). *Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization.* Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114(B11).

Carrillo-de la Cruz, J. L., Prol-Ledesma, R. M., Gómez-Rodríguez, D., y Rodríguez-Díaz, A. A. (2020). *Analysis of the relation between bottom hole temperature data and Curie temperature depth to calculate geothermal gradient and heat flow in Coahuila, Mexico*. Tectonophysics, 780, 228397.

Di Paolo, F., Ledo, J., Ślęzak, K., Martínez van Dorth, D., Cabrera-Pérez, I., y Pérez, N. M. (2020). *La Palma island (Spain) geothermal system revealed by 3D magnetotelluric data inversion*. Scientific reports, 10(1), 18181.

D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., Cabrera-Pérez, I., Ibáñez, J. M., Barrancos, J., ... y Peréz, N. M. (2022). *Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography*. Scientific Reports, 12(1), 17654.

Mather, B., y Fullea, J. (2019). *Constraining the geotherm beneath the British Isles from Bayesian inversion of Curie depth: integrated modelling of magnetic, geothermal, and seismic data*. Solid Earth, 10(3), 839–850.

Núñez Demarco, P., Prezzi, C., y Sánchez Bettucci, L. (2021). *Review of Curie point depth determination through different spectral methods applied to magnetic data.* Geophysical Journal International, 224(1), 17-39.

Piña-Varas, P., Ledo, J., Queralt, P., van Dorth, D. M., Marcuello, A., Cabrera-Pérez, I., ... y Martí, A. (2023). *Volcanic monitoring of the 2021 La Palma eruption using long-period magnetotelluric data*. Scientific Reports, 13(1), 15929.

Socías, I. y Mézcua, J. (1996) Levantamiento aeromagnético del archipiélago canario, Instituto Geográfico Nacional, Publicación Técnica No. 35, 28 pp.

Suleiman, T., Okeke, F. N., y Obiora, N. D. (2021). *Spectral Analysis of High-Resolution Aeromagnetic Data for Geothermal Energy Reconnaissance across Sokoto Basin, Northwest, Nigeria.* Journal of the Earth and Space Physics, 46(4), 147-158.

Tanaka, A., Okubo, Y., y Matsubayashi, O. (1999). *Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia.* Tectonophysics, 306(3-4), 461-47

Distribución de las evaporitas Triásicas en el Saliente Surpirenaico Central a partir del análisis de anomalías gravimétricas

Distribution of Triassic evaporites in the South Pyrenean Central Salient from the analysis of gravity anomalies

P. Santolaria[1], C. Ayala[2], R. Soto[3], P. Clariana[3], J.A. Muñoz[1], F.M., Rubio[3], J. Martín-León[3] y E.L. Pueyo[3]

1 Departament de Dinàmica de la Terra i de L'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Institut de Recerca Geomodels, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, Spain. p.santolaria.otin@ub.edu, jamunoz@ub.edu
2 Geosciences Barcelona (Geo3Bcn), CSIC, Lluis Solé i Sabarís, s/n, 08028 Barcelona, Spain, cayala@geo3bcn.csic.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, 28003, 28760, 50059 p.clariana@igme.es, r.soto@igme.es, unaim@igme.es, fm.rubio@igme.es, j.martin@igme.es

Palabras clave: Tectónica salina, anomalías gravimétricas, Facies Keuper, Pirineos

Resumen

Las evaporitas del Triásico representan el nivel de despegue regional de los Pirineos. Su distribución en el Saliente Surpirenaico Central y las implicaciones geométricas y cinemáticas que ello conlleva siguen siendo materia de discusión. Distribución que se ha caracterizado en este trabajo a partir del análisis de un nuevo mapa de anomalía residual de Bouguer y la modelización geofísica de 4 cortes geológicos representativos de la zona. El mapa de anomalías gravimétricas se ha obtenido a partir de la actualización y armonización de datos provenientes de diferentes bases de datos (12726 medidas). Los cortes geológicos se han construido a partir de cortes geológicos previos, datos geológicos tomados en campo e interpretación de perfiles sísmicos de reflexión existentes en la zona. La densidad de las diferentes unidades geológicas que constituyen los cortes se ha constreñido a partir de datos petrofísicos de más de 2000 muestras analizadas.

Las evaporitas Triásicas se distribuyen de forma irregular. Estas se acumulan al noroeste del saliente, bajo un depocentro del Cretácico Superior y en el núcleo de pliegues de despegue en la parte central. En la lámina más frontal de los Pirineos centrales, varios cuerpos salinos se asocian a una zona hinchada de sal. Este trabajo resalta la importancia de integrar datos geológicos y gravimétricos para inferir la presencia de materiales evaporíticos en profundidad y poder caracterizar su distribución de forma cualitativa y cuantitativa.

Abstract

The Triassic evaporites represent the regional décollement of the Pyrenees. Its distribution along the South Pyrenean Central Salient and its geometric and kinematic implications are still a matter of discussion. In this work, their distribution has been characterized by using a new residual Bouguer anomaly map together with the forward modelling of four representative cross-section. Gravity anomaly maps are obtained after the updating and harmonizing gravity data coming from different databases (12726 measurements). Cross-sections were built upon available geological maps, geological data, and the interpretation of seismic reflections profiles. The density of the geological units constituting the cross-sections was constrained upon petrophysical data from more than 2000 samples analysed.

Triassic evaporites are unevenly distributed. Northwest of the salient, a major accumulation of Triassic evaporites floors a thick syn-orogenic Upper Cretaceous depocenter and, to the south, in the centre of the salient, they cored salt-detached anticlines. Along the southernmost (and youngest) thrust sheet of the salient, the Gavarnie-Sierras thrust sheet, several diapirs and salt bodies are associated to a salt-inflated area. This work highlights the importance of integrating geological and gravimetric data to infer the presence of evaporitic materials at depth and to be able to characterize their distribution qualitatively and quantitatively.

Influencia de la zona de falla de Palomares en las cuencas adyacentes mediante prospección gravimétrica

Palomares fault zone influence in the adjacent basins through gravity prospecting

V. Tendero-Salmerón[1,3], G. Ercilla[2], L. González-Castillo[3], A. Madarieta-Txurruka[3], F. J. Martínez-Moreno[4], F. Estrada[2], J. Galindo-Zaldívar[1,3]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), 18100, Armilla (Granada), España. vtendero@ugr.es; jgalindo@ugr.es
2 Institut de Ciències del Mar, CSIC, Grupo de Márgenes Continentales, 08003 Barcelona, España. gemma@icm.csic.es; festrada@icm.csic.es
3 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. lgcastillo@ugr.es; amadatxu@ugr.es; jgalindo@ugr.es
4 Departamento de Geodinámica, Paleontología y Estratigrafía, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España. fjmmoreno@ucm.es

Palabras clave: gravimetría, falla de Palomares, cuenca de Vera, cuenca de Pulpí, indentación tectónica

Resumen

La zona de falla de Palomares (ZFP) tiene un salto sinistro que acomoda el desplazamiento hacia el N de la indentación del Arco de Águilas y forma parte de la *Eastern Betic Shear Zone* (EBSZ). Así, se estima que la ZFP se prolonga desde Sierra Cabrera hasta el frente del Arco de Águilas. La ZFP pone en contacto dicho arco con varias cuencas sedimentarias en su borde oriental, concretamente las cuencas de Vera, Pulpí y la parte occidental del Corredor del Guadalentín. En este trabajo se han tomado datos de gravimetría acompañados de observaciones geológicas de campo para estudiar la influencia de la ZFP en su geometría. Los resultados muestran que el basamento está claramente afectado por la falla de Palomares en el borde oriental de la cuenca de Vera, marcado por un cambio neto en el espesor de los sedimentos. En cambio, la geometría de la cuenca de Pulpí presenta una forma de sinforme simétrico. Al norte, el Corredor del Guadalentín sí muestra evidencias de fallamiento, con altos de basamento y escalones en su borde sureste que encajan con varias fallas menores. Por ello, consideramos que la longitud de la zona de falla de Palomares es menor de lo estimado hasta ahora, y abarca sólo desde Sierra Cabrera hasta la parte sur de la cuenca de Pulpí. En este tramo de la EBSZ, las fallas activas serían discontinuas.

Abstract

The Palomares fault zone (PFZ) has a sinistral slip that accommodates the northward displacement of the tectonic indentation of the Águilas Arc and is part of the Eastern Betic Shear Zone (EBSZ). Then, the PFZ zone is considered to run from the Cabrera Range to the Águilas Arc front. The PFZ also constitutes the eastern boundary between the arc and several sedimentary basins, namely, the Vera, Pulpí basins and the western part of the Guadalentín Corridor. In this research, new gravity prospecting data have been acquired together with geological field observations to study the influence of the PFZ in the geometry of the basins. The results show that the basement is clearly affected by the PFZ at the eastern boundary of the Vera Basin, where a vertical change in the sediment thickness is observed. In contrast, the form of the Pulpí Basin resembles a synformal geometry. Northwards, the Guadalentín Corridor presents evidence of faulting, with several basement highs and steps at its south-eastern boundary, which correspond to several minor faults. Therefore, we consider that the length of Palomares fault zone was overestimated and that the fault zone only extends from the Cabrera Range to the southern part of the Pulpí Basin. In that region, the EBSZ active faults would be discontinuous.

Hidratos de metano en el margen chileno: aspectos ambientales y energéticos.

Gas hydrate offshore Chilean margin: energetic and environmental aspects

U. Tinivella[1], M. Giustiniani[1], I. Vargas-Cordero[2], L. Villar-Muñoz[3], J. P. Bento[4]

1 Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Sgonico, Italy. utinivella@ogs.it; mgiustiniani@ogs.it
2 Valparaiso, Chile. lacruzvargas@gmail.com
3 Dep. de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. lucia.villar@gmail.com
4 The Metals Company, 10th Floor, 595 Howe Street, Vancouver, British Columbia, V6C 2T5, Canada. jnettojunior@gmail.com

Palabras clave: hidratos de metano, margen chileno, cambio climático, datos geofísicos.

Resumen

El margen chileno es muy interesante desde el punto de vista de los hidratos de metano (GH), así lo demuestran las líneas sísmicas analizadas a lo largo de todo el margen. Por lo tanto, GH podrían ser una excelente oportunidad para enfrentar la demanda de energía de Chile. En la parte norte, el reservorio de GH es interesante desde el punto de vista energético, aún si éste se aloja en sedimentos de baja permeabilidad. Los esfuerzos han estado concentrados en mejorar la caracterización del reservorio, poniendo énfasis en el riesgo geoambiental que significa su explotación. En la parte central y sur la presencia de GH es local y limitada. Además esta área es susceptible a riesgos geoambientales, los cuales deberían ser considerados en el caso de una eventual explotación. De hecho, en esta área GH están fuertemente afectados por la actividad geológica del margen y por el cambio climático que podría generar disociación y/o escape del gas libre alojado debajo de la zona de estabilidad del hidrato. Asimismo, el modelo estacionario ha demostrado que el cambio climático podría contribuir a la disociación de GH y en consecuencia gatillar derrumbes en el talud. Esta hipótesis es sustentada por las altas concentraciones de GH y un importante talud continental que caracteriza a la zona. La disociación de GH podría cambiar las propiedades petrofísicas y el contenido de fluido y sólido del subsuelo, gatillando deslizamientos como ya han ocurrido en el pasado. En conclusión, antes de cualquier explotación de este importante reservorio, es necesario destinar los esfuerzos a una completa y acabada caracterización de la zona, adquiriendo nuevos datos que incluyan geofísica, geologia, datos de pozo y una mejor comprensión de la relación entre el sistema de GH y los riesgos asociados a una eventual explotación.

Abstract

The Chilean margin is very interesting from the point of view of gas hydrate (GH), as the analysis of the seismic lines along the entire margin has shown. Therefore, the GH could be a good opportunity to answer the energy demand of Chile. In the north, the GH reservoir is interesting from an energy point of view, even if it is hosted in low permeability sediments. Efforts should be devoted to better characterize the GH reservoir here, considering the possible geo-hazards that could affect the exploitation activities. In the central and southern part, GH is local and limited. In addition, this area is sensitive to geo-hazards, which should be considered in the case of exploitation. In fact, here, GH reservoirs are strongly affected by geological activity and climate change that could cause GHs dissociations and/or leakage of the free gas trapped below them. Furthermore, the steady-state modeling pointed out that climate change could cause GH dissociation, triggering slope failure, hypothesis supported by the presence of high concentrations of GH in correspondence of an important seafloor slope. The GH dissociation could change the petrophysical characteristics and the fluid and solid contents of the subsoil triggering slopes occurred already in the past. In conclusion, before exploiting this important reservoir, more effort should be devoted to gaining a better characterization of the reservoir acquiring new data, such as geophysical, geological, and well data, and a better understanding of the relation between the GH system and hazards that could affect the exploitation.

The Iberian thermal lithosphere and perspectives on deep geothermal studies.

La litosfera térmica de la Península Ibérica y perspectivas sobre estudios geotérmicos profundos.

M. Torne[1], I. Jiménez-Munt[1], A. M. Negredo[2,3], J. Fullea[2], J. Vergés[1], I. Marzán[4], J. Alcalde[1], E. Gómez-Rivas[5] and C. García de la Noceda[6].

1 GEO3BCN-CSIC. The Spanish National Research Council (CSIC), Solé i Sabaris, S/N, 08028 Barcelona, Spain
2 Department of Physics of the Earth and Astrophysics, Universidad Complutense de Madrid (UCM), Madrid, Spain
3 Institute of Geosciences IGEO (CSIC-UCM), Madrid, Spain
4 Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Rio Rosas, 23, Madrid, Spain
5 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de La Terra, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain
6 GEOPLAT. Plataforma Española Tecnológica y de Innovación en Geotermia. Cedaceros, 11, 2º C. 28014 Madrid

Abstract: Renewable energy sources are key to achieve the transition toward clean energy system. Among them, geothermal energy has a production whose effectiveness requires sufficient understanding of the temperature distribution and fluid circulation at depth, as well as of the lithological and petrophysical properties of the crust. Based on the compilation of available modelling results, we present the depth of the thermal Lithosphere–Asthenosphere Boundary (LAB) of the Iberian Peninsula and the temperature distribution at crustal depths of 5, 10, and 20 km, and at Moho level. At 5 km depth, the temperature is above 110 °C with local anomalies (> 130 °C) located in the Iberian Massif and Cenozoic volcanic provinces. A similar pattern is observed at 10 and 20 km depth, where temperatures are above 190 °C and 350 °C, respectively. At 20 km depth, anomalies above > 500 °C, delineate the SE and NE Cenozoic volcanic provinces. At Moho depths, temperature ranges from 450 to 800 °C with hot regions mainly located along the Iberian Massif and the SE and NE volcanic provinces. The compiled results do not show any lithospheric anomaly that could give rise to high temperatures at shallow depths, but they do show an acceptable exploitation potential at intermediate depths.

Key words: Thermal lithosphere, geothermal potential, temperature distribution in the Iberian crust, integrated geophysical–petrological numerical modelling.

Resumen: *Las fuentes de energía renovable son clave para la transición hacia un sistema de energía limpia. Entre ellas, la energía geotérmica tiene una producción cuya efectividad requiere conocer la distribución de la temperatura y la circulación de fluidos en profundidad y las propiedades litológicas y petrofísicas de la corteza. Basándonos en resultados publicados, analizamos la profundidad del Límite Litósfera–Astenosfera (LAB, en inglés) de la Península Ibérica y la distribución de la temperatura a profundidades de 5, 10 y 20 km y en la Moho. A 5 km, la temperatura supera los 110 °C con anomalías locales (> 130 °C) localizadas en el Macizo Ibérico y en las zonas volcánicas Cenozoicas del SE y NO. A 10 y 20 km de profundidad, se observa un patrón similar con T superiores a 190 °C y 350 °C, respectivamente. A 20 km de profundidad, las anomalías superiores a 500 °C delimitan las zonas volcánicas Cenozoicas. A profundidades de la Moho, la temperatura varía entre 450 y 800 °C, con zonas calientes principalmente a lo largo del Macizo Ibérico y las zonas volcánicas Cenozoicas. No se observan anomalías litosféricas que pueda generar altas temperaturas a poca profundidad, aunque sí muestran un potencial de explotación aceptable a profundidades intermedias.*

Palabras clave: *Litosfera térmica, potencial geotérmico, distribución de temperaturas en la corteza de Iberia, Modelización numérica integrada geofísica-petrológica.*

THE THERMAL STRUCTURE OF THE IBERIAN CRUST

In this work, we summarize the regional trend of the structure and temperature distribution at crustal depths in the Iberian Peninsula. This study is based on the compilation of seismic data and the available results from 2D profiles and 3D regional thermal models located in Figs. 1 and 2. The models integrate geophysical and petrological data to determine the thermo-chemical structure of the crust and upper mantle down to 400km (e.g., Kumar et al., 2021). For more detailed information the reader is referred to the work of Torné et al. 2023.

The compilation of seismic data from Diaz et al., 2021) and the results of the thermal modeling of the Iberian Peninsula (Fig. 3) shows that, in general, both the Variscan and Alpine crust are structured in three layers: the upper and middle crust of variable thickness with velocities between 5.4–6.2 and 6.2–6.5 km/s, respectively, and the lower crust with velocities between 6.5–7.2 km/s, velocities that are slightly higher on average (6.9–7.0 km/s) in the Variscan crust (Díaz and Gallart, 2009). Thermal modelling results show that this stratification is also reflected in variations of the values of radiogenic heat production and thermal conductivity

obtained from the best fit model that are summarized in Figure 3.

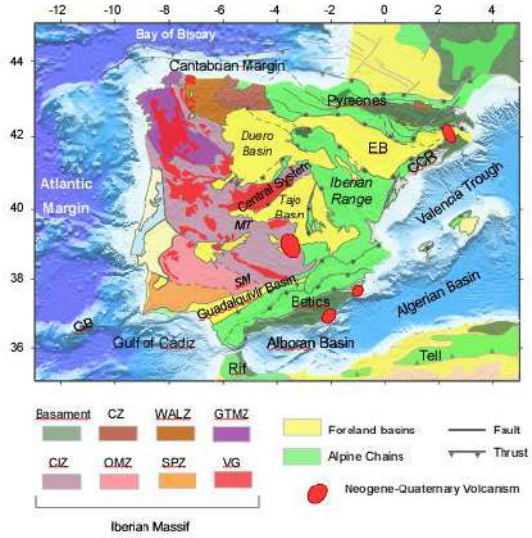


FIGURE 1. *Simplified geological map of the Iberian Peninsula. Modified form Torné et al. (2015).*

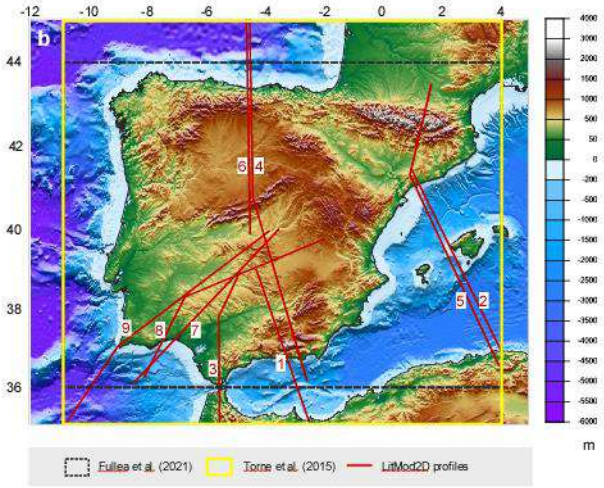
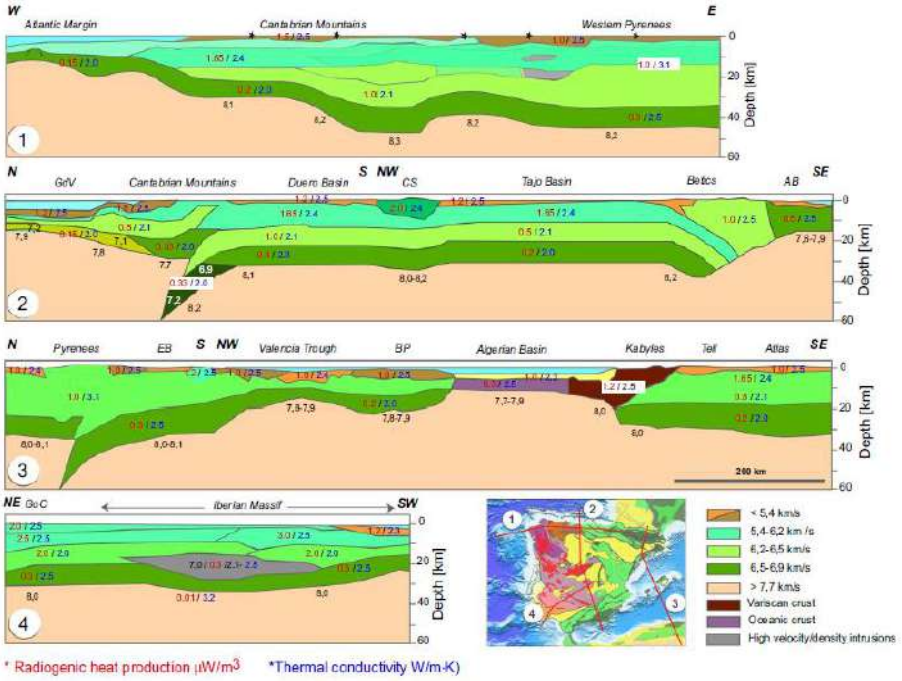


FIGURE 2. *Location of thermal models carried used in this study. Thick red lines show location of 2D profiles. Thick yellow and dashed grey lines show location of regional models. 2D profiles: 1 and 2—Kumar et al. (2021); 3—Jiménez-Munt et al. (2019); 4—Carballo et al. (2015a); 5—Carballo et al. (2015b); 6—Pedreira et al. (2015); 7 and 8—Palomeras et al. (2011); 9—Fernàndez et al. (2004). Modified from Torné et al. (2023).*

In Figure 3 we observe how, along the Pyrenean orogen, the conductivity is slightly higher in the middle/lower crust of the Alpine zone (3.1 and 2.5 W/m.K) than in the Variscan zone (2.1 and 2.0 W/m.K), while for the rest of the Peninsula, the conductivity values remain constant (2.4, 2.1, and 2.0 W/m.K), except for the SW Iberian Massif, which shows slightly higher values (Fig. 5). On the contrary, in the northern margin, radiogenic heat production is lower in the Alpine upper crust than in the Variscan one (1.0 and 1.65 µW/m3), while this trend is reversed for the lower crust (0.3 and 0.2 µW/m3, respectively). We also highlight the differences observed at the level of the middle/lower crust between the northern half of the Iberian Peninsula (Duero Basin) and its southern half (Tajo Basin) with values of radiogenic heat production for the middle/lower crust being slightly higher in the northern part (1.0 and 2.4 versus 0.5 and 0.2 µW/m3, respectively). With regard to the upper crust, a nearly constant value is obtained throughout the area (1.65 µW/m3), except for the Axial Zone of the Pyrenees and the SW Iberian Massif. We raise some caution with these results since the thermo-physical parameters obtained from thermal modelling should be taken as proxies that result from the best fit model, but they cannot replace in-situ or lab measurements. Site-specific values of crustal radiogenic heat production and thermal conductivity are essential to constrain the shallow geotherm and, hence, to evaluate regions of elevated geothermal gradients with the potential for geothermal energy exploitation

Figure 4 shows that at 5 km depth crustal temperatures range from 75–150 ºC with local maxima located in the Iberian Massif and SE and NE Volcanic Provinces. A similar pattern is observed at 10 km depth where temperatures range from 200 ºC to 275 ºC, with local anomalies up to 290 ºC. Results from 2D models mainly differ from 3D regional models in the Betics and Alboran Sea where they register temperatures above 275 °C. These high temperatures are likely related to the lithospheric thinning obtained in the transition from the Iberian Margin to the Alboran Basin, which is not so well constrained in the regional models. The temperature anomalies of the Iberian Massif and SE Volcanic Province proposed by Fullea et al. (2021) mainly trace the outcrops of the Variscan granitoids of the Iberian Massif and the volcanic rocks of the Calatrava and SE Volcanic Provinces (Figs. 1 and 4). In the volcanic provinces they are supported by the measured surface heat flow. Some differences are seen in the temperature distribution at Moho depths between the 3D regional thermal models. Fullea et al. (2021) model, which is based on the Bayesian geophysical-petrological inversion of surface waves, surface heat flow, elevation, and geoid anomalies, obtains higher temperatures (75-100 ºC on average), than those deduced by the model of Torne et al. (2015), which is based on geoid and elevation inversion integrated with 3D inversion gravimetric modeling (Fig. 4). The differences observed between the model of Fullea et al. (2021) and the model of Torne et al. (2015) and 2D profiles are related to the different information they use and their lateral resolution, which results in differences in the topography of the Moho and LAB depths, e.g., at the western regions.

The differences and similarities observed between the analyzed thermal models are largely controlled by the depth of the thermal LAB, the assumed isotherm, and to a lesser extent, by the values of the thermal parameters used. 2D thermal models permit a more detailed definition of the structure of the crust and the lithospheric mantle, and in turn, of their thermophysical properties. Fullea et al. (2007) assess the effect of varying the thermal parameters within geologically meaningful ranges and conclude that the lithospheric thickness, and hence the lithospheric geothermal gradient, is mostly affected by changes in the linear thermal expansion coefficient in the mantle, and to a lesser extent by changes in crustal thermal conductivity and radiogenic heat production. Changes in thermal conductivity and



A

FIGURE 3. *Crustal profiles showing the distribution of Vp, thermal conductivity and radiogenic heat production in the crust and uppermost lithospheric mantle. The map in the lower right corner shows the location of the profiles. Crustal structure from Díaz and Gallart (2009), Pedreira et al. (2007), Carballo et al. (2015 a, b) and Palomeras et al. (2011). Modified from Torné et al., 2023.*

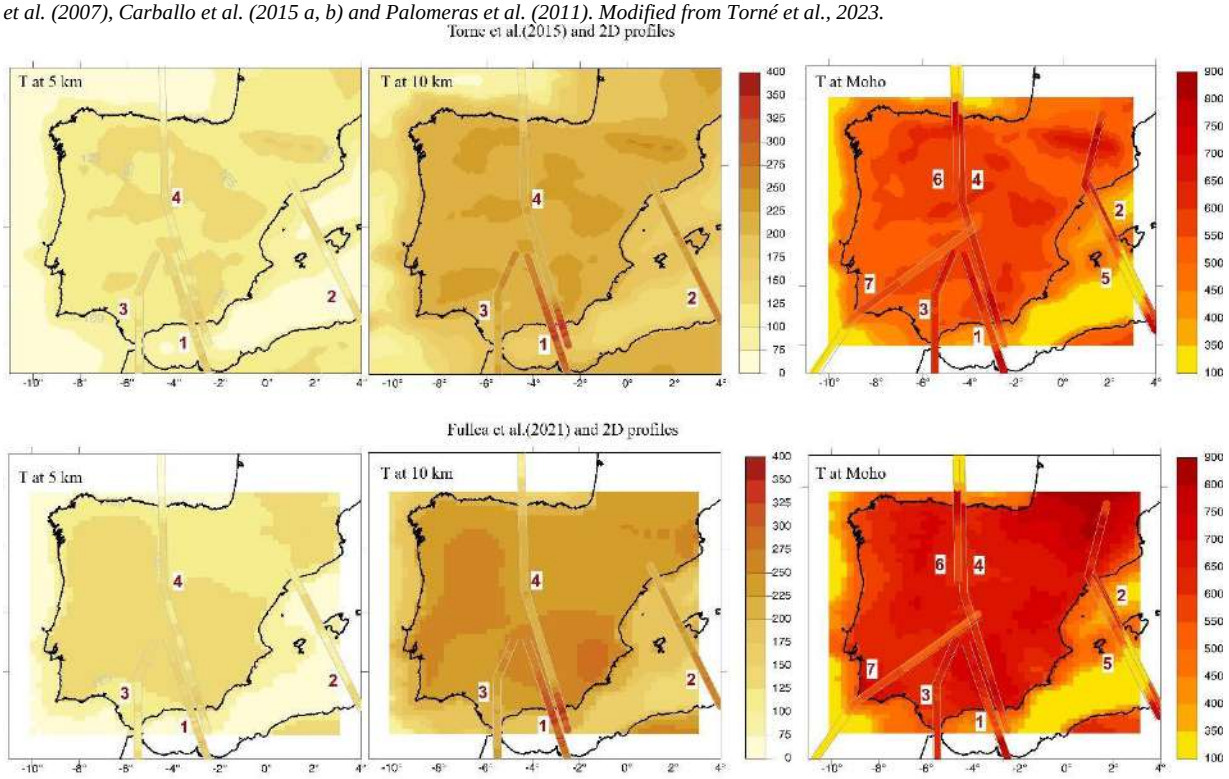


FIGURE 4. *Temperature distribution at 5, 10 km crustal depths and at Moho depth based on the models of Torne et al. (2015) and Fullea et al. (2021) and on the 2D profiles of Kumar et al. (2021) (1 and 2), Jiménez-Munt et al. (2019) (3), Carballo et al. (2015a) (4). Modified from Torné et al., 2023.*

radiogenic heat production are more relevant at upper crustal levels since they have a greater influence in the shallow geotherm.

CONCLUSIONS

1. Integrated geophysical-petrological thermal modeling allowed us to study and propose a first approximation of the temperature distribution, composition, and density distribution in the Iberian Peninsula.

2. Lithospheric thermal models show no evidence of lithospheric anomalies giving rise to high temperatures at shallow depths, but they do show a suitable geothermal potential at intermediate depths.

3. The potential for direct use of geothermal energy for district and greenhouse heating, and industrial processes,

seems to be excellent throughout the Iberian Peninsula, the main challenges being the availability of groundwater and drilling costs.

4. Regarding electricity production, hot dry rock (HDR) systems would be located mainly in the Iberian Massif, while hot sedimentary aquifer (HSA) systems, with the greatest potential, would be located in the eastern areas with a thin lithosphere and on the Mediterranean Margin of Iberia.

5. Site-specific values of crustal radiogenic heat production and thermal conductivity as well as an even distribution of surface heat flux measurements are essential to better constrain the shallow geotherm on the Iberian Peninsula and, hence, to evaluate regions of elevated geothermal gradients with the potential for geothermal energy exploitation.

6. The Iberian Massif and the Mediterranean Margin show the highest potential geothermal resources and should be therefore prioritized in future resource estimation investigations.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been performed using the facilities of the Laboratory of Geodynamic Modeling from Geo3BCN-CSIC.

REFERENCES

Carballo, A., Fernàndez, M., Jiménez-Munt, I., Torne, M., Vergés, J., Melchiorre, M., Pedreira, D., Afonso, J.C., García-Castellanos, D., Díaz, J., Villaseñor, A., Pulgar, J.A., and Quintana, L., 2015a. From the North-Iberian Margin to the Alboran Basin: a lithosphere geo-transect crossing the Iberian Plate. Tectonophysics 663, 399–418. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.009.Carballo, A., Fernàndez, M., Torne, M., Jiménez-Munt, I., and Villaseñor, A., 2015b. Thermal and petrophysical characterization of the lithospheric mantle along the northeastern Iberia geo-transect. Gondwana Research, 27, 4, 1430-1445. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.12.012

Díaz, J. and Gallart, J., 2009. Crustal structure beneath the Iberian Peninsula and surrounding waters: A new compilation of deep seismic sounding results. Phys. Earth Planet Inter., 173, 181-189, https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.11.008.

Diaz, J., Torne, M., Vergés, J., Jiménez-Munt, I., Martí, J., Carbonell, R., Schimmel, M., Geyer, A., Ruiz, M., García-Castellanos, D., Alvarez-Marrón, J., Brown, D., Villaseñor, A., Ayala, C., Palomeras, I., Fernandez, M., and Gallart, J., 2021. Four decades of geophysical research on Iberia and adjacent margins. Earth-Science Reviews, 222, 103841. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103841

Fernàndez, M., Marzán, I. and Torne, M., 2004. Lithospheric transition from the Variscan Iberian Massif to the Jurassic oceanic crust of the Central Atlantic. Tectonophysics, 386, 97–115.

Fullea, J., Fernàndez, M., Vergés, J., Zeyen, H., 2007. A rapid method to map the crustal and lithospheric thickness using elevation, geoid anomaly and thermal analysis. Application to the Gibraltar Arc System, Atlas Mountains and adjacent zone. Tectonophysics 430, 97–117. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.11.003.

Fullea, J., Negredo, A.M., Charco, M., Palomeras, I., Afonso, J.C., Villaseñor, A., 2021. The topography of the Iberian Peninsula from integrated geophysical-petrological multi-data inversion. Phys. Earth. Planet. Inter., 314, 106691. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2021.106691

Jiménez-Munt, I., Torne, M., Fernàndez, M., Vergés, J., Kumar, A., Carballo, A., and García-Castellanos, D., 2019. Deep seated anomalies across the Iberia-Africa plate boundary and its topographic response. J. Geophys. Res.: Solid Earth. https://doi.org/10.1029/2019JB018445.

Palomeras, I., Carbonell, R., Ayarza, P., Fernández, M., Simancas, J.F., Poyatos, D.M., González Lodeiro, F., Pérez-Estaún, A., 2011. Geophysical model of the lithosphere across the Variscan Belt of SW-Iberia: Multidisciplinary assessment. Tectonophysics, 508, 42–51. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.07.010

Pedreira, D., Afonso, J.C., Pulgar, J.A., Gallastegui, J., Carballo, A., Fernàndez, M., García-Castellanos, D., Jiménez-Munt, I., Semprich, J., 2015. Geophysical petrological modelling of the lithosphere beneath the Cantabrian Mountains and North-Iberian margin: geodynamic implications. Lithos 230, 46–68. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.04.018.

Torne, M., Fernàndez, M., Vergés, J., Ayala, C., Salas, M.C., Jimenez-Munt, I., Buffett, G., Díaz, J., 2015. Crust and mantle lithospheric structure of the Iberian Peninsula deduced from potential field modeling and thermal analysis. Tectonophysics 663, 419–433. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.003.

Torne, M., Jimenez-Munt, I., Negredo, A.M., Fullea, J., Vergés, J., Marzán, I., Alcalde, J., Gómez-Ribas, E., García de la Noceda, C. 2023. Advances in the modelling of the Iberian thermal lithosphere and perspectives on deep geothermal studies. Geothermal Energy (2023) 11:3 https://doi.org/10.1186/s40517-023-00246-6.

Respuesta del acuífero fluviovolcánico de la Garrotxa a la sequía.

Response of the Garrotxa fluviovolcanic aquifer to drought.

J. Bach[1] y E. Bassols[2]

1 Unitat de Geodinàmica Externa i d'Hidrogeologia, UAB. 08193 Cerdanyola. Joan.Bach@uab.cat
2 Área de Patrimonio Natural del Parque Natural de la Zona Volcánica de La Garrotxa, 17800 Olot. webassol@gencat.cat

Palabras clave: sequía, evolución piezométrica, acuífero fluviovolcánico, cambio climático, Garrotxa.

Resumen

En el contexto en el que el cambio climático no es un problema de futuro sino una situación actual, se presenta el análisis de la respuesta, a las situaciones de sequía, del acuífero fluviovolcánico de la comarca de la Garrotxa, en la provincia de Girona (noreste de Catalunya), a partir de los datos que desde el Parque Natural de la Zona Volcánica de la Garrotxa (PNZVG) se están reuniendo desde el año 1994.

El acuífero fluviovolcánico es fruto de la interacción entre la actividad volcánica y la dinámica fluviotorrencial que han dado lugar a un espesor de materiales cuaternarios que pueden superar los 100 m. Este conjunto de materiales forma un acuífero multicapa (Fayas y Domenech, 1974). Para definir las condiciones de sequía se ha calculado el SPI (índice de precipitación estandarizado) de la secuencia de datos de precipitación de 34 años, desde 1990 a 2023 (Estación 0390D-Olot). También se ha realizado un balance hídrico diario con los datos meteorológicos de las estaciones de la zona (Bach, 2023).

El análisis detallado de los datos piezométricos de este acuífero pone de relieve que los períodos de sequía producen descensos considerables del nivel piezométrico, que necesitan precipitaciones por encima de la media pluviométrica para recuperar la situación inicial de nivel alto. Aunque de momento no hay indicadores claros de sobreexplotación, si se evidencia esta fragilidad del acuífero para recuperarse, que puede ser un aviso para las situaciones futuras de disminución de las precipitaciones en el contexto del cambio climático (ACCUA, 2011).

Abstract

In the context in which climate change is not a future problem but a current situation, the analysis of the response to drought situations of the fluviovolcanic aquifer of the Garrotxa region, in the province of Girona (northeast of Catalonia), is presented, based on the data that the Garrotxa Volcanic Zone Natural Park (PNZVG) has been collecting since 1994.

The fluviovolcanic aquifer is the result of the interaction between volcanic activity and fluviotorrential dynamics that has given rise to a thickness of quaternary materials that can exceed 100 m. This set of materials forms a multilayer aquifer (Fayas and Domenech, 1974). To define drought conditions, the SPI (Standardized Precipitation Index) has been calculated from the 34-year precipitation data sequence, from 1990 to 2023 (Station 0390D-Olot). A daily water balance has also been carried out with meteorological data from the stations in the area (Bach, 2023).

The detailed analysis of the piezometric data of this aquifer highlights that periods of drought produce considerable decreases in the piezometric level, which require precipitation above the average rainfall to recover the initial high-level situation. Although now there are no clear indicators of overexploitation, this fragility of the aquifer to recover is evident, which may be a warning for future situations of decreased precipitation in the context of climate change (ACCUA, 2011).

Referencias

ACCUA (2011). *Adaptacions al canvi climàtic en l'ús de l'aigua*. Obra social CX CatalunyaCaixa, 221 p.

Bach, J. (2023). *Seguiment de l'oscil·lació piezomètrica amb registre continu. Aqüífers quaternaris PNZVG. Any 2023*. DAAC. PNZVG informe interno, 71 p.

Fayas, J.A. y Doménech, J. (1974). *Revista Agua*, 85, 20-31.

Las lagunas volcánicas del Campo de Calatrava. Caracterización hidrológica

The volcanic lagoons of Campo de Calatrava. Hydrological characterization

B.J. Ballesteros Navarro[1], C. Camuñas Palencia[2], J. L. Barrera Morate[3], M. Mejías Moreno[2], C. Baquedano Estévez[2], O. García Menéndez[2] y A. Padilla Benítez[4]

1 CN IGME-CSIC. C/ Cirilo Amorós, 42. 46004 Valencia.b.ballesteros@igme.es
2 CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. c.camunas@igme.es; m.mejias@igme.es; c.baquedano@igme.es; o.garcia@igme.es
3 ICOG. C/ Raquel Meller, 7. Ciudad Lineal, 28027. Madrid. barreramorate@gmail.com
4 Aljibe Consultores. C/ J.L. Pérez Pujalte, 7, 18006 Granada. apadilla@aljibeconsultores.es

Resumen: El Campo de Calatrava (Ciudad Real) es una de las tres regiones volcánicas de la España peninsular. Se trata de un vulcanismo de carácter alcalino relacionado con la presencia en el manto de un amplio "*hot spot*" (punto caliente) que provocó el ascenso de múltiples columnas de magma desde el Mioceno superior, y cuyo mayor desarrollo se dio de forma sincrónica con la sedimentación neógena-cuaternaria. Entre estas extrusiones volcánicas son muy frecuentes las de tipo hidromagmático, que han dado lugar a morfologías cratéricas muy amplias, denominadas *maar*. La particular configuración de estos edificios volcánicos ha generado pequeñas cuencas endorreicas que llegan a albergar hasta 61 lagunas temporales o efímeras, de formas subredondeadas o subelípticas, con profundidades decimétricas y diámetros normalmente inferiores a los 800 m. A este vulcanismo también se encuentran asociados 40 *hervideros*, o estanques con emanaciones de CO_2, y *fuentes agrias*, cuyas aguas son utilizadas en ciertos casos como minero-medicinales. Todas estas manifestaciones tienen un elevado interés hidrológico e hidrogeológico, así como importantes valores ambientales que es necesario proteger.

Palabras clave: Campo de Calatrava, lagunas volcánicas, *maar*, hidrología

Abstract: *Campo de Calatrava (Ciudad Real) is one of the three volcanic regions of peninsular Spain. It is an alkaline volcanism related to the presence in the mantle of a large "*hot spot*" that caused the rise of multiple columns of magma since the Upper Miocene, and whose greatest development occurred synchronously with Neogene-Quaternary sedimentation. Among these volcanic extrusions, hydromagmatic types are very common, which have given rise to very large crater morphologies, called* maar. *The particular configuration of these volcanic edifices has generated small endorheic basins that house up to 61 temporary or ephemeral lagoons, of subrounded or subelliptical shapes, with decimetric depths and diameters normally less than 800 m. Also associated with this volcanism are 40 hot springs, or ponds with CO_2 emanations, and sour springs, whose waters are used in certain cases as mineral-medicinal. All these manifestations have a high hydrological and hydrogeological interest, as well as important environmental values that must be protected.*

Key words: *Campo de Calatrava, volcanic lagoons,* maar, *hydrology*

INTRODUCCIÓN

En la España peninsular se han definido tres regiones volcánicas: Campo de Calatrava (Ciudad Real), Olot-La Garrotxa (Girona) y Cabo de Gata (Almería). El caso de Ciudad Real recibe la denominación de Región Volcánica Central de España, acepción acuñada por Eduardo Hernández-Pacheco en 1927 (Hernández-Pacheco, 1932), y está relacionada con la presencia de un amplio "*hot spot*" (punto caliente) en el manto del planeta, asociado a un adelgazamiento cortical que, desde zonas profundas, provocó el ascenso de un magma de carácter alcalino.

La manifestación volcánica que primero llamó la atención de científicos y curiosos fue el termalismo de algunos manantiales, aprovechados intensamente por sus propiedades medicinales desde finales del siglo XVII hasta bien entrado el siglo XX. También son destacables las manifestaciones relacionadas con su componente gaseosa: los denominados *hervideros* y *fuentes agrias*, ya que en la actualidad en el Campo de Calatrava el dióxido de carbono continúa saliendo a la atmósfera por medio de fracturas en el terreno o de forma difusa a través del suelo. Este vulcanismo ha producido también, y especialmente, notables erupciones magmáticas, de las que se han podido contabilizar hasta 350. Muchas de estas erupciones están asociadas a procesos hidromagmáticos, caracterizados por su gran explosividad, que han dado lugar a los *maares*, o cráteres de volcanes extinguidos en los que es frecuente la presencia de lagunas, constituyendo la segunda zona de

Europa con mayor número de ellos después del distrito alemán de Eiffel. En el Campo de Calatrava se han inventariado 61 de estos humedales, así como 40 fuentes de aguas minero-medicinales.

El primer científico que identificó y relacionó estos procesos eruptivos fue el naturalista irlandés Guillermo Bowles, quien llegó a España en 1752 y descubrió las rocas volcánicas de Ciudad Real, señalando los lugares donde afloraban (Bowles, 1775). Posteriormente, aunque los ingenieros de minas surgidos de la Real Academia de Almadén llegaron a citar el vulcanismo, no fue hasta la tesis del geólogo Francisco Quiroga (1879) cuando se realiza el primer estudio micrográfico de las rocas volcánicas de Calatrava.

En 1935, el químico y geólogo Isidro Parga Pondal publicó los primeros análisis geoquímicos de estas rocas, clasificándolas en diferentes tipos. Con el geólogo Eumenio Ancochea se produce un gran avance en el conocimiento del vulcanismo de Calatrava. En su tesis doctoral (1983), además de la cartografía de los afloramientos, realiza descripciones petrográficas y geoquímicas detalladas de las rocas efusivas y, por primera vez, dataciones geocronológicas de varios edificios volcánicos. Por último, en el Plan MAGNA 2ª Serie a escala 1:50.000 del IGME (1972-2018) se completó la cartografía geológica del país, quedando perfectamente localizadas todas las manifestaciones volcánicas.

EL VULCANISMO DEL CAMPO DE CALATRAVA

El vulcanismo de la provincia de Ciudad Real se inicia en el Mioceno superior y se desarrolla sincrónicamente con la sedimentación neógena-cuaternaria (Ancochea, 1999). Como se ha mencionado en la introducción, su génesis está relacionada con la existencia en el manto de un amplio "*hot spot*" que provocó el ascenso de múltiples columnas de magma, dando lugar a una actividad discontinua en el tiempo y dispersa espacialmente, sin que exista un cuerpo central eruptivo (Fig. 1). Este proceso fue favorecido por el adelgazamiento cortical que configura el subsuelo del territorio. La existencia de este adelgazamiento litosférico fue constatada por los geólogos Bergamín y Carbó (1986). Los estudios gravimétricos pusieron de manifiesto una anomalía de Bouguer negativa muy clara, interpretada como un manto subcortical anómalo generado por el ascenso de magma. Según este modelo, la zona de baja densidad tendría unos 40 km de longitud por 6 km de altura y respondería a una elevación de 10 a 20 km de la astenosfera, por lo que la base de la corteza, definida por la discontinuidad de Moho, quedaría a tan sólo 32 km de profundidad. Esta anomalía geológica implica una posición elevada importante respecto a la profundidad media a la que ésta se encuentra habitualmente en la corteza terrestre.

El magmatismo de Calatrava, de tipo freatomagmático y estromboliano, surge, por tanto, en un medio intraplaca, según algunos autores asociado a un *rift* continental incipiente o abortado, y está caracterizado por numerosas y puntuales erupciones monogenéticas, individuales y dispersas. Por su cronología se distinguen dos eventos volcánicos: uno más antiguo, mioceno (7,4 a 7,1 Ma), formado por rocas ultrapotásicas (leucititas olivínicas, únicas en Europa), y otro más moderno, pliocuaternario, independiente del anterior, de carácter alcalino (basaltos, basanitas, nefelinitas olivínicas y melilititas olivínicas), que comenzó hace unos 4 Ma, y en el que la mayoría de las erupciones se produjeron entre los 3,5 y los 1,5 Ma.

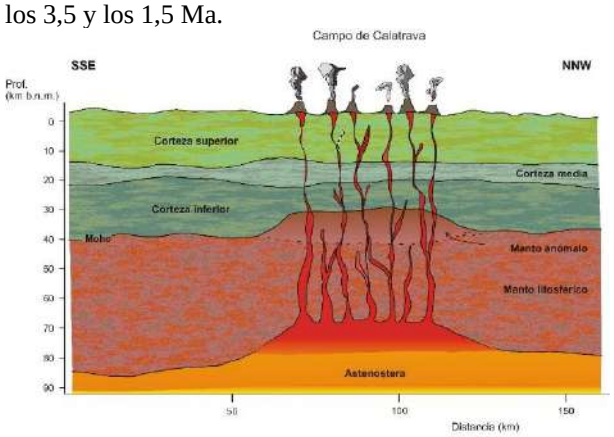


FIGURA 1. *Esquema tectónico sobre la génesis del volcanismo del Campo de Calatrava (Ciudad Real) (J.L. Barrera)*

HIDROGEOLOGÍA DEL CAMPO DE CALATRAVA

La hidrogeología de la zona es compleja, como consecuencia del gran número de edificios volcánicos existentes. Las formaciones geológicas del Plioceno y Cuaternario están constituidas por una amplia variedad de materiales, tales como conglomerados, gravas y arenas, así como calizas y margocalizas, con permeabilidades asociadas de amplio rango, englobados dentro de un conjunto sedimentario con un importante predominio de arcillas y margas. Por su parte, las rocas volcánicas suelen ser francamente impermeables, si bien en ciertos casos pueden presentar permeabilidades medias, e incluso, de forma muy puntual, altas. Estos materiales, de diferente naturaleza, edad y características hidráulicas, se encuentran hidrogeológicamente conectados entre sí, comportándose como un acuífero multicapa de carácter libre o confinado, según zonas. El acuífero multicapa se dispone, a su vez, sobre un acuífero silíceo regional constituido por cuarcitas ordovícicas, responsables de los relieves más acusados, con el que presenta una conexión más o menos restringida. Finalmente, la base impermeable está constituida por formaciones cámbricas y ordovícicas, compuestas mayoritariamente por pizarras.

La recarga de los acuíferos se produce por infiltración directa del agua de lluvia y, en menor medida, por los retornos de riego, mientras que su drenaje tiene lugar hacia los ríos Guadiana y Jabalón, así como por evaporación directa en aquellos lugares donde el nivel freático alcanza la superficie topográfica (CHG, 1999). Por su parte, el flujo subterráneo adquiere una componente general en sentido oeste, condicionado por los cursos de los ríos a los que los acuíferos aportan sus

aguas, mientras que la superficie piezométrica se localiza en torno a 610-670 m s.n.m. lo que implica que normalmente quede situada a escasa profundidad.

LAS LAGUNAS VOLCÁNICAS. BALANCE HÍDRICO

Por sus características geológicas e hidrogeológicas, implicaciones históricas y socioeconómicas, así como por sus posibilidades de aprovechamiento geoturístico, de las 61 lagunas inventariadas en el Campo de Calatrava cabe destacar a 10 de ellas (Fig. 2), que han sido estudiadas de forma individualizada (Camuñas *et al*., en prensa).

El funcionamiento hidrológico de estas lagunas, cuyas características esenciales quedan resumidas en la Tabla I, se ha establecido a partir de la determinación de su balance hídrico. Para ello, se han utilizado los datos climáticos de las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (años 1972 a 2021). El valor de evaporación se ha calculado a nivel diario por el método Penman (1948) para la extensión de la lámina de agua libre en cada momento, mientras que los aportes superficiales se han determinado por el método racional a partir del número de curva del Soil Conservation Service (SCS) del United States Departament of Agriculture (USDA) que permite estimar la escorrentía superficial generada en pequeñas cuencas. Conforme a dicho método, mediante el análisis geológico se han identificado y definido las formaciones aflorantes en la cuenca vertiente de cada laguna, clasificadas según su permeabilidad, y establecido su extensión y distribución, así como la pendiente media de la misma, la densidad de la vegetación y/o el tipo de cultivo practicado, con la obtención de la tipología y número de curva correspondiente a cada uno de estos factores.

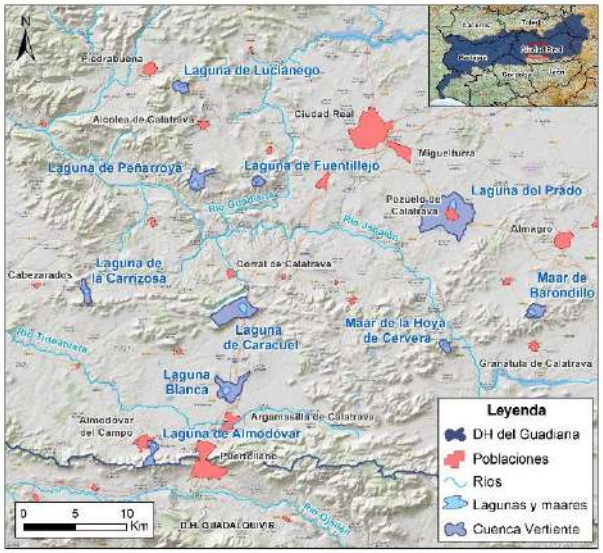


FIGURA 2. *Lagunas volcánicas estudiadas en el Campo de Calatrava*

Laguna	Altitud (m s.n.m.)	Génesis *Maar* en:	Superficie (ha)		Coef. (C/L)	Volumen		Balance hídrico (periodo 1972/2021)		Hidroperiodo (tiempo inundación)	Interés cultural	Figuras protección
			Laguna (L)	Cuenca (C)		Almac. medio (m^3)	Balance hídrico (m^3/año)	Aportes	Drenaje			
La Carrizosa	692,3	Rocas blandas	18,47	138,56	7,5	< 1.000	2.785	56% Pp 44% Es	100% Evp	15%	Alto	Sí
Luciánego	685,9	Rocas duras	12,47	131,82	10,6	1.650	2.878	75% Pp 25% Es	100% Evp	20%	Medio	No
Peñarroya	682,4	Rocas duras	35,19	276,12	7,8	5.200	37.767	78% Pp 22% Es	100% Evp	20%	Alto	Sí
Posadilla/ Fuentillejo	637,1	Rocas duras	9,06	94,12	10,4	< 200	2.328	85% Pp 15% Es	100% Evp	10%	Alto	Sí
Del Prado(1)	620,4	Rocas blandas	45,53	1.527,01	33,5	17.000	77.329	45% Pp 9% Es 46% Asub	100% Evp	45%	Alto	Sí
Caracuel	667,2	Rocas duras	57,41	626,53	10,9	100.000	401.000	40% Pp 3% Es 57% ASub	86% Evp 14% Riego(2)	90%	Alto	Sí
Blanca	661,0	Rocas mixtas	37,87	422,83	11,2	5.000	30.254	71% Pp 29% Es	100% Evp	20%	Medio	Sí
Almodóvar	669,9	Rocas duras	18,93	161,47	8,5	50.000	103.917	43% Pp 3% Es 54% ASub	100% Evp	60%	Alto	No
Hoya de Cervera	662,5	Rocas duras	9,25	96,84	10,5	< 500	2.308	75% Pp 25% Es	100% Evp	12%	Alto	Sí
Barondillo	700,2	Rocas duras	26,13	179,30	6,9	< 150	1.983	46% Pp 54% Es	42% Evp 58% Asub	< 5%	Bajo	No

Pp: Precipitación directa / Es: Escorrentía superficial / Asub: Aguas subterráneas / Evp: evaporación directa
(1) Hasta 2010 con aportes aguas residuales, (2) Detracciones de manantiales drenantes a la laguna

TABLA I. *Características relevantes de las lagunas volcánicas estudiadas en el Campo de Calatrava*

La pendiente media de la cuenca se ha obtenido mediante el análisis y geoprocesamiento de la superficie topográfica con herramientas SIG a partir de los Modelos Digitales del Terreno (MDT, 5 m) del CNIG. De igual manera, se ha hallado el área de cada laguna, su batimetría y el volumen almacenado para distintos niveles de inundación, con pasos de altura de 0,01 m, mediante la elaboración de un MDT a partir de ficheros digitales de información altimétrica de la nube de puntos del CNIG (LiDAR, 0,5 puntos/m^2). Con esta información se han establecido y representado para cada humedal las funciones que definen las relaciones altura lámina agua-superficie, altura lámina agua-volumen y superficie-volumen.

La metodología utilizada ha permitido simular el comportamiento del llenado/vaciado de las lagunas a nivel diario para el periodo 1972/2021, e identificar los procesos de intercambio entre las aguas superficiales y las subterráneas, según la presencia o ausencia de formaciones geológicas permeables en su vaso. La relación se ha puesto de manifiesto por la diferencia residual entre las entradas y las salidas del balance hídrico, donde los valores positivos implican aportes subterráneos al humedal, mientras que los negativos suponen la perdida de agua a favor de los acuíferos con los que estaría interconectado.

Por último, en las aguas de estos humedales predomina la facies sulfatada, con rangos de salinidad muy amplios y variables en el tiempo, según tengan o no relación con las aguas subterráneas, así como según su hidroperiodo.

CONCLUSIONES

Las 10 lagunas de origen volcánico estudiadas, representativas de las 61 catalogadas en el Campo de Calatrava, se encuentran entre los 620 y los 700 m s.n.m., la mayoría de ellas instaladas en *maares* generados en rocas duras, que son los que mejor configuran zonas endorreicas. Sus formas son redondeadas a elípticas con diámetros entre 260 y 870 m, y áreas entre 9,06 y 57,41 ha. Las cuencas hidrológicas vertientes a ellas son de pequeñas dimensiones; la mayor corresponde a la laguna del Prado, 15,3 km^2, y la menor a La Posadilla, 0,94 km^2, con un coeficiente medio de relación muy bajo entre las superficies lagunares y sus cuencas vertientes (12).

Los volúmenes de agua asociados a estos ecosistemas son muy reducidos, con almacenamientos medios en su vaso inferiores a 5.000 m^3, salvo en las de Almodóvar, del Prado y, especialmente, Caracuel. Estas superan ampliamente la cifra anterior, entre 17.000 m^3 (del Prado) y 100.000 m^3 (Caracuel). Igual sucede con sus aportes, debidos de forma exclusiva a la precipitación directa caída sobre su propio vaso y a la escorrentía superficial generada en su cuenca vertiente, con volúmenes habitualmente inferiores a 3.000 m^3/año. La excepción la vuelven a marcar las tres lagunas mencionadas, que son las únicas que reciben, además, aportes de aguas subterráneas. Así, los aportes máximos se dan en Caracuel, con 401.000 m^3/año. Por debajo quedan la laguna del Prado, con unos 77.300 m^3/año, y Almodóvar, con casi 104.000 m^3/año. En este aspecto, son de resaltar las lagunas de Blanca y Peñarroya que, a pesar de carecer de aportes subterráneos, la mayor extensión de sus cuencas hidrológicas les permite alcanzar casi 30.000 m^3/año y 38.000 m^3/año, respectivamente.

Por otro lado, estos humedales son drenados por evapotranspiración, salvo Barondillo, donde existe infiltración en profundidad por la presencia en su lecho de sedimentos con cierta permeabilidad. También hay que comentar que, excepto la laguna de Caracuel, donde parte de las aguas del manantial que la alimenta es usada para riego, ninguna otra presenta detracciones. Tampoco en la actualidad, y desde 2010, año en que cesaron los vertidos urbanos de Pozuelo de Calatrava a la laguna del Prado, existen aportes de aguas residuales a ellas.

En cuanto al hidroperiodo, expresado en términos porcentuales del tiempo en el que la cubeta se encuentra inundada, es generalmente inferior al 20%, e incluso menor en las cuencas hidrológicas más pequeñas. El caso extremo es Barondillo, que no llega al 5% por el carácter semipermeable de su vaso. Se comportan de manera muy diferente las lagunas con aportes subterráneos, que permanecen inundadas entre el 45% (del Prado) y el 90% (Caracuel) del tiempo.

Aunque la mayor parte de estos ecosistemas acuáticos se encuentran secos durante dilatados periodos de tiempo, suponen auténticas reservas de biodiversidad y refugio para aves migratorias, conformando, junto con los sorprendentes *hervideros* y *fuentes agrias*, un territorio singular desde el punto de vista del patrimonio hidrológico e hidrogeológico. Lamentablemente, muchos de ellos carecen de figuras de protección adecuadas. En algunos se observan vertidos y desechos de todo tipo, incluso están ocupados por cultivos. En este contexto, las administraciones públicas deberían dar a conocer el valor de estos lugares como patrimonio geológico y medioambiental, así como proceder a su protección y salvaguarda, ya que la actual situación de abandono de algunos compromete seriamente su supervivencia. En este sentido, es de especial interés la creación del geoparque "Volcanes de Calatrava", propuesto por el Consejo Mundial de Geoparques para su aprobación en el segundo trimestre de 2024. Dicha declaración supondría un importante apoyo para la protección y difusión de estos elementos naturales, así como un gran impulso para el desarrollo y puesta en valor de toda la comarca.

REFERENCIAS

Ancochea, E. (1999): El campo volcánico de Calatrava. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 7.3: 237-243.

Bergamín, J.F. y Carbó, A. (1986): Discusión de modelos para la corteza y manto superior en la zona sur del área Centroibérica, basados en anomalías gravimétricas. *Estudios Geológicos*, 42: 143-146.

Bowles, G. (1775): *Introducción a la historia natural y a la geografía física de España*. Madrid, Imprenta Real, 529 p.

Camuñas, C.; Ballesteros, B.J. y Mejías, M. (En prensa): *Las lagunas volcánicas del Campo de Calatrava*. CN IGME-CSIC - C. H. del Guadiana.

Hernández-Pacheco, F. (1932): *Estudio de la región volcánica central de España*. Memoria de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 235 p.

Penman, H.L. (1948): *Natural Evapotranspiration from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 193, 120-146.*

Avances en el conocimiento hidrogeológico de la isla de El Hierro (Canarias) mediante la construcción de un modelo geológico 3D.

Advances in hydrogeological knowledge of the island of El Hierro (Canary islands) through the construction of a 3D geological model

C. Baquedano[1], M.A. Marazuela[1], J. Martínez-León[1], N. Cruz-Pérez[2], L.E. Hernández-Gutiérrez[2], J.C. Santamarta[2], A. De la Losa[1] y A. García-Gil[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. c.baquedano@igme.es, ma.marazuela@igme.es, j.martinez@igme.es, a.delalosa@igme.es, a.garcia@igme.es

2 Departamento de Ingeniería Agraria y del Medio Natural. Universidad de La Laguna (ULL), La Laguna (Tenerife). C/ Pedro Herrera, s/n, 38200, San Cristóbal de La Laguna. ncruzper@ull.edu.es, lhergut@gobiernodecanarias.org, jcsanta@ull.edu.es

Resumen: Debido a la importancia crítica del agua dulce en las Islas Canarias, es esencial comprender y gestionar adecuadamente sus recursos hídricos. En la actualidad, la modelización de los sistemas acuíferos proporciona una valiosa información geocientífica para su identificación, protección y uso sostenible. Mediante un procedimiento de modelización geológica, empleando el programa GeoModeller, se ha elaborado el primer modelo geológico en 3D de la isla volcánica de El Hierro. El modelo 3D se elaboró a partir del Modelo Digital del Terreno de la isla, mapas geológicos superficiales, cortes geológicos y datos litológicos de obras hidráulicas. Se han identificado 11 formaciones que abarcan toda la isla, permitiendo describir e interpretar las principales unidades hidrogeológicas y estructuras geológicas conocidas relevantes a escala regional. Este modelo geológico 3D servirá como base para desarrollar el primer modelo hidrogeológico y geotérmico de la isla, permitiendo avanzar en la sostenibilidad de los acuíferos insulares.

Palabras clave: modelo geológico 3D, modelo hidrogeológico, acuífero insular, El Hierro, Islas Canarias.

Abstract: *Freshwater is critically important resource in the Canary Islands, so understanding and managing the water reserves is necessary. Aquifer systems modelling provides geoscientific information for their identification, protection and sustainable use. The GeoModeller programme was used to produce the first 3D geological model of the volcanic island of El Hierro, based on the Digital Terrain Model, geological maps, geological sections and lithological data from hydraulic works. Eleven formations covering the whole island were identified, enabling the description and interpretation of the main hydrogeological units and geological structures at the regional scale. This 3D geological model is the basis for developing the first hydrogeological and geothermal model of the island, to advance the sustainability of the island's aquifers.*

Key words: *3D geological model, hydrogeological model, island aquifer, El Hierro, Canary Islands.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La modelización hidrogeológica de la isla de El Hierro no se había realizado en profundidad hasta el momento. Los estudios más exhaustivos de este tipo, realizados en el archipiélago canario, corresponden a las islas de Tenerife y Gran Canaria, siendo menor la disponibilidad de información acerca del acuífero en las islas no capitalinas. En la isla de Hierro, los estudios hidrogeológicos más completos se corresponden con el Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias SPA/69/515 (SPA-15, 1975) y el Proyecto para actualización de la infraestructura hidrogeológica de la isla de El Hierro. Sistema Acuífero 87 (IGME, 1990).

Dada la importancia crítica del agua dulce en las Islas Canarias, es esencial desarrollar herramientas que sirvan para comprender y gestionar adecuadamente los recursos hídricos de estas regiones.

En la actualidad, los modelos geológicos 3D constituyen un dispositivo de comunicación gráfica excepcional y aportan datos sobre las propiedades geométricas de los cuerpos geológicos, lo que permite inferir los volúmenes y la disponibilidad de sus recursos para ser explotados (Keaton, 2022). Además, los modelos 3D permiten, entre otras aplicaciones, el desarrollo de modelos numéricos de flujo de agua subterránea (Gill et al., 2011), proporcionando una valiosa información geocientífica para la identificación, protección y uso sostenible de los acuíferos.

El objetivo de este trabajo es presentar el primer modelo geológico 3D de la isla de El Hierro, el cual servirá de base para la realización de un modelo hidrogeológico. Esto permitirá avanzar en la mejora del conocimiento del acuífero insular, investigar su potencial geotérmico, su vulnerabilidad y crear estrategias de adaptación al cambio climático.

ZONA DE ESTUDIO

El Hierro es la isla más occidental y joven del archipiélago canario. Tiene una superficie de 268,7 km^2, de la cual, el 58% está protegida. Su rasgo morfológico más característico es su forma de estrella, con tres alineaciones o rifts convergentes en su sector central y en donde la isla alcanza su máxima altitud. Los materiales geológicos predominantes son coladas basálticas, afectadas, en mayor o menor medida, por una red filoniana de diques, e intercalaciones de materiales piroclásticos. El conjunto de datos geológicos de la isla procede de registros petrológicos y geocronológicos (Abdel-Monem et al., 1972; Guillou et al., 1996), obtenidos de secciones geológicas en barrancos profundos y datos de perforaciones.

A nivel insular se pueden diferenciar tres edificios volcánicos principales (Balcells Herrera et al., 1997; Carracedo y Troll, 2016): 1) edificio Tiñor (1,12 - 0,88 Ma). Situado en la zona NE de la isla, comprende el edificio volcánico más antiguo. Debido a su rápido crecimiento, se produjeron inestabilidades en sus laderas que dieron lugar al deslizamiento del flanco occidental, cubierto actualmente por las emisiones subsiguientes; 2) edificio El Golfo (545ka - 175ka). Emplazado sobre la cuenca formada por el deslizamiento del edificio Tiñor, se extiende por el sur y oeste de la isla, continuando la fase de escudo basáltico; 3) vulcanismo de los ejes estructurales o rifts, iniciándose hace 158.000 años y prolongándose hasta el Holoceno. A efectos cartográficos se han individualizado estas emisiones en tres tipos: vulcanismo de las dorsales, vulcanismo de relleno del Golfo y emisiones sub-recientes y recientes. El vulcanismo de las dorsales ocupa una gran extensión superficial, cubriendo los edificios anteriores. En las fases eruptivas finales, durante el Pleistoceno Superior, la presión ejercida por el ascenso y empuje magmático en la parte alta de la isla provocó una fuerte descompresión litostática. Esto causó la desestabilización y el colapso del edificio El Golfo, junto con las coladas superpuestas del vulcanismo de las dorsales, generando un gran arco o valle entre las dorsales septentrional y occidental. Este gran deslizamiento alteró drásticamente la fisonomía de la isla y constituye el accidente morfológico más importante de El Hierro. Posteriormente, distintas coladas rellenaron la depresión formada, constituyendo el vulcanismo de relleno del Golfo. Paralelamente, en los extremos de los rifts, se produjeron emisiones de coladas que desbordaron los paleoacantilados del edificio Tiñor y El Golfo, dando lugar a pequeñas plataformas costeras. Estas emisiones han sido asignadas a épocas sub-recientes y recientes e ilustran el crecimiento continuo de la isla en torno a los ejes estructurales.

Respecto a su comportamiento hidrogeológico, los materiales pertenecientes al edificio Tiñor presentan una baja permeabilidad y una reducida capacidad de almacenamiento debido a su alta compactación. En cambio, los materiales del edificio El Golfo presentan una compactación prácticamente nula, lo que les confiere una permeabilidad global alta (solamente atenuada por niveles piroclásticos) y constituyen el principal acuífero de la isla. Los materiales asociados a la actividad en los rifts, no han experimentado ni alteración ni compactación por lo que conservan su elevada permeabilidad inicial.

METODOLOGÍA

Para la creación del modelo geológico 3D de la isla de El Hierro se ha empleado el software GeoModeller. El código utiliza datos geológicos de superficie y subsuelo y luego aplica un algoritmo geoestadístico de interpolación, cokriging, para obtener el modelo 3D (Calcagno et al., 2008). También se ha utilizado ArcGIS para la gestión de la información geográfica (cartografía geológica, posicionamiento de las obras hidráulicas, ect).

Las fuentes de información consultadas han sido las siguientes (Fig. 1): a) Modelo Digital del Terreno (MDT) obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Los MDT utilizados consistieron en un conjunto de datos ráster con una resolución de celda horizontal de 25x25 m que representa la superficie del terreno; b) Mapas geológicos. Se utilizaron un total de cinco mapas, cuatro conjuntos de mapas geológicos a escala 1:25.000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (Balcells Herrera et al., 1997) y uno de Carracedo y Troll (2016). La documentación asociada a estos mapas incluía siete y cinco cortes geológicos respectivamente, distribuidos por toda la isla y que también se utilizaron para la construcción del modelo 3D; c) Descripciones de perfiles litológicos de 37 obras hidráulicas disponibles en la Base de Datos de los Puntos de Agua de las Islas Canarias (IGME). Entre ellos se incluyeron dos pozos canarios de gran diámetro (>5 m) (213 m de perforación total), 14 pozos y sondeos (2.047 m), 10 galerías (8.139 m) y 11 pozos-galería (5.374 m), unos 16 kilómetros en total. Todos los cambios de rumbo e inclinaciones de las galerías estaban disponibles y fueron incluidos en el modelo geológico 3D.

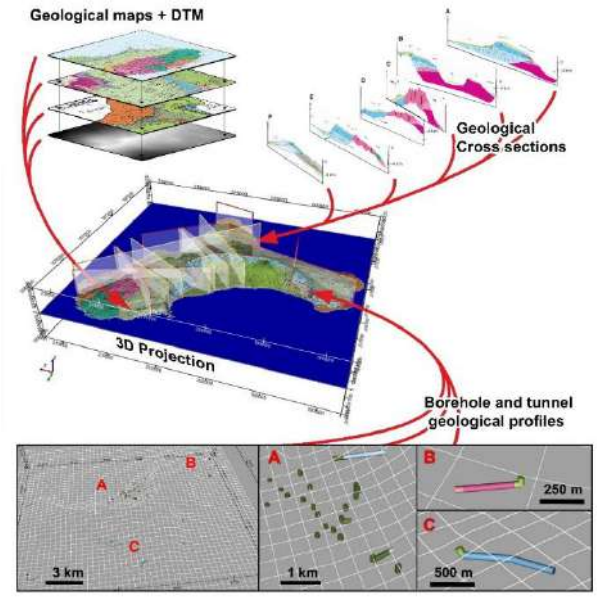


FIGURA 1. *Fuentes de información utilizadas para la construcción del modelo geológico 3D de la isla de El Hierro: Modelo Digital del Terreno (MDT), mapas geológicos superficiales, cortes geológicos y datos litológicos de obras hidráulicas (García-Gil et al., 2023).*

Se debe indicar que toda la información disponible para la construcción del modelo 3D se encontraba repartida en distintos mapas y bases de datos, codificada en diferentes formatos y transcrita en varios esquemas de clasificación geológica. Esto es relevante porque el cálculo mediante cokriging requiere la definición coherente de las unidades estratigráficas implicadas en el mismo, así como una jerarquía entre ellas. Por lo tanto, si no hay coherencia ni orden en los datos de entrada del programa, el modelo no se podrá obtener correctamente.

El primer paso para obtener una modelización 3D coherente fue definir la serie estratigráfica del modelo, mediante una exhaustiva consulta y revisión bibliográfica de la información de partida disponible. Teniendo en cuenta que el objetivo del modelo geológico 3D es abordar la gestión de las aguas subterráneas e investigar su potencial geotérmico, este trabajo se centró en la cartografía de las diferentes unidades hidroestratigráficas de la isla, para discretizarlas según la porosidad y permeabilidad de las rocas.

La serie estratigráfica seleccionada incluyó una secuencia de once formaciones, tres en el edificio Tiñor, otras tres en el edificio El Golfo y cinco pertenecientes al vulcanismo de los rifts, Estas formaciones abarcan la totalidad de la isla, permitiendo describir e interpretar las principales unidades hidrogeológicas y estructuras geológicas relevantes en un modelo geológico generalizado.

Una vez reclasificadas las distintas formaciones, se georreferenciaron, digitalizaron e importaron a GeoModeller los mapas geológicos superficiales, los cortes geológicos y los datos litológicos de las obras hidráulicas según la serie estratigráfica establecida.

Por último, se realizaron 60 cortes auxiliares y se comprobó, mediante una visualización exhaustiva en 3D, la coherencia entre todas las interfaces a interpolar, ya fueran superficiales o subterráneas. Este proceso implica la revisión de todos los datos que individualmente parecen correctos pero que pueden no resultar coherentes en su conjunto, impidiendo el cálculo del modelo final.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El dominio del modelo geológico 3D resultante incluye toda la isla de El Hierro (Fig. 2), desde su cumbre más elevada (Pico de Malpaso, 1.501 m s. n. m.) hasta los 120 m por debajo del nivel del mar, abarcando un total de 232,8 km^3. El modelo geológico contiene los principales edificios volcánicos y subunidades geológicas, permitiendo diferenciar las siguientes: 1) edificio Tiñor. Situado en el extremo NE de la isla en tonos morados y rosados, supone 1/6 del volumen total emergido de la isla (17%); 2) edificio El Golfo. Identificado en tonos azules y donde se sitúa el principal acuífero insular, abarca la mitad del volumen emergido (52%). Sin embargo, únicamente aflora en las escarpadas laderas del valle de El Golfo-Las Playas; 3) vulcanismo de los rifts. Supone un tercio del volumen total (31%) e incluye varias subunidades: el vulcanismo de las dorsales (verde claro, 17%), el vulcanismo de relleno del Golfo (verde oscuro, 13%) y las emisiones sub-recientes y recientes del Holoceno (coladas amarillas y naranjas, 1% del volumen total y situadas, de forma general, en los extremos de la isla).

El modelo 3D muestra que el edificio de Tiñor únicamente se alinea en uno de los tres rift de la isla, el NE, lo que sugiere que, inicialmente, la isla de El Hierro era un sistema de un solo rift. El colapso del edificio Tiñor parece representar el inicio de los rift este y sur, adoptando la isla su configuración en forma de estrella, con un ángulo de 120° entre sus tres brazos. Este hecho explicaría la mayor extensión del edificio volcánico de El Golfo, desarrollado durante este ciclo. Se estima que el edificio El Golfo desarrolló un gran escudo volcánico de 20 km de diámetro antes de su colapso, originando el valle del mismo nombre (Fig. 2, vista desde el NO).

Los modelos 3D constituyen una herramienta de comunicación gráfica excepcional, con múltiples aplicaciones didácticas. Por ello, en el marco de este trabajo, también se ha realizado un vídeo divulgativo, disponible en el siguiente enlace de YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=qGDOzJJeiJQ&t=175s (Fig. 3).

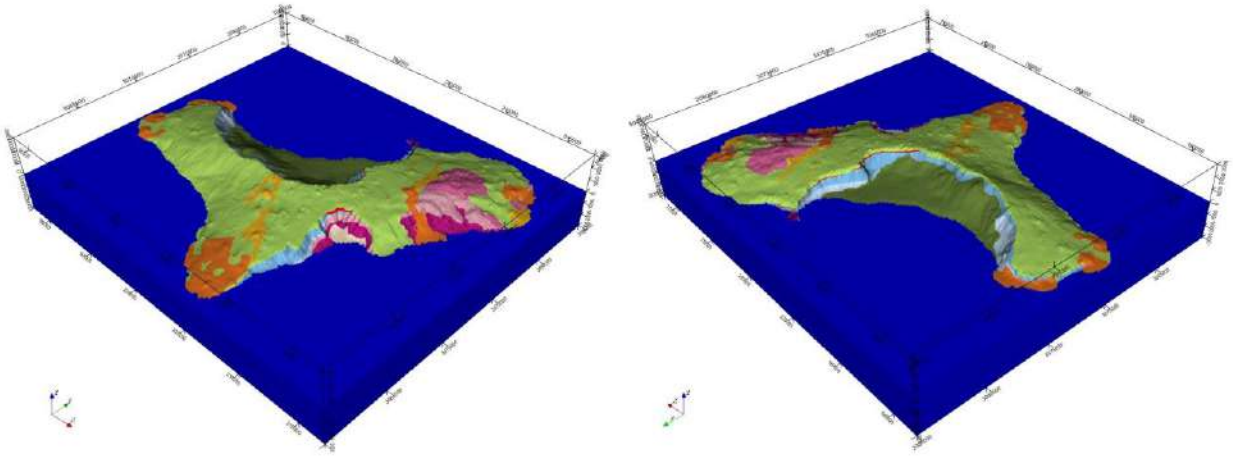


FIGURA 2. *Modelo geológico en 3D de la isla de El Hierro obtenido del programa GeoModeller. Vistas desde el SE (izda.) y el NO (dcha).*

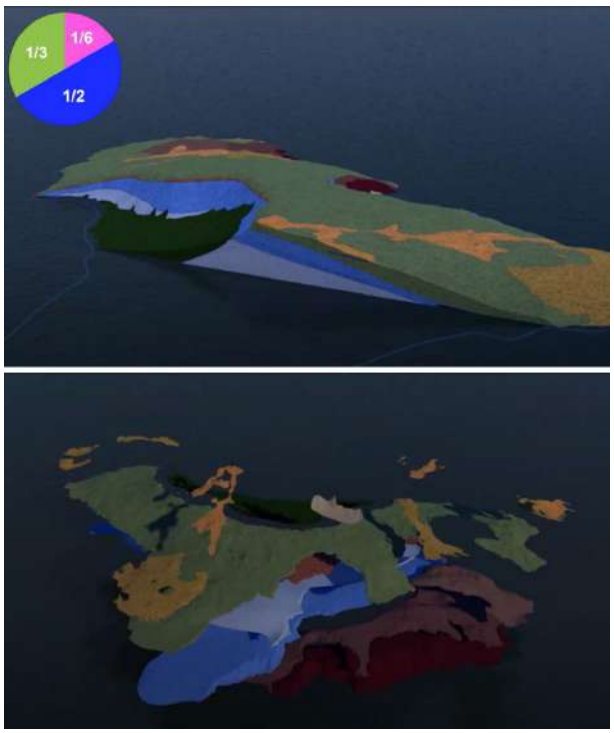


FIGURA 3. Vistas tridimensionales de las diferentes formaciones geológicas y edificios volcánicos de la isla de El Hierro. Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=qGDOzJJeiJQ&t=175s

Además de las 37 obras hidráulicas utilizadas para la construcción del modelo geológico 3D, existe una veintena de infraestructuras hidráulicas repartidas por toda la isla que no cuentan con una descripción de perfil litológico. La obtención de estos registros, junto con futuros estudios geofísicos complementarios en determinadas zonas, podría contribuir a refinar el modelo 3D en lugares concretos.

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra los pasos a considerar en la construcción de un modelo geológico 3D, totalmente digital, de una isla volcánica, creado a partir de mapas geológicos superficiales, cortes geológicos y datos litológicos de obras hidráulicas.

Los metadatos generados por el modelo geológico 3D suponen un importante avance en el conocimiento de la geometría del acuífero insular y pueden proporcionar, en futuros trabajos, nueva información sobre la historia geológica de la isla y las relaciones entre las zonas de rift y los colapsos laterales gigantes. Finalmente, el modelo geológico servirá como base para el desarrollo, mediante el código FEFLOW, del primer modelo hidrogeológico y geotérmico de la isla.

Se trata de una metodología que se puede exportar al resto de las Islas Canarias, siendo clave para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de los acuíferos insulares. Esta nueva información puede implementarse en los futuros Planes Hidrológicos, creando nuevas estrategias de gestión frente a los escenarios de cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Española de Investigación (proyecto SAGE4CAN AEI PID2020-114218RA-100).

REFERENCIAS

Abdel-Monem, A., Watkins, N.D. y Gast, P.W. (1972): Potassium-argon ages, volcanic stratigraphy, and geomagnetic polarity history of the Canary Islands; Tenerife, La Palma and Hierro. *American Journal of Science*, 272: 805-825.

Balcells Herrera, R., Gómez Sainz de Aja, J.A. y Cueto Pascual, L.A. (1997): *Mapa Geológico de España 1:25.000, hoja y memoria nº 1105 IIN (Valverde), 1105 IIIN (Sabinosa), 1105 IVN (Frontera) y 1108 N (La Restinga).* IGME, Madrid.

Calcagno, P., Chiles, J.P., Courrioux, G. y Guillen, A. (2008): Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171: 147-157.

Carracedo, J.C. y Troll, V.R. (2016): The Geology of El Hierro. En: *The Geology of the Canary Islands* (J.C. Carracedo y V.R. Troll, eds.). Elsevier, Amsterdam, 43-99.

García-Gil, A., Baquedano, C., Marazuela, M.A., Martínez-León, J., Cruz-Pérez, N., Hernández-Gutiérrez, L.E. y Santamarta, J.C. (2023): A 3D geological model of El Hierro volcanic island reflecting intraplate volcanism cycles. *Groundwater for Sustainable Development*, 21.

Gill, B., Cherry, D., Adelana, M., Cheng, X. y Reid, M. (2011): Using three-dimensional geological mapping methods to inform sustainable groundwater development in a volcanic landscape. *Hydrogeology Journal*, 19: 1349-1365.

Guillou, H., Carracedo, J.C., Torrado, F.P. y Badiola, E.R. (1996): K-Ar ages and magnetic stratigraphy of a hotspot-induced, fast grown oceanic island: el Hierro, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73: 141-155.

IGME. (1990): *Proyecto para actualización de la infraestructura hidrogeológica de la isla de El Hierro. Sistema Acuífero 87.* Ministerio de Industria y Energía, 59 p.

Keaton, J.R. (2022): Applied Multidimensional Geological Modeling: Informing Sustainable Human Interactions with the Shallow Subsurface. *Environmental & Engineering Geoscience*, 28: 325-327.

SPA-15. (1975): *Informe técnico final del Estudio Científico de los Recursos de Agua de las Islas Canarias. SPA/69/515*. Ministerio de Obras Públicas, 262 p.

Caracterización hidrogeoquímica preliminar de las aguas subterráneas del Parque Natural de Cabo de Gata – Níjar (Almería)

Preliminary hydrogeochemical characterization of groundwater in the Cabo de Gata-Níjar Natural Park (Almería)

J. Buera Cuerva[1], M. Mudarra Martínez[1], B. de la Torre Martínez[1] y B. Andreo Navarro[1]

1 Centro de Hidrogeología y Departamento de Geología de la Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias. 29071, Málaga
javierbc@uma.es; mmudarra@uma.es; delatorrem@uma.es; andreo@uma.es

Resumen: En el Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar, una de las regiones más áridas de Europa, predominan materiales volcánicos considerados tradicionalmente como poco permeables. Sin embargo, sus aguas subterráneas contribuyen al sostenimiento de los ecosistemas del parque. En este trabajo se ha llevado a cabo una caracterización hidroquímica espacial (entre 2021 y 2023), con el fin de conocer los procesos más influyentes en la mineralización de las aguas subterráneas. En general, no se aprecian diferencias significativas en la composición química e isotópica de las aguas procedentes de depósitos detríticos y de rocas volcánicas, pero se detectan valores isotópicos más negativos en las muestras procedentes de afloramientos carbonáticos. Un análisis más detallado sugiere la existencia de cuatro familias de agua subterránea, según rangos de mineralización y relaciones iónicas. La facies predominante es clorurada sódica, consecuencia del aerosol marino y la evapo-concentración, reconocible también por los valores de isótopos estables de la molécula de agua. Además, las concentraciones de bicarbonatos en muestras procedentes de rocas volcánicas evidencian el proceso de hidrólisis de los minerales silicatados. Finalmente se aprecian concentraciones de sulfatos consecuencia de la oxidación de sulfuros, además de la disolución de yesos en el entorno del río Alías.

Palabras clave: Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar, rocas volcánicas, hidrogeoquímica, isótopos.

Abstract: *The Cabo de Gata-Níjar Natural Park, one of the driest regions in Europe, is formed by volcanic rocks considered traditionally as low permeable formations. However, groundwater supports the ecosystems. In this work, a spatial hydrochemical characterization has been carried out between 2021 and 2023, to understand the most relevant processes affecting to groundwater mineralization. In general, there are no significant changes in the chemical and isotopic compositions of water samples from detrital deposits and volcanic rocks. Nevertheless, some differences, especially in the isotopic values (more negative), have been found in samples from carbonate outcrops. A more detailed analysis suggests the existence of four groundwater families, according to ranges of mineralization and ionic ratios. The predominant facies is sodium chloride, as a consequence of sea-salt aerosol in combination with evapo-concentration, a process also identified by the isotopic signal. In addition, the bicarbonate concentrations in some samples from volcanic rocks denote hydrolysis processes affecting silicate minerals. Finally, high sulphate concentrations are observed because of the sulphide oxidation, moreover dissolution of gypsum in the area around the Alías river.*

Key words: *Cabo de Gata-Níjar Natural Park, volcanic rocks, hydrogeochemistry, isotopes.*

INTRODUCCIÓN

El Parque Natural de Cabo de Gata – Níjar se ubica en el extremo suroriental de la Península Ibérica, en la provincia de Almería (Fig. 1). Se trata de una de las zonas más áridas de Europa, con valores medios anuales de precipitación y temperatura del aire de 240 mm y 18 – 20 ºC, respectivamente. Las lluvias suelen producirse de manera torrencial, con acumulaciones elevadas en pocas horas, lo que genera escorrentía que discurre rápidamente por arroyos y ramblas hacia el mar, si bien parte del agua de escorrentía llega a infiltrase. Después, pueden transcurrir meses sin precipitaciones, lo que convierte a las aguas subterráneas en un recurso primordial para sostener la biodiversidad y los ecosistemas del Parque Natural.

A pesar de la relevancia de las aguas subterráneas, el conocimiento hidrogeológico de la región es limitado. Cabe destacar el trabajo realizado por Carrasco (1988), centrado en la descripción de las características hidrogeológicas de la región. Posteriormente, Sola et al. (2015) pusieron de manifiesto algunos procesos hidrogeoquímicos que influyen en la calidad natural de las aguas subterráneas, mientras que Navarro y Martín (2015) estudiaron la concentración de elementos metálicos en el agua y en el suelo como consecuencia de la pasada actividad minera. Por último, Buera-Cuerva et

al. (2023) realizaron una caracterización hidrogeológica preliminar del entorno de Rodalquilar, situado en la mitad meridional del área de estudio (Fig. 1). Son necesarios, por tanto, trabajos adicionales de carácter hidrogeológico e hidroquímico con el fin de conocer cómo el cambio climático afectará a la disponibilidad de recursos hídricos y a la calidad química natural del agua subterránea en un ambiente árido como es el P.N. de Cabo de Gata – Níjar. Las investigaciones son más pertinentes, si cabe, por tratarse de rocas volcánicas, a menudo consideradas de baja permeabilidad, pero que pueden tener un interés hidrogeológico local (Cabrera Santana y Custodio-Gimena, 2013).

Con esta perspectiva, en la presente comunicación se describe y analiza la caracterización espacial de la composición química de las aguas subterráneas del P.N. de Cabo de Gata – Níjar. Se discuten, además, los principales factores que determinan la mineralización de las aguas subterráneas.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El P.N. de Cabo de Gata – Níjar coincide, a grandes rasgos, con una alineación montañosa de naturaleza volcánica, de dirección NE-SO, que se extiende entre el Mar Mediterráneo y la Serrata de Níjar (Fig. 1), asociada esta última a la falla de Carboneras. El vulcanismo se inició en el extremo meridional del parque hace 13 Ma, y migró progresivamente hacia el NE, hasta su cese hace 7 Ma. Durante los episodios volcánicos alternaban momentos más explosivos, que dieron lugar a formaciones de brechas y depósitos piroclásticos, con otros más efusivos, cuando se formaban coladas de lavas dacíticas y andesíticas (Soriano et al., 2014). Las etapas indicadas se combinaban con erupciones subacuáticas o subaéreas. Sobre las rocas volcánicas, y durante el Mioceno superior, tuvieron lugar varios ciclos sedimentarios y el depósito de calcarenitas bioclásticas con fragmentos volcánicos, calizas, calizas arrecifales, dolomías, depósitos turbidíticos, margas y yesos. Las facies sedimentarias y la potencia de estas unidades estratigráficas varían espacialmente a lo largo del área de estudio. Posteriormente, durante el Mioceno terminal y Plioceno tuvo lugar el depósito de calcarenitas bioclásticas con megaestratificaciones cruzadas, visibles en la cuenca del río Alías (Fig. 1), situada en el extremo NE del Parque. Durante el Cuaternario predomina el desmantelamiento de los relieves y la formación de depósitos aluviales, glacis y coluviones, como consecuencia de la dinámica fluvial y los procesos de ladera (Pineda et al., 1983). Los afloramientos más destacados de este tipo de depósitos se encuentran en la zona de Rodalquilar, Los Escullos y San José (Fig. 1).

METODOLOGÍA

Entre septiembre de 2021 y octubre de 2023 se llevaron a cabo varias campañas de actualización del inventario de puntos de agua. Además, se realizaron medidas de parámetros físico-químicos del agua (conductividad eléctrica -CE- y temperatura -Tª-). Para ello, se utilizó un conductivímetro de la marca WTW (modelo 3310). Al mismo tiempo se tomaron 186 muestras de agua procedentes de 5 pozos, 18 norias, 22 sondeos y 14 manantiales, para las posteriores determinaciones químicas e isotópicas en el Laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Los componentes químicos mayoritarios se analizaron mediante cromatografía iónica de alta precisión. La alcalinidad total (en esencia HCO_3^-) fue determinada mediante valoración con H_2SO_4 0,02N hasta alcanzar un pH de 4,5. Los valores de $\delta^{18}O$ y δ^2H han sido medidos mediante un analizador isotópico compacto marca PICARRO. Durante los eventos de precipitación se recogieron muestras de agua de lluvia con objeto de determinar su composición isotópica y representar la Línea Meteórica Local

.

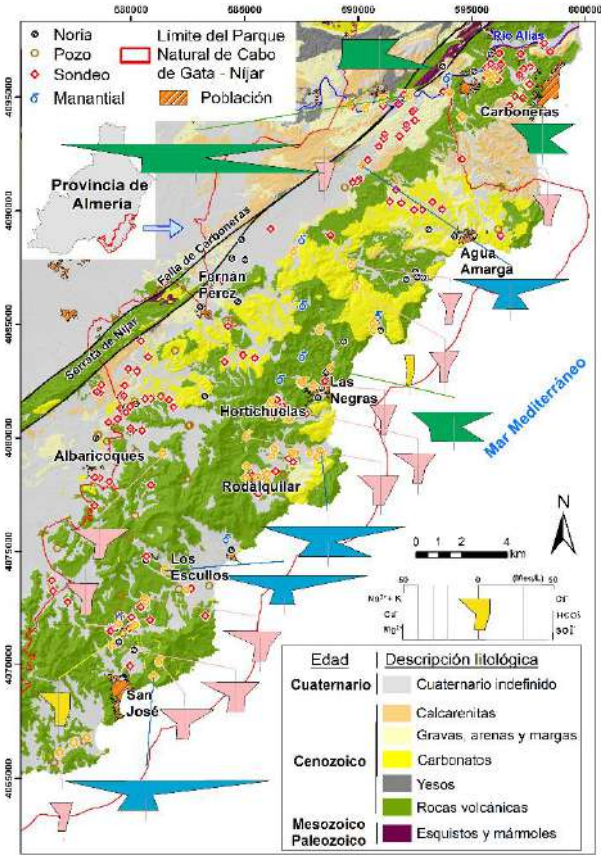


FIGURA 1. *Mapa geológico simplificado del Parque Natural de Cabo de Gata – Níjar. Modificado de Pineda et al. (1983). Se incluye el inventario de puntos de agua (el color naranja son los puntos muestreados) y los diagramas de Stiff con información hidroquímica de las muestras de agua analizadas. El color de estos hace referencia al grupo de agua subterránea definido en este trabajo: verde -S1-, rosa -S2-, amarillo- S3- y azul -S4-*

RESULTADOS

Los resultados analíticos del conjunto de muestras de agua subterránea recogidas se resumen en la tabla I. Los valores medios de CE y Tª del agua varían entre 3,6 mS/cm (muestras procedentes de materiales detríticos) y 23,0 ºC (de rocas volcánicas) y 1,6 mS/cm y 20,6 ºC (carbonáticos). Las mayores concentraciones medias de Cl^- y SO_4^{-2} (804,1 y 619,4 mg/l, respectivamente) se reconocen en las muestras de agua procedentes de

depósitos cuaternarios, mientras que los valores medios más altos de ion bicarbonato (314,0 mg/l) se observan en las muestras tomadas en puntos de agua asociados a afloramientos volcánicos. En cuanto a los cationes, la diferencia en la concentración media es hasta tres veces superior en las aguas procedentes de materiales detríticos que en aquellas asociadas a las formaciones carbonáticas. Destacan los contenidos medios en Na^+: 218,1, 452,0 y 564,7 mg/l en el agua de los afloramientos carbonáticos, volcánicos y detríticos, respectivamente.

		CE	Tª	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Detrítico	Máx	10.6	27.1	2654.1	4269.6	705.1	2132.2	53.9	465.1	753.8
	Med	**3.6**	**21.6**	**804.1**	**619.4**	**288.3**	**564.7**	**16.5**	**115.9**	**172.7**
	Mín	0.3	12.1	20.4	35.9	78.9	16.6	2.4	4.6	15.1
	Nº	101	99	101	101	101	101	101	101	101
Volcánico	Máx	9.3	29.8	3290.1	1293.5	494.3	1883.9	37.0	286.5	241.9
	Med	**2.8**	**23.0**	**637.9**	**195.7**	**314.0**	**452.0**	**13.7**	**70.5**	**73.2**
	Mín	0.6	13.3	75.0	3.3	22.7	85.8	5.9	14.4	0.3
	Nº	59	58	61	61	61	61	61	61	61
Carbonático	Máx	5.3	24.5	1286.7	373.6	329.1	798.3	13.8	158.0	148.9
	Med	**1.6**	**20.6**	**355.5**	**59.7**	**209.4**	**218.1**	**7.2**	**47.0**	**50.5**
	Mín	0.7	11.6	118.6	22.1	182.2	76.4	3.2	30.8	35.9
	Nº	24	23	24	24	24	24	24	24	24

TABLA I. *Valores de conductividad eléctrica (CE), temperatura (Tª) y de la composición química de las muestras de agua subterránea recogidas en el entorno del P.N. Cabo de Gata - Níjar. La CE está expresada en mS/cm, la Tª en ºC y los componentes químicos en mg/l. Se muestra el valor máximo (máx), medio (med), mínimo (mín) y el número de muestras (Nº) en cada tipo de medio*

Los datos hidroquímicos de la tabla I han sido representados en los diagramas de Stiff de la figura 1 y en el diagrama de Piper de la figura 2. Con el fin de simplificar la representación y obtener una distribución espacial de las características hidroquímicas, la figura 1 solo muestra los diagramas de Stiff de un total de 23 puntos asociados a los tres medios geológicos. La facies hidroquímica predominante es clorurada sódica, más evidente en las aguas procedentes de rocas detríticas y volcánicas. Solo un grupo reducido de muestras presentan facies sulfatada sódico - cálcica. Un análisis detallado permite diferenciar hasta 4 grupos de aguas subterráneas en función de las concentraciones iónicas: grupo S1 (diagrama de Stiff de color verde en Fig. 1 y 2) presenta alta mineralización y elevados contenidos de sulfatos; grupo S2 (Stiff de color rosa) tiene menor salinidad que el grupo anterior, con concentraciones ligeramente menores de bicarbonatos, sulfato, calcio y magnesio; grupo S3 (Stiff de color amarillo) se caracteriza por unas concentraciones relativamente elevadas de bicarbonato y cloruro; y, finalmente, las muestras que constituyen el grupo S4 (Stiff azules, Fig. 1 y 2) presentan valores altos de CE como consecuencia de concentraciones significativas de cloruro, sodio, sulfato y magnesio, pero proporcionalmente más bajas de bicarbonato y calcio.

La representación de los valores isotópicos de la molécula de agua ($\delta^{18}O$ y δ^2H) de las muestras recogidas en esta investigación (Fig. 3) presenta un ajuste según la ecuación $\delta^2H = 5{,}26\ \delta^{18}O - 3{,}1$ ($R^2 = 0{,}89$), con una pendiente inferior a la de la ecuación de la Línea Meteórica Local (LML) ($\delta^2H = 8\ \delta^{18}O + 15{,}6$; $R^2 = 0{,}99$). No se observan diferencias destacables en la composición isotópica de las aguas correspondientes a los puntos ubicados en rocas volcánicas y detríticas, mientras que las aguas procedentes de los materiales carbonáticos presentan valores isotópicos más ligeros.

DISCUSIÓN

A partir de los resultados expuestos se observa que la composición química del agua muestreada en rocas volcánicas y detríticas no presentan diferencias significativas; en ambos conjuntos se reconocen facies hidroquímicas cloruradas-sódicas y valores de CE y temperatura más elevados. Esto fue constatado por Sola et al. (2015), quienes no detectaron diferencias destacables entre las muestras tomadas en los materiales detríticos, volcánicos y carbonáticos. Sin embargo, en el presente estudio se ha observado que el agua drenada por los manantiales asociados a rocas carbonáticas tiene menor mineralización, concentraciones de sulfatos más bajas (grupo S3, Fig. 1 y 2) y, sobre todo, una composición isotópica más ligera.

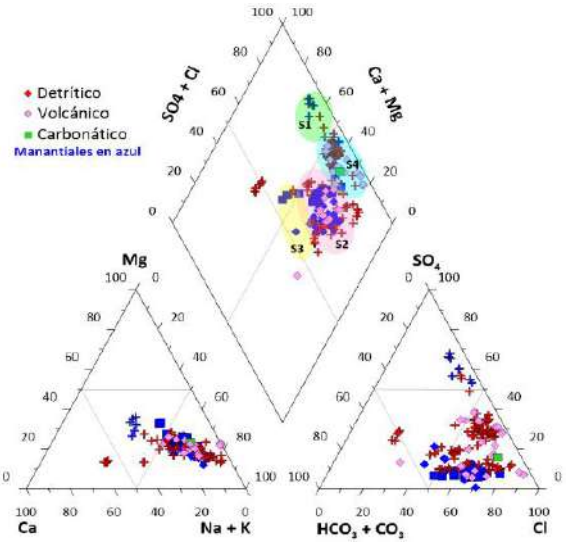


FIGURA 2. *Diagrama de Piper con todas las muestras de agua subterránea tomadas en el Parque Natural de Cabo de Gata – Níjar. En azul se destacan las muestras de agua procedentes de manantiales*

Dado que los iones más abundantes en las aguas subterráneas del P.N. de Cabo de Gata – Níjar son el cloruro y el sodio, Sola et al. (2015) apelaron al aerosol marino como posible origen de estos. Lo mencionado anteriormente, unido al efecto de la evapo-concentración, daría lugar a una elevada mineralización y homogenización de las facies hidroquímicas en las aguas subterráneas. Esta puede ser la causa de que los manantiales que drenan rocas carbonáticas presenten también elevada concentración de cloruro (Fig. 1). El proceso de evapo-concentración como consecuencia de las condiciones áridas del Parque Natural también se deduce a partir de la pendiente de la línea de ajuste isotópico de las muestras de agua subterránea, con un valor de 5,26, sustancialmente más bajo que la pendiente de las líneas meteóricas Mundial, del Mediterráneo, e incluso la Local (Fig. 3).

Por otro lado, las concentraciones relativamente altas de bicarbonatos, sobre todo en aquellos puntos de agua ubicados en materiales volcánicos y, en menor medida,

detríticos (tabla I y Fig. 1), podrían estar relacionadas con la hidrólisis de los minerales silicatados de las rocas volcánicas. El CO_2 en contacto con el medio acuoso forma ácido carbónico, que interactúa con estos minerales y da lugar a su hidrólisis. En dicho proceso se libera ion bicarbonato que pasa a formar parte de la composición química del agua subterránea. Este fenómeno ha sido evidenciado en las aguas subterráneas de otros macizos volcánicos (Catania y Reading, 2023; Fenta et al., 2020).

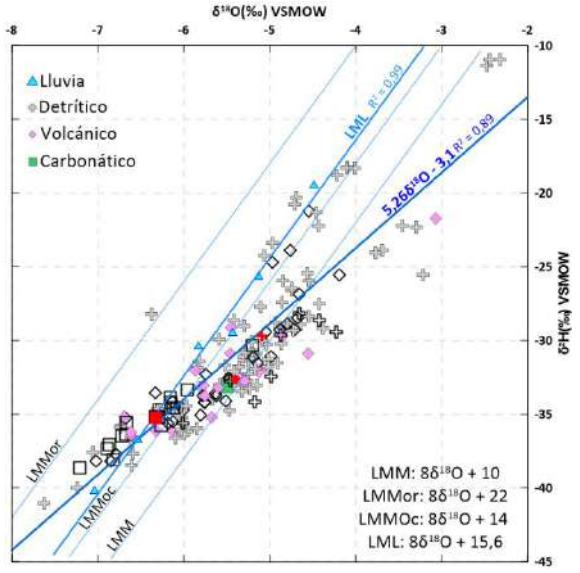


FIGURA 3. *Valores isotópicos de la molécula del agua de las muestras tomadas en el P.N. de Cabo de Gata - Níjar y su relación con la Línea Meteórica Local (LML), del Mediterráneo Oriental (LMMor) y del Mediterráneo Occidental (LMMOc). En borde negro se destacan las muestras de agua procedentes de manantiales y en rojo los valores medios de cada grupo.*

Finalmente, las concentraciones de sulfato en las muestras del grupo S1 serían debidas a la disolución de yesos presentes en el cauce del río Alías (Fig. 1). No obstante, no se puede descartar que exista cierta contaminación procedente de vertidos urbanos o de actividades agrícolas (Fig. 1).

CONCLUSIONES

A partir de la distribución espacial de los resultados hidroquímicos e isotópicos de las muestras de agua subterránea tomadas en el P.N. de Cabo de Gata – Níjar se constata, por un lado, que no existen diferencias aparentes en la composición química e isotópica de los puntos ubicados en medios volcánico y detrítico, salvo en aquellos lugares en los que el agua subterránea interactúa con yesos (principalmente en el río Alías). Sin embargo, sí hay diferencias hidroquímicas y, sobre todo isotópicas, entre las aguas de los puntos mencionados y las correspondientes a los manantiales que drenan los afloramientos carbonáticos. Estas últimas son isotópicamente más ligeras y con menor concentración de sulfatos; en algunos puntos presentan mayor proporción de bicarbonatos que de cloruros. Las características físico-químicas de las aguas subterráneas están condicionadas principalmente por el aerosol marino junto con la evapo-concentración que sufren las aguas en el suelo antes de infiltrarse. La combinación de ambos procesos daría como resultado la mineralización observada en las aguas subterráneas y el predominio de facies clorurada-sódica. Además, los valores de bicarbonato detectados podrían ser consecuencia de la hidrólisis de minerales silicatados presentes en las rocas volcánicas. Quedaría por analizar la existencia de otros procesos hidrogeoquímicos como el intercambio iónico, precipitación – disolución, etc., además de la contaminación antrópica por actividades mineras, que, con seguridad, influirán también en las características químicas del agua subterránea del P.N. de Cabo de Gata - Níjar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución del grupo de investigación RNM-308 del PAIDI de la Junta de Andalucía. Ha sido financiado por el proyecto Lifewatch Environmental and Biodiversity Climate Change Lab (EnBiC2-Lab).

REFERENCIAS

Buera-Cuerva, J., Mudarra, M. y Andreo, B. (2023). *Geogaceta*, 73, 31 – 34 p.

Cabrera-Santana, M.J. y Custodio-Gimena, E. (2013). Hidrogeología y terrenos volcánicos. En: Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos (Santamarta Cerezal, J.C.). Colegio Ingeniero de Montes, Tenerife, 65 – 92.

Carrasco, A. (1988). Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros Almuñécar (Granada, España), TIAC'88. 37 p.

Catania S. y Reading, L. (2023). Hydrogeochemical evolution of the shallow and deep basaltic aquifers in Tamborine Mountain, Queensland (Australia). *Hydrogeology Journal* 31, 1083 – 1100.

Fenta, M.C., Anteneh, Z.L., Szanyi, J. y Walker, D. (2020). Hydrogeological framework of the volcanic aquifers and groundwater quality in Dangila Town and the surrounding area, Northwest Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 11:100408. 13p.

Navarro, A. y Martín, A. (2015). Evaluación de la movilización del As procedente de los residuos mineros abandonados de una zona semiárida (Rodalquilar, Almería). *Ecosistemas*, 24 (2), pp. 79-89. Doi.: 10.7818/ECOS.2015024-1.12.

Pineda-Velasco, A., Giner-Sánchez, J., Zazo-Cardeña, C. y Goy-Goy, J.L. (1983). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 1046 (Carboneras)*. IGME, Madrid.

Sola, F., España, S., Vallejos, A. y Pulido-Bosch, A. (2015). *Geogaceta*, 58, 135-138.

Soriano, C.C., Giordano, G., Riggs, N.R., Porreca, M., Bonamico, A., Iosimi, D., Cifelli, F., Mattei, M., De Benedetti, A., Guarnieri, L. y Marchionni, S. (2014). Revista de la Sociedad Geológica Italiana 133 Nº3, 325-340. https://doi.org/f6qmn8

Caracterización hidrogeológica de las aguas minerales y termales de Andalucía. Subdominios hidrominerales.

Hydrogeological characterization of the mineral and thermal waters of Andalusia. Hydromineral Subdomains.

M.M. Corral Lledó[1], J.M. Fernández Portal[2], C. Ontiveros Beltranena[3], M.E. Galindo Rodríguez[4], B. Martínez Plédel[5] y J.A. Díaz Muñoz[6]

1 CN IGME-CSIC, Grupo de aguas minerales y termales. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid. mm.corral@igme.es
2 Consultor. josemifp@hotmail.com
3 CN IGME-CSIC, Grupo de aguas minerales y termales. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid. c.ontiveros@igme.es
4 CN IGME-CSIC, Grupo de aguas minerales y termales. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid. e.galindo@igme.es
5 CN IGME-CSIC, Grupo de aguas minerales y termales. Ríos Rosas 23. 28003 Madrid. b.martinez@igme.es
6 Consejería de Medio Ambiente, Agricultura e Interior. Área de Calidad Hídrica. joseangel.diaz@madrid.org.

Palabras clave: agua mineral, subdominio hidromineral, Andalucía

Resumen

Un dominio hidromineral se define como "aquel conjunto de formaciones geológicas relacionadas geográfica y geológicamente entre sí, que engloba materiales cuya litología y estructura permiten el almacenamiento y la circulación de aguas subterráneas con características físico-químicas comunes" (Corral *et al*., 2008). Andalucía es una comunidad autónoma que presenta una notable diversidad de aguas minerales y termales en su territorio. Durante la primera década del siglo XXI, el estudio de este recurso hidromineral por parte del Instituto Geológico y Minero (IGME) llevó a la definición de un total de 19 dominios hidrominerales a lo largo del territorio español, 6 de los cuales están presentes en el territorio andaluz. El estudio de las aguas minerales y termales de Andalucía realizado por el IGME entre 2019 y 2022 ha permitido profundizar en el conocimiento de estas aguas, permitiendo el establecimiento de 16 subdominios hidrominerales en esta comunidad autónoma, cuyas características se muestran en la presente comunicación.

Abstract

A hydromineral domain is defined as "that set of geological formations geographically and geologically related to each other, which encompasses materials whose lithology and structure allow the storage and circulation of groundwater with common physical-chemical characteristics" (Corral *et al*., 2008). Andalusia is a Spanish region that presents a notable diversity of mineral and thermal waters in its territory. During the first decade of the 21st century, the study of hydromineral resource by the Geological and Mining Institute of Spain led to the definition of a total of 19 hydromineral domains throughout the Spanish territory, 6 of which are present in the Andalusian territory. The study of the mineral and thermal waters of Andalusia carried out by Geological and Mining Institute of Spain between 2019 and 2022 has allowed to deepen our knowledge of these waters, allowing the establishment of 16 hydromineral subdomains in this Spanish region, whose characteristics are shown in this communication.

Referencias

Corral Lledó, M.M., López Geta, J.A., Ontiveros Beltranena, C., Sánchez Guzmán J. y Ocaña, L. (2008). *Las aguas minerales en España: Caracterización de los dominios hidrominerales y sus singularidades*. En: *Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Nº 27. Investigación y Gestión de los recursos del subsuelo*, 309-335.

Corral Lledó M.M., Díaz Muñoz, J.A., Galindo Rodríguez, M.E., Ontiveros Beltranena, C., Fernández Portal, J.M. y Martínez Plédel, B. (2022). *Andalucía y sus aguas minerales y termales*. 367 p.

Investigación de sistemas ancestrales de Siembra de Agua, como ejemplo de Solución Basada en la Naturaleza para la recarga de acuíferos. Las zayas de La Valduerna (León)

Investigation of ancestral systems of Water Sowing, as an example of a Nature-Based Solution for the recharge of aquifers. The zayas of La Valduerna (León)

A. de la Losa Román [1], J.A Ventura González[2], C. Marín Lechado[3], Carolina Guardiola Albert[1], Giuseppe Massone[1] y Sergio Martos-Rosillo[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN-IGME) CSIC. C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.delalosa@igme.es, c.guardiola@igme.es
2 Proyectos Vilariño Cortés, S.L. C/ Escritora Eva González, 4 Bajo. 24007 León. jose.ventura@provilacor.com
3 Instituto Geológico y Minero de España (CN-IGME) CSIC. C/Calera, 1. 28760.Tres Cantos, Madrid. c.marin@igme,es
4 Instituto Geológico y Minero de España (CN-IGME) CSIC. Alcázar del Genil, 4. Edificio Zulema, 18006 Granada. s.martos@igme.es

Resumen: En el acuífero libre situado entre los ríos Duerna y Peces, en la comarca leonesa de la Valduerna, (NO de España), se emplean unas acequias conocidas localmente como "zayas". Estas infraestructuras consisten en unos canales excavados en el terreno, a través de los cuales se deriva el agua desde el río Duerna hacia el río Peces y hacia la zona de riego. Durante los meses de deshielo (abril-mayo) buena parte del caudal derivado del Duerna se infiltra a lo largo de las zayas, mientras que otra parte se destina al regadío de pastizales, generándose un importante retorno de riego que contribuye a la recarga del acuífero. A partir de junio, cuando la escasez de agua superficial en el Duerna es evidente, se recurre a la explotación del acuífero, previamente recargado, mediante el bombeo desde pozos excavados. Este sistema de uso conjunto de agua superficial y subterránea constituye un ejemplo de Solución Basada en la Naturaleza para la recarga de acuíferos utilizada en la comarca al menos desde el siglo XVIII. En este trabajo se describe el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de este acuífero y se presenta la metodología a desarrollar durante la ejecución del proyecto "Inventario y caracterización de sistemas ancestrales de Siembra y Cosecha de Agua para la adaptación al cambio climático" financiado por la Fundación Biodiversidad.

Palabras clave: zayas, recarga, Soluciones Basadas en la Naturaleza, Comarca de la Valduerna, León.

Abstract: *In the unconfined aquifer located between the Duerna and Peces rivers, in the Valduerna region of Leon (NW Spain), ditches known locally as "zayas" are used. These infrastructures consist of channels dug in the ground, through which water is diverted from the Duerna river to the Peces river and to the irrigation area. During the snowmeltmonths (April-May) a large amount of the flow derived from the Duerna infiltrates along the zayas, while another quantity is used to irrigate pastures, generating an important irrigation return that contributes to the recharge of the aquifer. From June onwards, when the flow of the Duerna river is reduced, water from the aquifer, previously recharged, is pumped from dug wells. This system of conjuntive use of surface and groundwater is an example of a Nature-Based Solution for aquifer recharge that has been used in the region since at least the eighteenth century. This contribution describes the conceptual model of hydrogeological functioning of this aquifer and presents the methodology to be followed during the implementation of the project "Inventory and characterization of ancestral systems of Water Sowing and Harvesting for adaptation to climate change (WaSHa)" funded by the Biodiversity Foundation.*

Key words: *zayas, aquifer recharge, Nature Based Solution (NbS), Valduerna region, León*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para la Gestión del Agua consisten en una serie de acciones o procesos naturales, que imitan a la naturaleza, para mejorar la disponibilidad y calidad del agua, reducir los riesgos de los desastres asociados al agua (sequías, inundaciones, etc.), aumentar el bienestar humano, los servicios ecosistémicos, la resiliencia y la biodiversidad (TNC y MITECO, 2019).

Los sistemas ancestrales de recarga artificial de acuíferos, conocidos como Siembra de Agua, mediante canales de infiltración son un ejemplo de SbN que se ha venido realizando en Sierra Nevada, en el sureste español, desde la Edad Media, mediante las conocidas acequias de careo. Estas acequias consisten en canales excavados en el terreno que derivan el agua de deshielo de la cabecera de los ríos para infiltrarla en las partes altas de las laderas. El agua infiltrada en los acuíferos en pendiente de Sierra Nevada, formados fundamentalmente por materiales de alteración de rocas duras, pasa a circular lentamente, descargando por manantiales y arroyos meses después de haber sido

infiltrada. De esta manera, se garantiza el recurso hídrico en la época de estiaje, que es cuando hay mayor demanda (Martos *et al*, 2019; Jódar *et al*, 2022). Estas técnicas permiten una adecuada gestión del agua, así como el desarrollo de extensas zonas de agricultura intensiva y pastoreo de montaña. Son sistemas altamente resilientes y válidos para enfrentarse a la sequía y afrontar los retos que plantea el nuevo escenario de cambio climático (Jódar *et al*., 2022). Estos sistemas de Siembra de Agua no son exclusivos de Sierra Nevada, dado que también se utilizan en otras regiones españolas como es el caso de las caceras en Segovia, las regaderas en la Sierra de Guadarrama, las pesqueras en la comarca de La Vera en Extremadura y las zayas en la comarca de la Valduerna en León.

En este trabajo se describe el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero interfluvial Duerna-Peces y se presenta la metodología para analizar el papel de las zayas en la recarga de este acuífero y para proponer medidas de gestión, basadas en el conocimiento ecológico local y el conocimiento científico, de este ancestral sistema de manejo del agua.

ÁREA DE ESTUDIO. EL ACUÍFERO INTERFLUVIAL DUERNA-PECES

El ámbito geográfico de estudio se sitúa en la comarca leonesa de la Valduerna, al noroeste de la Península Ibérica, en el interfluvio existente entre los ríos Peces, al norte, y Duerna, al sur (Fig. 1), a unas cotas comprendidas entre los 920 m, de Velilla de la Valduerna, y los 775 m s.n.m., de Santiago de la Valduerna. La zona de estudio ocupa una superficie de unos 44 km^2 aproximadamente, habitada por unas 1.379 personas y donde existe una superficie cultivable aproximada de 2.027 ha.

Los cultivos predominantes son el trigo, la cebada, el maíz y la patata. La precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial (calculada con la expresión de Hargreaves) media anual y sus desviaciones estándar asociadas son de 510±142, 10,9±6,6 y 1033±38 mm/año, respectivamente. El río Duerna, en la estación de aforo de Velilla de la Valduerna, situada en el límite sureste del acuífero (Fig. 1), presenta un caudal medio de 2,43 m^3/s, con variaciones medias anuales comprendidas entre los 5,18 m^3/s, del mes de diciembre, y los 0,77 m^3/s, del mes de agosto (CHD, 2021). El río Peces permanece seco buena parte del año. Las aguas circulan por su cauce durante la temporada de riego, aguas abajo de los puntos en donde se descarga el trasvase de recursos hecho con las principales zayas del sistema.

El acuífero interfluvial Duerna–Peces está formado por 43,5 km^2 de afloramientos detríticos permeables (gravas, arenas y limos) con un espesor medio inferior a 10 m. Se trata de materiales cuaternarios en los que se incluyen sedimentos de tipo fluvial (fondos de valle, terrazas y llanuras de inundación) y sedimentos aluviales-coluviales. La geometría del acuífero es tabular, con una pendiente del 0,85% hacia N100E siguiendo el curso de los ríos. Su límite oeste y norte está cerrado al flujo subterráneo entre Castrillo de la Valduerna y el rio Peces, debido al acuñamiento y al contacto lateral de los materiales cuaternarios con las pizarras, areniscas y cuarcitas paleozoicas y los sedimentos margosos miocenos. Desde Fresno hasta el sur del casco urbano de Palacios de la Valduerna, el límite septentrional del acuífero lo marca el río Peces. El límite oriental es abierto al flujo subterráneo y lo define el cauce del río Tuerto, mientras que el límite meridional del acuífero lo constituye el río Duerna. La base del acuífero la forman sedimentos margosos y limosos del Mioceno, bajo las que se encuentran algunos niveles de arenas terciarias, a profundidades de 80-90 m, que son captados por algunos sondeos surgentes localizados en Valle de la Valduerna.

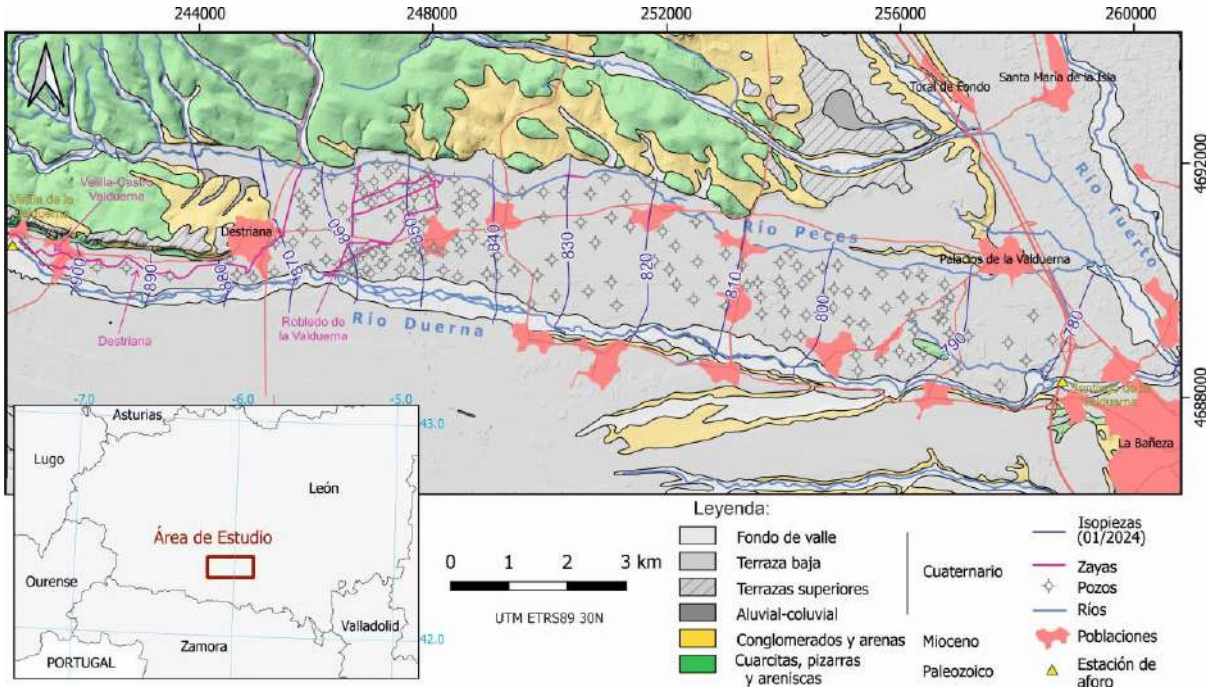


FIGURA 1. *Mapa de situación de la zona de estudio donde se muestra la geología, los puntos de control y estaciones de aforo, así como las principales zayas. Se ha llevado a cabo también un mapa de isopiezas con los niveles piezométricos de la campaña realizada en enero de 2024.*

La recarga del acuífero se produce por la infiltración de: a) el agua de lluvia, b) de parte del agua que circula por las zayas y por el río Peces y c) por retornos de riego. Las salidas se producen por bombeo y por descarga lateral hacia el río Duerna y el río Tuerto. Existen más de 180 pozos excavados, con diámetros y profundidades medias de 1,7 m y 6 m, respectivamente. Actualmente son explotados con bombas de aspiración que se conectan a las redes de aspersores, sistema que sustituyó al riego por caballones con el agua de las acequias y la extraída de los pozos con norias de sangre.

Las campañas de control piezométrico presentadas en CHD (2021), indican que el flujo subterráneo se dirige de oeste a este, con un gradiente hidráulico del 7,4 ‰ por mil. En ese mismo trabajo, se indica que las aguas de este acuífero son de baja salinidad, con una conductividad eléctrica media de 97 µS/cm, que coincide con la del río Duerna (CHD, 2021). Se trata de aguas poco mineralizadas y concentraciones poco elevadas de compuestos nitrogenados. El valor medio del contenido en nitratos es de 14 mg/l, con un máximo de 27 mg/l.

LAS ZAYAS DE LA VALDUERNA

Las zayas, también conocidas como "zaigas o raudas", consisten en unos canales excavados en el terreno, normalmente sobre arenas, gravas y arcillas, con longitudes comprendidas entre 2 y 6 km y secciones medias de 1,2 m de ancho por 70 cm de profundidad. Las capacidades de transporte de las zayas permiten la circulación de caudales comprendidos entre 100 y 250 l/s. Antes de la temporada de riego, se desvía el agua del río Duerna, trasvasándola al río Peces mediante las zayas. Parte del agua se infiltra desde las zayas al acuífero sobre el que está la zona de riego mientras que otra parte se vierte en el río Peces, que es un río perdedor. El agua recargada en el acuífero con las zayas y desde el río Peces, más los retornos de riego, permiten que esté disponible para poder extraerla mediante pozos artesanales, excavados a mano, al final de la temporada de riego, cuando ya no es posible derivar el agua desde el río Duerna. Existen algunos molinos de agua sobre las zayas que datan del siglo XVIII, pero el sistema es probablemente bastante anterior. Se cuenta con información previa de un ensayo de recarga de 15 días de duración realizado entre marzo y abril de 2020 (CHD, 2021). Durante el ensayo se pusieron en funcionamiento las tres zayas principales: 1) Zaya de Velilla-Castrillo de Valduerna, 2) Zaya de Destriana y 3) Zaya de Robledo de la Valduerna, hacia las que se derivaron caudales de 100, 150 y 250 l/s, respectivamente. En este breve periodo, las zayas recargaron 0,7 hm^3, cuestión que provocó un ascenso medio del nivel piezométrico del acuífero de 0,30 m. Las tasas de infiltración fueron muy elevadas, del orden de 20-45 l/s/km por lo que las tres zayas a pleno rendimiento podrían recargar 4,54 hm^3/año en el acuífero durante la campaña de riego (CHD, 2021).

MATERIAL Y MÉTODOS

Para mejorar el conocimiento de este acuífero y poder evaluar la importancia de las zayas en su recarga se va a seguir el esquema metodológico que se presenta en la figura 2.

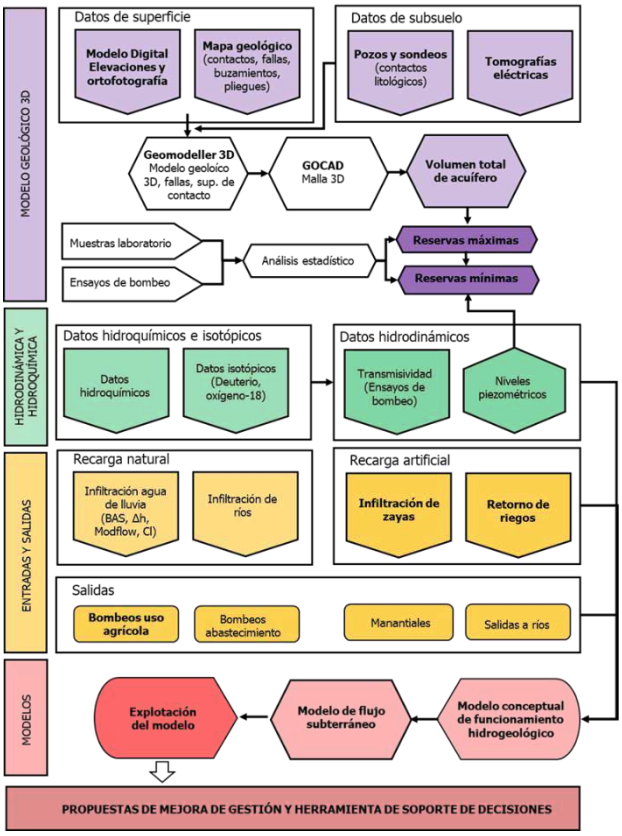


FIGURA 2. Esquema metodológico para definir el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero en la Comarca de la Valduerna.

Ya se ha finalizado un modelo geológico 3D del acuífero, para el que se ha utilizado el modelo digital del terreno, la cartográfica geológica previa, los resultados de varias tomografías realizadas en CHD (2021) y el inventario de puntos de agua (en el que se incluyen 180 pozos). Los valores de porosidad, que se determinarán con análisis de muestras y ensayos de bombeo, permitirán evaluar las reservas del acuífero. La recarga total se va a determinar mediante balances de agua en el suelo, balance de cloruros y mediante modelización hidrogeológica con MODFLOW. La recarga artificial a partir de las zayas se va a cuantificar controlado el caudal mediante las secciones de aforo existentes, al principio y al final de cada zaya. Durante la próxima campaña de riego se realizarán aforos diferenciales en las zayas. También se realizarán ensayos de bombeo para determinar los parámetros hidráulicos del acuífero y se procederá al muestreo del agua subterránea, para la posterior interpretación de los datos hidrogequímicos e isotópicos (oxigeno-18 y deuterio). Las salidas y entradas al Duerna se determinarán con las dos estaciones de aforo, de la Confederación Hidrográfica del Duero, disponibles en la zona de estudio. Además, se están realizando campañas de control piezométrico mensuales, en un total de 70 puntos de control. La mayor parte de esta información está siendo volcada en un modelo matemático de flujo que será realizado con el código MODFLOW. Una vez obtenidos estos resultados, se procederá a redefinir el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero y a su

modelización en MODFLOW. Los posibles escenarios de gestión del acuífero, que se simularan tras la calibración del modelo de flujo, van a permitir establecer propuestas y medidas de mejora de la gestión de los recursos con esta herramienta de soporte de decisiones.

RESULTADOS PRELIMINARES

Por el momento, ya se ha procesado la información meteorológica disponible en la zona de estudio correspondiente al periodo 1952-2020. Además de evaluar la precipitación y la evapotraspiración potencial media anual, 510 y 1033 mm/año, respectivamente, se han hecho balances de agua en el suelo, con datos diarios, considerando distintas reservas útiles y un umbral de escorrentía medio de 47 mm. Aplicando reservas útiles de 25 y de 150 mm, la recarga por infiltración del agua de lluvia resulta comprendida entre 155 y 49 mm/año, que aplicada a la totalidad del acuífero sería de 6,4 y 2 hm^3/año, respectivamente. La recarga potencial con las zayas ha sido evaluada en 4,5 hm^3/año (CHD, 2021). Desde octubre de 2023 se está realizando un control piezométrico del acuífero en 70 pozos. La piezometría resultante indica que el flujo se dirige de oeste a este, con un gradiente hidráulico medio de 7,4 ‰. La morfología de las isopiezas pone de manifiesto que, entre Miñambres de la Valduerna y la confluencia con el Tuerto, el Duerna es ganador. La conductividad eléctrica y la temperatura media del agua fue de 93 µS/cm y 12,6ºC, respectivamente, en el mes de diciembre. Los resultados preliminares del modelo geológico 3D, realizado con el programa Skua-Gocad, indican que la zona saturada del acuífero, en febrero de 2024, tenía un volumen de 300 hm^3. Si a este volumen se le aplica una porosidad media de entre el 3% y el 5%, que es la habitual en este tipo de acuíferos, las reservas totales del acuífero serían de 9 y 15 hm^3 respectivamente. Aunque todas estas estimaciones de reservas y de recarga de agua son preliminares, se puede comprobar que los tiempos de renovación del acuífero (volumen de reservas/recarga media anual) son muy bajos (1,4 a 7 años), por lo que estamos ante un sistema acuífero muy vulnerable a la explotación y que debe ser gestionado con especial atención. Todas las labores de control y seguimiento que se pretenden llevar a cabo en la zona de estudio van a ser claves para demostrar científicamente la eficiencia hidrológica de estos sistemas ancestrales de manejo del agua. Estos métodos de recarga de acuíferos, que han perdurado hasta la actualidad en un entorno agrícola modernizado, demuestran su resiliencia destacando su compromiso con el uso de materiales locales y la preservación del empleo rural, en una comarca caracterizada por altas tasas de desempleo y despoblación.

CONCLUSIONES

El uso de las zayas en la región de la Valduerna desempeña un papel crucial al retardar la salida del agua del acuífero, manteniendo el nivel de agua en los pozos y el caudal del río, especialmente en los periodos de estiaje, con alta demanda para riego. Además de satisfacer las necesidades agrícolas, este sistema contribuye de manera significativa a la mejora de otras funciones ecológicas asociadas a la descarga subterránea. Este sistema ancestral de manejo del agua de riego es un ejemplo de Solución Basada en la Naturaleza para la Gestión del Agua y para la recarga de acuíferos, que funciona con la fuerza de la gravedad, con materiales locales, que presta importantes servicios ecosistémicos para la agricultura y para abastecimiento, entre otros, y que contribuye al mantenimiento de la vegetación de ribera y al aumento de la biodiversidad. Su réplica sería extensible a una gran parte de las zonas de riego de la mayoría de las vegas de los grandes ríos peninsulares, dado que estas suelen tener una configuración parecida. Un río principal, del que se deriva el agua hacia unos canales de riego paralelos al río, entre los que se suelen ubicar acuíferos aluviales cuaternarios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se encuadra dentro del proyecto: "Inventario y caracterización de sistemas ancestrales de siembra y cosecha de agua para la adaptación al cambio climático" que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Convocatoria de subvenciones para la realización de proyectos que contribuyan a implementar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2021-2030). Agradecemos la especial ayuda prestada por las Comunidades de Regantes de la zona de la Valduerna, en especial a Alfonso Valderrey Berciano, presidente de la CRR San Salvador de Destriana y a Alfonso Pérez Ferrer, presidente de la CRR de San Esteban de Robledo de la Valduerna.

REFERENCIAS

CHD (2021): *Caracterización geológica e hidrogeológica preliminar de los recursos hídricos del sistema hidrológico de la Valduerna (León). Interfluvio de los Ríos Duerna-Peces*. Informe.79 p.

Jódar, J., Martos-Rosillo, S., Custodio, E., Mateos, L., Cabello, J., Casas, J., Salinas-Bonillo, M.J., Martín Civantos, J.M., González-Ramón, A., Zakaluk, T., Herrera-Lameli, Ch., Urrutia, J. and Lambán, L.J. (2022): The recharge channels of the Sierra Nevada Range (Spain) and the Peruvian Andes as ancient Nature-Based Solutions for the Ecological Transition. *Water* 2022, 14 (19) 3130.

Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J.M., Martínez-Moreno, F.J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A. and Durán, J.J., (2019): The oldest managed aquifer recharge system in Europe: new insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology*. 578: 124047.

TNC y MITECO (2019): *Soluciones Basadas en la Naturaleza para la gestión del Agua en España. Retos y Oportunidades*. 52 p. https://www.miteco.gob.es

Análisis preliminar de la relación río-acuífero en la cuenca alta del río Palancia (Castellón-España) y consideraciones para el establecimiento de caudales ecológicos

Preliminary analysis of the river-aquifer relationship in the upper Palancia River basin (Castellón-Spain) and considerations for establishment of ecological flows

J.A. Domínguez Sánchez[1], J. Grima Olmedo[1], Aránzazu Fidalgo Pelarda[3], Nieves Mondéjar Martín[3], Ana Nieto Arias[3], S. Rosado Piqueras[2], C. Baquedano Estévez[2] y B.J. Ballesteros Navarro[1]

[1] IGME, CSIC. C/ Cirilo Amorós, 42. 46004 Valencia. ja.dominguez@igme.es; j.grima@igme.es; b.ballesteros@igme.es
[2] IGME, CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. s.rosado@igme.es; c.baquedano@igme.es
[3] CHJ. Avda. Blasco Ibáñez, 48. 46010. Valencia. arancha.fidalgo@chj.es; nieves.mondejar@chj.es; ana.nieto@chj.es

Resumen: El tramo del río Palancia en su cuenca alta sufre de forma natural notables pérdidas de caudal. Este hecho, conocido históricamente, propició la construcción de un canal por parte de los agricultores de la zona con el fin de derivar las aguas del río, evitando su infiltración, y que estas pudieran alcanzar el embalse del Regajo, donde son utilizadas para riego. Desde la construcción de este canal, el río Palancia permaneció seco en este trayecto la mayor parte del tiempo. Sin embargo, en 2019 la administración hidrológica exigió mantener un caudal ecológico (CHJ, 2015), por lo que obligó a que parte del agua circulara de nuevo por el río. En este artículo se establece la relación río-acuífero mediante campañas de aforo diferenciales realizadas en periodo de sequía y, en consecuencia, con caudales mínimos y sin apenas influencia de precipitaciones. El análisis hidrogeológico de la zona, además, ha permitido identificar las formaciones geológicas en las que las pérdidas son más acusadas, definiendo así los sectores del cauce con infiltración preferencial. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la dificultad para establecer adecuadamente los caudales ecológicos en este tipo de ríos y la necesidad de realizar estudios detallados y específicos para su correcta determinación.

Palabras clave: aforos diferenciales, relación río-acuífero, caudales ecológicos, río Palancia

Abstract: *The stretch of the Palancia River in its upper basin naturally suffers significant water losses. This fact, historically known, led to the construction of an irrigation canal by local farmers to divert the river's waters, avoiding infiltration and allowing them to reach the Regajo reservoir, where they are used for irrigation. Since the construction of this canal, the Palancia River has remained dry in this stretch most of the time. However, in 2019, the River Basin Authority demanded the definition and implementation of environmental flows (CHJ 2015), which forced part of the water to flow back into the river. This article establishes the river-aquifer relationship through differential flow measurement campaigns, carried out during the dry season and, consequently, based on minimum flows with little influence from precipitation. The hydrogeological analysis of the area has also allowed the identification of geological formations where losses are more pronounced, thus defining the sectors of the channel with preferential infiltration. The results obtained highlight the difficulty in adequately establishing ecological flows in this type of rivers and the need to carry out detailed and specific studies for their correct determination.*

Key words: *differential gauges, river-aquifer relationship, preferential infiltration sections, Palancia River*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El río Palancia, que configura uno de los cursos de agua integrantes de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, transita en su cuenca alta sobre el acuífero de Jérica o Masa de Agua Subterránea 080.125 Jérica (Fig. 1). En el trayecto comprendido entre las localidades de Teresa y Viver (Castellón), de apenas 8,3 km de longitud, el río pierde gran parte o la totalidad de su caudal, según la época. Este hecho provocó que las comunidades de regantes de la zona construyesen en la década de los 60 del siglo pasado un canal de derivación paralelo al río (acequia o canal de Quinchas) que permitió evitar la infiltración de sus aguas, de manera que éstas pudieran alcanzar el embalse del Regajo, donde son reguladas para su aprovechamiento agrícola. En consecuencia, excepto en épocas con precipitaciones elevadas, el cauce quedaba totalmente seco. En el año 2019, el Plan Hidrológico de la Demarcación del Júcar (CHJ, 2015) estableció la obligatoriedad de garantizar un caudal ecológico en este sector del río. No obstante, admitió la derivación de un caudal entre 50 y 60 L/s para la satisfacción de la demanda de algunos usuarios del canal, dejando circular el resto por el lecho natural del cauce. En este contexto, se ha analizado la relación río-acuífero (Ballesteros-Navarro *et al.*, 2019, Murillo, 2016) mediante la realización de aforos diferenciales con el fin de disponer de datos precisos con los que poder establecer el caudal

ecológico más adecuado. Es de resaltar que los aforos coinciden con un periodo seco sin apenas influencia de precipitaciones, lo que implica que los caudales medidos se encuentran dentro del rango de valores mínimos.

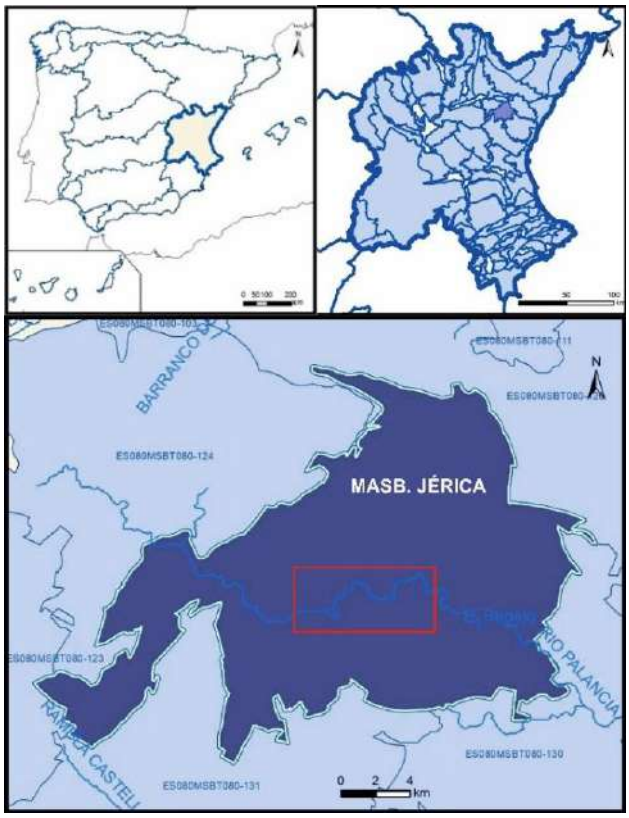


FIGURA 1. *Situación del cauce del río Palancia analizado. MASb 05.125 Jérica. Demarcación Hidrográfica del Júcar*

METODOLOGÍA

El trayecto de río objeto de estudio se ha sectorizado en 7 tramos a partir de 8 secciones o estaciones de aforo. A estas se han añadido otras 3 secciones en el canal de Quinchas. (Fig. 3 y Tabla I).

SECCIÓN DE AFORO	COORD ETRS 89		COTA
	X	Y	m s.n.m.
S-1 Merendero Teresa	699718	4419096	617
S-2 EDAR Teresa	701250	4419151	594
S-3 La Hoz	701250	4419151	577
S-4 Peña Los Pajaritos	701250	4419151	563
S-5 Pocopán-1 (cauce)	701250	4419151	532
S-6 Pocopán-2 (azud)	701250	4419151	530
S-7 Masías del Río	701250	4419151	514
S-8 Azud del Grillo	705267	4419865	504

TABLA I. *Localización de las secciones de aforo*

La instrumentación utilizada ha sido un equipo aforador magnético-inductivo "OTT MF pro" que mide la altura de la lámina de agua y la velocidad del flujo en diferentes puntos. El sistema consta de un sensor ligero y compacto acompañado de un robusto mando portátil con pantalla, en la que se indican los pasos a seguir para la obtención de los datos, cuyos resultados quedan registrados automáticamente.

Aunque está prevista su continuación, se cuenta con la información de 8 campañas llevadas a cabo entre octubre de 2023 y enero de 2024, realizadas con cadencia quincenal, por lo que se dispone de 88 medidas de caudal, de las que 64 corresponden al cauce y 24 al canal de Quinchas. Como se ha comentado, los aforos realizados corresponden a valores mínimos sin influencia de las precipitaciones.

En las primeras campañas se comprueba que el canal sufre importantes pérdidas, hecho ya indicado en estudios previos (CHJ, 2021 y 2023), próximas al 60 %. Esta circunstancia altera sensiblemente los resultados, por lo que, durante las campañas de aforo, se decide cerrar el canal para que toda el agua circule por el lecho fluvial. A partir de este momento, sólo se realizan aforos en las 8 secciones del río, con un total de 32 registros, correspondientes a las últimas 4 campañas. Pese al menor número de datos, los resultados permiten hacer una primera evaluación de la relación río-acuífero de forma detallada en los 7 tramos en los que queda subdividido el cauce (Tablas I, II y III).

SECCIÓN DE AFORO	FECHA	CAUDAL (L/s)	CAUDAL MEDIO	MEDIANA DEL CAUDAL
S-1 Merendero Teresa	11/12/2023	129,50	113,64	116,35
	27/12/2023	117,60		
	09/01/2024	115,10		
	24/01/2024	92,37		
S-2 EDAR Teresa	13/12/2023	111,50	121,33	120,40
	28/12/2023	129,30		
	09/01/2024	133,70		
	24/01/2024	110,80		
S-3 La Hoz	13/12/2023	83,68	85,74	85,73
	28/12/2023	74,89		
	09/01/2024	96,60		
	24/01/2024	87,77		
S-4 Peña Los Pajaritos	13/12/2023	64,14	75,06	75,28
	28/12/2023	82,59		
	09/01/2024	85,52		
	24/01/2024	67,97		
S-5 Pocopán-1	13/12/2023	18,72	29,65	28,97
	28/12/2023	41,92		
	09/01/2024	35,93		
	24/01/2024	22,01		
S-6 Pocopán-2 (azud)	13/12/2023	12,79	18,79	18,04
	28/12/2023	20,12		
	09/01/2024	26,28		
	24/01/2024	15,95		
S-7 Masías del Río	14/12/2023	2,88	3,14	2,87
	28/12/2023	2,35		
	10/01/2024	2,86		
	24/01/2024	4,46		
S-8 Azud del Grillo	14/12/2023	6,19	8,76	7,02
	28/12/2023	7,03		
	10/01/2024	14,81		
	24/01/2024	7,00		

TABLA II. *Secciones de aforo y caudales medidos (diciembre 2023 a enero 2024).*

Paralelamente, se ha analizado la cartografía geológica/hidrogeológica de la zona con el fin de establecer la caracterización cualitativa y cuantitativa de las diferentes formaciones aflorantes en el cauce, y poder relacionarlas con las pérdidas de agua (Fig. 3). Con la combinación de ambos tipos de información, se han definido los tramos con infiltración preferencial y las formaciones geológicas asociadas a ellos.

CAMPAÑAS DE AFORO

Del conjunto de los 32 registros se obtiene un valor máximo de caudal 134 L/s, un mínimo de 2,35 L/s y una media y mediana de 53,03 L/s y 57,01 L/s, respectivamente, tal y como refleja el diagrama de caja de las medidas de caudal (Fig. 2 y Tabla II). Los valores, representados por puntos en cada gráfico, muestran una dispersión elevada, por lo que la media no es representativa de la tendencia central del conjunto de datos. En consecuencia, para su análisis se opta por utilizar la mediana como valor más representativo (Tablas II y III).

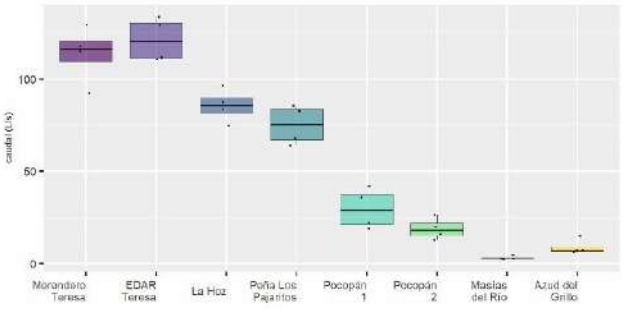


FIGURA 2. *Diagrama de caja de las medianas del caudal en las secciones de aforo en la cuenca alta del río Palancia*

En la sección S-1 (Merendero Teresa), situada aguas arriba del azud del canal de derivación, la mediana es de 116,35 L/s, caudal que pasa a incrementarse ligeramente en la sección S-2 (EDAR Teresa) hasta los 120,40 L/s (Tablas II y III). A partir de aquí, el agua circulante por el río disminuye progresivamente, siendo de 85,73 L/s en la sección S-3 (La Hoz), de 75,28 L/s en la S-4 (Peña Pajaritos), de 28,97 L/s en la S-5 (Pocopán-1) y de 18,04 L/s en la S-6 (Pocopán-2). En consecuencia, entre las secciones S-2 y S-6 el río pierde una media del 97,6 % de su caudal. Más adelante, en el tramo T-6 el río llega a secarse por completo, para recuperar algo de caudal en su parte más baja, es decir, es perdedor inicialmente para convertirse en efluente al final.

Este carácter ganador se mantiene aguas abajo, en el último tramo (T-7), de tal forma que en la sección S-7 (Masías del Río) la mediana de caudal es de 2,87 L/s y en la S-8 (Azud del Grillo) de 7,02 L/s.

CARACTERISTICAS GEOLÓGICAS

El cauce analizado discurre sobre materiales del Jurásico superior y de la base del Cretácico inferior (Fig. 3). En concreto, el tramo T-1, aunque cubierto por depósitos actuales de fondo de valle, transcurre sobre las calizas microcristalinas en capas centimétricas de la Fm. Ritmita calcárea de Loriguilla. Esta formación también configura el lecho del río en los tramos T-2 a T-4, mientras que el tramo T-5 está constituido por las calizas oncolíticas y oolíticas del Kimmeridgiense superior-Portlandiense (Fm. Higueruelas y Pozuel), gracias a la contribución de un cierre periclinar asociado a una fractura subparalela a la dirección del río.

Finalmente, en los tramos T-6 y T-7, salvo en los metros iniciales del primero, el cauce discurre a través de sedimentos aluviales cuaternarios dispuestos sobre los materiales predominantemente arcillosos de la facies Pürbeck en tránsito hacia el Cretácico en facies Weald.

CONCLUSIONES

A partir de campañas de aforos diferenciales se ha establecido la relación del río Palancia en su cuenca alta con el acuífero sobre el que transita (Masb 08.125 Jérica), permitiendo caracterizar y cuantificar, en términos absolutos y porcentuales, el comportamiento de dicha relación de forma sectorizada. Los resultados indican que, si bien en conjunto el río pierde progresivamente caudal, no lo hace en todo el trayecto analizado, sino que es ligeramente efluente en los tramos T-1 y T-7, así como en la parte final del T-6.
Los datos reflejan, además, que tampoco la infiltración se produce con la misma intensidad a lo largo de todo el cauce.

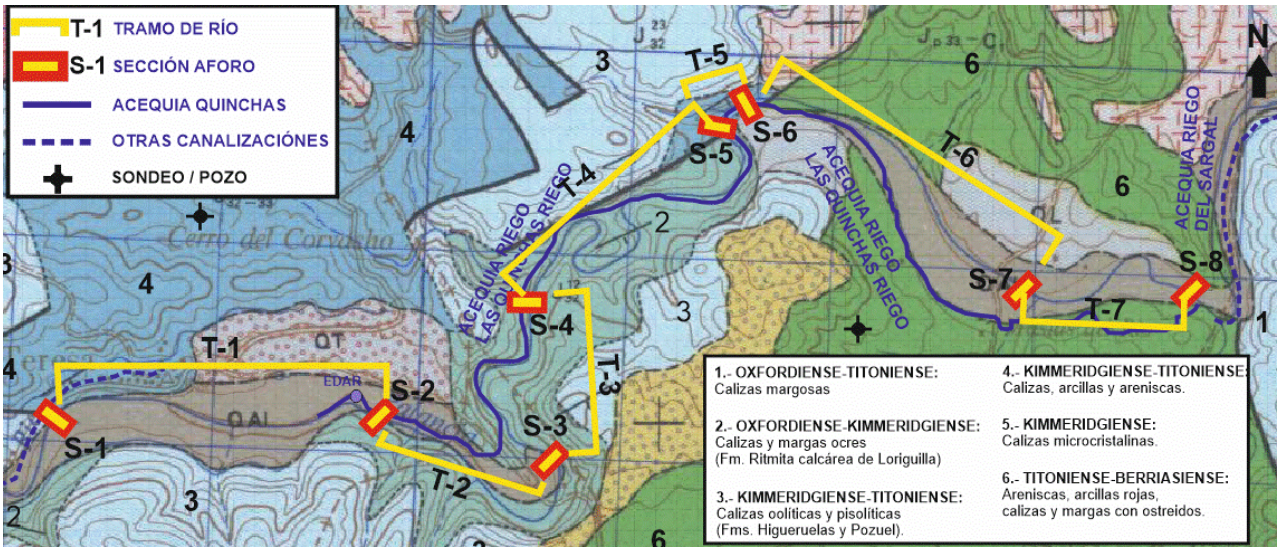


FIGURA 3. *Secciones de aforo, tramos de río y formaciones geológicas aflorantes*

En el sentido aludido, el tramo T-4 es el que porcentualmente registra una mayor pérdida de caudal, con el 38 %. No obstante, es el de mayor longitud, con 2,52 km, lo que representa que la ratio de infiltración es de sólo 0,018 L/s/m.

También se produce una alta tasa de infiltración en el tramo T-2, con una pérdida del 29 % del caudal. Al tener una longitud de casi 1,5 km, implica una ratio de infiltración de 0,024 L/s/m.

Como conclusión final, se incide en el hecho de que es necesaria la realización de estudios específicos que permitan conocer con precisión el comportamiento hidrológico de este tipo de cursos de agua, a partir de los cuales se aborde el establecimiento de caudales ecológicos debidamente respaldados por una sólida base científica.

Identificador	Longitud (m)	Q (L/s)			% (*)	Ratio (L/s/m)	Fm. Geológica
		Inicio del tramo	Final del tramo	Diferencia			
T-1	1730	116,35	120,4	4,05	3	$0,2*10^{-2}$	Loriguilla
T-2	1470	120,4	85,73	-34,67	-29	$-2,4*10^{-2}$	
T-3	1050	85,73	75,28	-10,45	-9	$-1,0*10^{-2}$	
T-4	2520	75,28	28,97	-46,31	-38	$-1,8*10^{-2}$	
T-5	95	28,97	18,04	-10,93	-9	$-11,5*10^{-2}$	Higueruelas
T-6	1840	18,04	2,87	-15,17	-13	$-0,8*10^{-2}$	Higu.-Pürb.
T-7	1050	2,87	7,02	4,15	3	$0,4*10^{-2}$	F. Pürbeck
* Ganancias / pérdidas respecto al caudal máximo (Q máx=120.4 L/s)							

TABLA III. *Caracterización de la relación río-acuífero en los diferentes tramos analizados*

El siguiente tramo con una pérdida de caudal porcentual más elevada es el T-6, con un 13%, lo que para sus 1,84 km de longitud supone una ratio de infiltración de 0,008 L/s/m. Si bien, como ya se ha indicado, éste tiene doble carácter, influente en su inicio y efluente en su parte final.

Sin embargo, la pérdida de caudal se verifica con una mayor intensidad en el tramo T-5, donde en tan sólo 95 m el río pierde cerca de 11 L/s, porcentualmente solo representa el 9% del caudal máximo estimado (120,4 L/s), pero su ratio de infiltración es de 0,115 L/s/m, muy por encima de los demás.

Se puede concluir que los tramos perdedores se sitúan sobre los afloramientos de la Fm. Ritmita calcárea de Loriguilla (T-2 a T-4) y, especialmente, en el contacto de ésta con la Fm. Higueruelas y Pozuel (T-5), donde su elevada permeabilidad, combinada con la presencia de una zona de fractura, permite alcanzar una ratio de infiltración de 0,115 L/s/m.

Los resultados han puesto de manifiesto la dificultad de establecer caudales ecológicos en ríos perdedores o influentes. En este caso se detecta, incluso, la existencia de tramos ganadores dentro de un comportamiento general del río como perdedor, lo cual dificulta aún más el dimensionamiento del caudal más ajustado a las exigencias medioambientales. Esto último es esencial, ya que su inadecuada determinación puede causar perjuicios relevantes y pérdidas económicas significativas a los usuarios, existentes o potenciales, sin que se consigan los objetivos perseguidos. Hay que tener muy en cuenta que la pérdida de agua de forma natural en los ríos es un hecho frecuente, especialmente visible en las cuencas mediterráneas, debido al afloramiento de formaciones geológicas permeables en su cauce y al característico clima de estas regiones con prolongados periodos sin precipitaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos que han permitido la elaboración de este artículo se enmarcan dentro del Convenio de Colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Júcar y el Instituto Geológico y Minero de España-CSIC.

REFERENCIAS

Ballesteros-Navarro, B.J., Díaz-Losada, E., Domínguez-Sánchez, J.A. and Grima-Olmedo, J. (2019): Methodological proposal for conceptualization and classification of interactions between groundwater and surface water. *Water Policy*, 21 (3): 623–642. doi: https://doi.org/10.2166/wp.2019.091

CHJ (2015): Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de Planificación Hidrológica 2015-2021.

CHJ (2021): *Situación del río Palancia y los usos asociados tras el cambio en la gestión del Canal de Sagunto entre los términos municipales de Teresa y Viver (mayo 2019-marzo 2021).*

CHJ (2023): *Informe de seguimiento del río Palancia entre Teresa y Viver.*

Murillo J. M., (ed.) (2016): *Ríos Y Acuíferos. Interrelación Entre Aguas Superficiales Y Subterráneas (Rivers and Aquifers. Relationship Between Groundwater and Surface Water)*. Instituto Geológico y Minero de España – Dirección General del Agua, Madrid, Spain, 825 p.

Contaminantes emergentes en el agua subterránea de la isla de El Hierro: evaluación, impacto y medidas de prevención

Emerging pollutants in groundwater of El Hierro island: assessment, impact, and prevention measures

S. Gasco Cavero[1,2], N. Cruz-Pérez[3], L.F. Martín Rodríguez[4], C. Laspidou[5], A. Contreras-Llin[6], G. Quintana[6], M.S. Díaz-Cruz[6], J.C. Santamarta[3] y A. García Gil[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España. gascocs@madrid.es; a.garcia@igme.es
2 Departamento de Salud de Madrid, Ayuntamiento de Madrid, España. gascocs@madrid.es
3 Departamento de Ingeniería Agraria y Ambiental. Universidad de La Laguna, Tenerife (Islas Canarias), España. ncruzper@ull.edu.es; jcsanta@ull.edu.es
4 Consejo Insular de Aguas de El Hierro (CIAEH)/Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España. luifer.martin@ulpgc.es
5 Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Tesalia, Volos, Grecia. laspidou@uth.gr
6 Departamento de Química Ambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), C/Jordi Girona 18-26, E-08034 Barcelona, España. albert.contreras@idaea.csic.es; gerard.quintanalopez@idaea.csic.es; silvia.diaz@cid.csic.es

Palabras clave: contaminantes emergentes; agua subterránea; acuíferos volcánicos; El Hierro.

Resumen

Los contaminantes emergentes (CEs) en aguas residuales, previamente no estudiados o reconocidos recientemente, plantean desafíos regulatorios. Áreas que dependen de aguas subterráneas, como El Hierro (Islas Canarias), enfrentan riesgos de contaminación. La cromatografía líquida de alta resolución acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS) detectó 70 CEs, destacando la ausencia de pesticidas pero niveles variados de filtros UV, estabilizadores/bloqueadores UV y compuestos farmacéuticamente activos (PhACs), particularmente en La Frontera. Los piezómetros y pozos mostraron altas concentraciones. Sorprendentemente, los niveles de ácido salicílico y cafeína fueron notablemente altos a pesar de la degradación esperada. La flumequina mostró diferencias significativas en la concentración entre zonas de la isla investigada. Las concentraciones de la mayoría de los CEs correlacionaron con la profundidad, contrario a las expectativas. El análisis clúster planteado agrupó puntos de muestreo, distinguiendo La Frontera como zona diferenciada. En general, la isla de El Hierro mostró concentraciones de CEs más bajas que otros estudios globales, do es especialmente reseñable la ausencia de pesticidas, lo que sugiere buenas prácticas agrícolas. Es crucial prevenir la entrada de CEs al ciclo del agua, comenzando desde los hogares, la agricultura y la industria para mantener el estado prístino de El Hierro. Estos hallazgos proporcionan información de interés para otros archipiélagos volcánicos oceánicos.

Abstract

Emerging pollutants (EPs) in wastewater, previously unstudied or recently recognized, pose regulatory challenges. Areas relying on groundwater, like El Hierro (Canary Islands), face contamination risks. High-performance liquid chromatography-mass spectrometry (HPLC-MS) detected 70 EPs, notably absence of pesticides but varied levels of UV filters, UV stabilizers/blockers, and pharmaceutically active compounds (PhACs), particularly in La Frontera. Piezometers and wells showed high concentrations. Surprisingly, salicylic acid and caffeine levels were notable despite expected degradation. Further research is needed. Flumequine showed significant differences in concentration between areas. Concentration levels of most EPs correlated with depth, contrary to expectations. Cluster analysis grouped sampling points, distinguishing La Frontera. El Hierro generally showed lower EP concentrations than global studies, notably lacking pesticides, suggesting good agricultural practices. It's crucial to prevent EPs from entering the water cycle, starting from homes, agriculture, and industry to maintain El Hierro's pristine state. These findings provide insights applicable to similar regions.

Aplicación de métodos geofísicos para la localización de acuíferos y estructuras hidráulicas subterráneas

Application of geophysical methods for the location of aquifers and underground hydraulic structures

A. González-Cantero[1] y C. Gata-Maya[1]

1: Gama Geofísica S.L., Las Rozas 28232 (Madrid). agonzalez@gama-geofisica.com, cgata@gama-geofisica.com

Palabras clave: Acuíferos, detección de pozos y galerías, georradar GPR y tomografía eléctrica.

Resumen

Los métodos geofísicos en corriente continua son técnicas de amplio desarrollo para la localización de zonas acuíferas de forma indirecta, es decir, no detectan la presencia de agua, sino que permiten la localización y definición de litologías o estructuras geológicas que puedan albergar agua. En relación con el aprovechamiento de estos acuíferos, a veces existen estructuras antrópicas abandonadas o que hayan caído en el olvido como pueden ser pozos de agua, galerías, aljibes, etc. La combinación de la tomografía eléctrica 2D, con sus diferentes posibilidades de adquisición, procesado e inversión de datos, con la técnica electromagnética GPR (Ground Penetrating Radar) nos permite resolver con alta resolución estas problemáticas.

En el presente trabajo se ilustran las posibilidades y resultados obtenidos con diferentes dispositivos de medida, separaciones entre electrodos y parámetros de inversión de la tomografía eléctrica 2D para la investigación de acuíferos en diferentes ambientes geológicos. También se muestran los resultados de diferentes estudios de georradar GPR y tomografía eléctrica 2D que, en la búsqueda de las mencionadas estructuras hidráulicas subterráneas, fueron capaces de detectar de manera inequívoca la existencia de pozos colmatados, aljibes desaparecidos o antiguas galerías olvidadas.

Abstract

Geoelectrical methods are widely developed techniques for locating aquifer zones indirectly, that is, they do not detect the presence of water, but rather allow the location and definition of lithology or geological structures that may contain water. In relation to the use of these aquifers, sometimes there are abandoned or forgotten anthropogenic structures such as water wells, galleries, cisterns, etc. The combination of 2D electrical resistivity tomography (ERT), with its different possibilities for data acquisition, processing and inversion, with the Ground Penetrating Radar (GPR) technique allows us to solve these problems with high resolution.

This work illustrates the possibilities and results obtained with different measurement arrays, separations between electrodes and inversion parameters of 2D ERT for the investigation of aquifers in different geological environments. The results of different GPR and 2D ERT studies are also presented which, in the search for the underground hydraulic structures, were able to unequivocally detect the existence of clogged wells, missing cisterns or ancient forgotten galleries.

Instrumentación de acequias y cauces en la Garganta de San Gregorio (Aldeanueva de la Vera, Cáceres) para el análisis de la infiltración y circulación del agua subterránea en acuíferos de ladera.

Instrumentation of *acequias* and watercourses in Garganta de San Gregorio (Aldeanueva de la Vera, Cáceres) for the analysis of groundwater infiltration and circulation in slope aquifers.

A. González-Ramón[1], A. Fernández-Ayuso[2], H. Aguilera[3], C. Marín[3], A. De la Losa[3] y S. Martos-Rosillo[1]

1 Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf.. Zulema bajo. 18006 Granada. Instituto Geológico y Minero de España-CSIC. antonio.gonzalez@igme.es; s.martos@igme.es
2 Departamento de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Módulo 06-406. Universidad Autónoma de Madrid - Campus de Cantoblanco. 28049 (Madrid). ana.fernadeza@uam.es
3 Ríos Rosas, 23. Madrid. Instituto Geológico y Minero de España-CSIC. h.aguilera@igme.es; c.marin@igme.es; a.delalosa@igme.es

Palabras clave: acequias, hidrogramas, infiltración, siembra y cosecha de agua, Sierra de Gredos

Resumen

El sistema de acequias estudiadas en este trabajo se encuentra en la Sierra de Gredos (Cáceres). Localmente se conocen como pesqueras, y su función es derivar el agua en la cabecera del río para infiltrarla en las laderas y alimentar el acuífero subyacente, constituido por arenas y arcillas de alteración de los granitos (lhem). El objetivo de la derivación de aguas y su infiltración es retrasar su salida de la cuenca, y de esta forma, alimentar manantiales y surgencias difusas aguas abajo. Con esto se logra una sustancial mejora de la regulación sin necesidad de la construcción de grandes obras hidráulicas, por lo que puede considerarse como Soluciones basada en la Naturaleza para la gestión de aguas (SbNGA), incluidas dentro de los sistemas denominados Siembra y Cosecha del Agua (SyCA). La investigación del funcionamiento y la eficacia de la red de acequias se realizado mediante la instalación de sensores para el control del caudal derivado y de un sensor en el río que mide, además, la conductividad eléctrica. Mediante estas formas de manejo del agua, se consigue mejorar la salud ambiental de las laderas, favoreciendo la biodiversidad, a la vez que permiten tener disponibilidad de agua en la cuenca durante el estiaje. Aquí se presentan y discuten los primeros resultados recogidos y analizados.

Abstract

The system of *acequias* studied in the present work is in the Sierra de Gredos (Cáceres). Locally they are known as *pesqueras*, and their function is to divert water at the headwaters of the river to infiltrate the slopes and feed the underlying aquifer, consisting of granite alteration sands and clays (lhem). The objective of water diversion and infiltration is to delay its exit from the basin, and thus feed springs and diffuse emergences downstream. This achieves a substantial improvement in regulation without the need for the construction of large hydraulic works, so it can be considered as Nature-based Solutions for Water Management (SbNGA), included in the systems called Water Seeding and Harvesting (SyCA). Research into the operation and efficiency of the network of irrigation ditches was carried out through the installation of sensors to control the flow derived and a sensor in the river that also measures the electrical conductivity. By means of these forms of water management, the environmental health of the slopes is improved, favoring biodiversity, and at the same time allowing the availability of water in the basin during low water levels. Here we present and discusses the first results collected and analyzed.

Agradecimientos
Actividad realizada en el marco del Proyecto PID2022-140092OB-I00

Evolución hidroquímica de las aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar

Hydrochemical evolution of groundwater in the Júcar River Basin District

J. Grima Olmedo[1], B.J. Ballesteros Navarro[1], J.A. Domínguez Sánchez[1]

1 CN IGME-CSIC. C/ Cirilo Amorós, 42. 46004 Valencia. j.grima@igme.es; b.ballesteros@igme.es; ja.dominguez@igme.es

Resumen: Se analiza la evolución de la concentración del cloruro, nitrato y sulfato en las aguas subterráneas de la Demarcación Hidrográfica del Júcar con el fin de establecer valores umbral y objetivos de remediación, de conformidad con el artículo 8 de la Directiva Marco del Agua. En la distribución observada, la separación de las componentes de concentraciones debidas, por una parte, a procesos naturales y, por otra a las ocasionadas por influencias antrópicas, se realiza por medio de la obtención de los Niveles Naturales de Fondo (VNF) de las especies químicas determinadas. Además, se establece una comparativa entre estas sustancias y la forma de definir los estándares de calidad para cada una de ellas, destacando la importancia de los indicadores ambientales con el fin de obtener una visión completa de su evolución y de la efectividad de los programas de medidas implementados.

Palabras clave: niveles naturales de fondo, valores umbral, cloruros, nitratos, sulfatos

Abstract: *The evolution of chloride, nitrate, and sulphate concentrations in groundwater of the Jucar River Authority is analysed to establish threshold values and remediation objectives, in accordance with Article 8 of the Water Framework Directive. The separation of the components due to natural processes on the one hand and those due to anthropic influences on the other in the observed distribution of concentrations in groundwater is carried out by means of the Natural Background Levels (NBL) of the determined chemical species. In addition, a general comparison is presented between these substances and the way to determine the quality standards for each of them, highlighting the importance of environmental indicators to obtain a complete vision of their evolution and the effectiveness of the implemented measures programs.*

Key words: *Natural Background Levels, threshold values, chlorides, nitrates, sulphates*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El presente estudio se ha realizado en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Localizada al este de la península ibérica (Fig. 1), abarca 42.756,41 km^2 y se extiende por cinco Comunidades Autónomas (Aragón, Castilla-La Mancha, Cataluña, Comunidad Valenciana y Región de Murcia), de las que la Comunidad Valenciana representa cerca del 50% de su extensión total (Real Decreto 35/2023).

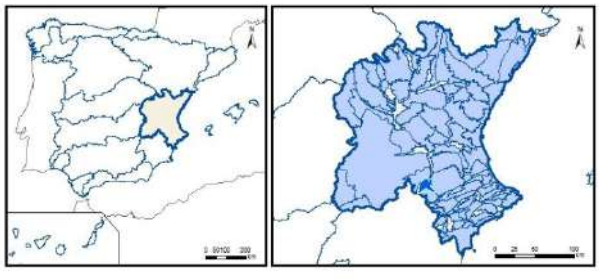


FIGURA 1. *Localización de la Demarcación Hidrográfica del Júcar*

La información analizada, referente a la concentración del nitrato, cloruro y sulfato en las aguas subterráneas se ha extraído de la página web de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2023). El acceso se realiza a través del Sistema de Información del Agua de la CHJ. Para la realización de este estudio se han utilizado las 769 estaciones de muestreo de la CHJ (Fig. 2).

Los datos se han tratado mediante el entorno de programación R (R Core Team, 2023), a partir del cual se obtuvieron los parámetros estadísticos del conjunto de variables químicas, la distribución estadística de las variables analizadas y las gráficas de probabilidad correspondientes.

La determinación de los valores naturales de fondo (VNF) de una sustancia es importante, dado que un agua subterránea que contenga de forma natural elevadas concentraciones de un determinado elemento químico no debe ser clasificada en mal estado únicamente por esta razón (Dahlstrom y Müller, 2006).

Por tanto, estos valores juegan un papel determinante, dado que son los puntos de partida para la definición de los valores umbral. Hay que indicar que, en general, no se establecen para sustancias con origen exclusivamente antrópico.

Los intervalos de confianza de percentiles son una forma de estimar el valor de un parámetro desconocido de una población a partir de una muestra. Cuando la distribución de la población es desconocida o no se ajusta a ninguna distribución paramétrica, se pueden usar métodos no paramétricos para construir dichos intervalos de confianza.

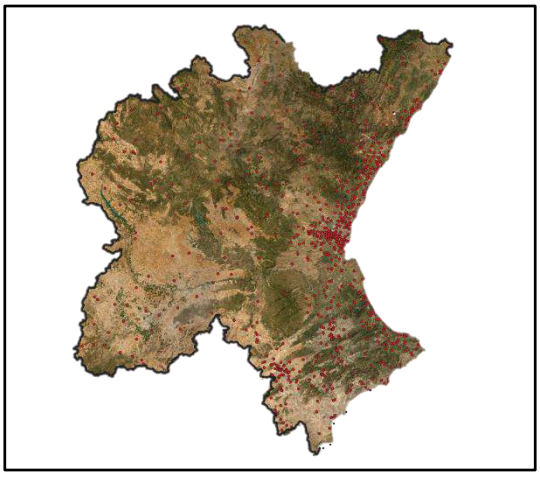


FIGURA 2. *Red de control de calidad de la Confederación Hidrográfica del Júcar*

DETERMINACIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD

Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, el último informe correspondiente al cuatrienio 2016-2019 indica que el 30% de las masas de agua subterránea en España presenta concentraciones medias de nitratos superiores a 50 mg/l, lo que implica superar el umbral establecido por la Directiva 91/676/CEE.

Por ello, en muchas situaciones es difícil disponer de mediciones libres de influencia antrópica. Sin embargo, en estos casos, es posible caracterizar con un 95% de confianza el valor de fondo mediante las cotas superior e inferior de la mediana. (Grima *et al*., 2023a).

Se dispone de 5.110 registros de contenido de NO_3 con un valor máximo de 550 mg/L, un mínimo de cero (<0,5) mg/L y una media y mediana de 45,57 y 26,10 mg/L, respectivamente (Tabla I).

Conc	Longitud	Media	Mediana
<=10	1.613	4,25	4
>10	3.497	64,63	45
Total	5.110	45,57	26,10

TABLA I. *Estadísticos principales del contenido en nitrato de las aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (mg/L)*

El análisis estadístico muestra que los valores se alejan de la normalidad, lo que implica la necesidad de utilizar técnicas no paramétricas para la obtención de los intervalos de confianza de los estadísticos de interés o sus percentiles.

Para caracterizar el VNF se ha seleccionado un total de 1.613 observaciones con concentración inferior o igual a 10 mg/L (Tabla I y Fig. 3). La elección de este límite se basa en datos históricos, estadísticos, normativos y de referencia (Giuliano Albo y Blarasin, 2014).

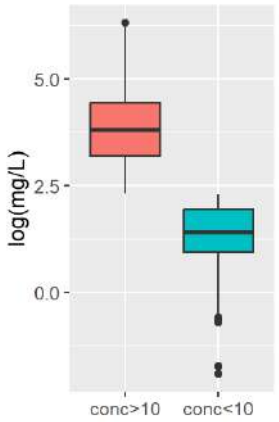


FIGURA 3. Boxplot log(concentración) de nitratos (mg/L)

En la evolución anual de las medianas para dicho conjunto de valores se produce un fuerte aumento entre los años 2013 y 2018, para descender posteriormente y permanecer estabilizado en los últimos años (Fig. 4).

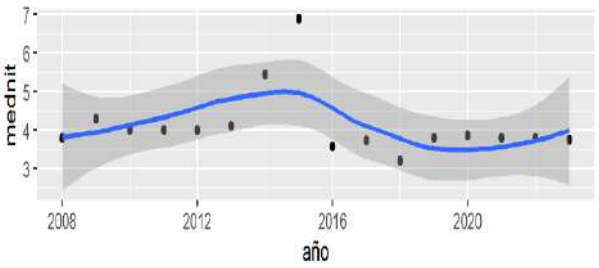


FIGURA 4. Evolución anual de medianas del contenido en nitrato (mg/L)

El estadístico característico del VNF es el percentil 50 (4 mg/L), mientras que su rango de variación viene definido por los percentiles 2,3% y 97,7%, respectivamente (Manzano *et al*., 2004), que define el rango 0,0-9,9 mg/L. En el caso del fondo modificado por actividades antrópicas el rango de variación es 11,3-217,84 mg/L.

El intervalo de confianza del percentil 97,7 (95% confianza) obtenido en ambos casos por métodos basados en la distribución binomial es de 9,8-10 mg/L para concentraciones inferiores a 10 mg/L y 205-239 mg/L para concentraciones superiores (Tabla II).

Conc	Percentil 97,7	Cota inf 95%	Cota sup 95%
<=10	9,9	9,8	10
>10	217,18	205	239

TABLA II. *Percentiles e intervalos de confianza del contenido en nitrato de las aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (mg/L)*

En relación con el sulfato, existen 4.230 registros (Tabla III) con un valor máximo de 4.400 mg/L, un mínimo de 0 (<10) mg/L, y una media y mediana de 195,69 y 111 mg/L, respectivamente).

El análisis estadístico proporciona evidencias para rechazar la hipótesis de normalidad, lo que, al igual que en el caso del nitrato, implica la necesidad de utilizar técnicas no paramétricas para la obtención de los intervalos de confianza de los estadísticos de interés o sus percentiles

Longitud	Media	Mediana	3rd Qu
4.230	195,69	111	267

TABLA III. *Estadísticos principales del contenido en sulfato de las aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (mg/L)*

De acuerdo con Sharma y Kumar (2020), el contenido de sulfato en masas de agua subterránea varía entre 1 y 2.000 mg/L, en fu0nción de la topografía y condiciones geológicas, Por tanto, en una primera aproximación, parece lógico eliminar concentraciones superiores a este límite (Tabla IV).

Conc	Percentil 97,7	Cota inf 95%	Cota sup 95%
<=2.000	769	720	849
>2.000	4.271	4.000	NA

TABLA IV. *Estadísticos principales del contenido en sulfato de las aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (mg/L)*

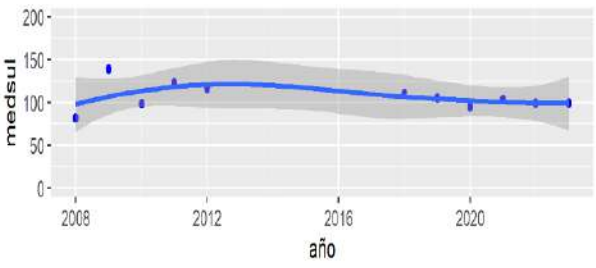


FIGURA 5. *Evolución anual de medianas del contenido en sulfato*

La evolución anual de las medianas para dicho conjunto de valores muestra una ligera tendencia al aumento en los primeros años, para estabilizarse a continuación cerca de los actuales 100 mg/L (Fig. 5).

Por último, en cuanto al cloruro, se dispone de 4.232 registros, con un valor máximo de 136.000 mg/L, un mínimo de cero (<2) mg/L, y una media y mediana de 199,6 y 45 mg/L, respectivamente.

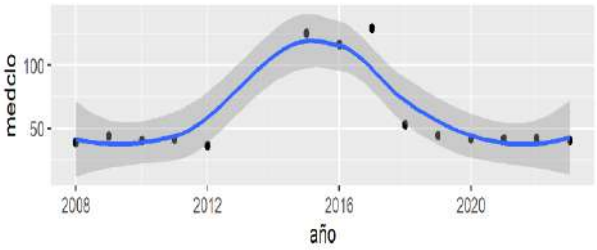


FIGURA 6. *Evolución anual de medianas de cloruro*

En la figura 6 se muestra la evolución anual de las medianas para el conjunto de valores de concentración de cloruros. Se aprecia un periodo, entre 2008 y 2012, con valores prácticamente estabilizados por debajo de los 50 mg/L. A continuación, entre 2012 y 2015 se produce un fuerte aumento hasta superar los 100 mg/L. Finalmente, desde 2015 hasta la actualidad, se observa un descenso hasta los 50 mg/L actuales.

Al igual que en los casos anteriores, los percentiles 2,3 y 97,7 definen la concentración característica del cloruro, con un rango de variación entre 3,9 y 808 mg/L.

Para el intervalo de confianza del percentil 97,7 se obtiene una cota superior de 920 mg/L con el 95% de confianza. Este valor es claramente superior al que se puede dar en acuíferos no litorales, de lo que se deduce la necesidad de utilizar factores diferenciales para las masas de agua subterránea, tales como la litología y la distancia a la línea de costa, entre otros (Pulido-Velázquez *et al*., 2022), con objeto de limitar la incertidumbre asociada a su análisis.

Abundando en esta cuestión, en Grima *et al.* (2023b) se aborda la incertidumbre debida a la variabilidad de concentraciones de cloruros en acuíferos costeros litorales (Fig. 7) mediante la aplicación de diferentes métodos estadísticos combinados con el índice de intrusión SITE (Ballesteros *et al*., 2016).

Uno de los principales resultados de la investigación ha sido la obtención de un VNF del contenido en cloruros entre 115 y 261 mg/L. Hay que tener en cuenta que la totalidad de los acuíferos analizados en este artículo son planas litorales con litologías y características geológicas e hidrogeológicas similares, aunque con diferente grado de intrusión.

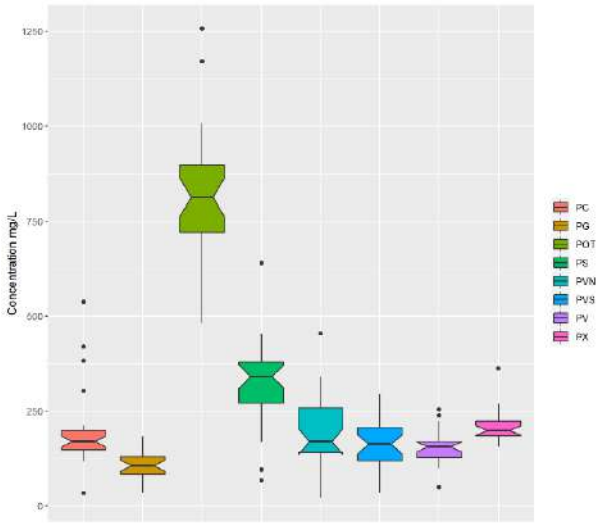


FIGURA 7. *Boxplot de concentraciones de cloruros en Planas Litorales. (Modificado de Grima* et al., *2023b)*

CONCLUSIONES

Mediante el análisis estadístico de los datos de concentración de nitrato, sulfato y cloruro en las aguas subterráneas de la Demarcación Hidrográfica del Júcar se ha constatado un comportamiento diferente de estos compuestos en función de los condicionantes climáticos, geológicos, hidrogeológicos y, en último término, del grado de influencia antrópica al que se encuentran sometidos los sistemas acuíferos.

En el caso del nitrato, el VNF se obtiene a partir de los valores de concentración inferiores a 10 mg/L, mientras que, en el caso del sulfato, se han eliminado los superiores a 2.000 mg/L, calculando a continuación el percentil 90 o 97,7. Por su parte, en el caso del cloruro, su concentración está condicionada de forma significativa por la propia naturaleza de los procesos de la intrusión marina, afectados de forma muy relevante por factores antrópicos. Para su análisis, este hecho obliga a diferenciar entre acuíferos costeros y continentales o de interior. En los primeros es necesario contar con una cuantificación de la influencia de la intrusión, mientras que en los segundos debe considerarse la influencia de otros factores antrópicos.

Finalmente, y a pesar de las limitaciones inherentes a las generalizaciones efectuadas, se puede afirmar que los indicadores propuestos, basados en la elaboración de valores centrales, en concreto las medianas anuales, pueden proporcionar una visión global de la calidad del agua subterránea, así como de su evolución, en amplias zonas territoriales, como es el caso de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

REFERENCIAS

Ballesteros B.J., Morell I., García-Menéndez, O. and Renau-Pruñonosa, A. (2016): A standardized index for assessing seawater intrusion in coastal aquifers: The SITE Index. Water Resources Management, Vol 30: 4513–4527. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1433-4

CHJ (2023). *Sistema de Información del Agua Subterránea en la Confederación Hidrográfica del Júcar*. https://aps.chj.es/siajucar/

Dahlstrom, K. and Müller, D. (2006): D14: Report on National Methodologies for Groundwater Threshold Values. BRIDGE project, Background Criteria for the Identification of Groundwater Thresholds, 6th Framework Programme Contract, 6538

Giuliano Albo, M. J. y Blarasin, M. T. (2014): Hidrogeoquímica y estimación del fondo natural de nitratos del agua subterránea en un agroecosistema del piedemonte de la sierra de Comechingones. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 71(3): 378-392. Retrieved from https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/408

Grima-Olmedo, J., Ballesteros-Navarro, B., Domínguez Sánchez, JA., Pulido-Velázquez, D. y Baena-Ruiz, L. (2023a): Evolución hidroquímica de las aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. En: *XI Simposio del Agua en Andalucía*. Comunicaciones libres

Grima-Olmedo, J., Ballesteros-Navarro, B., Pulido-Velázquez, D., Renau-Pruñonosa, A., Alcalá, F.J., Llopis-Albert, C., Jiménez-Gavilán, P., Milkov-Ivanov, N., Baena-Ruiz, L. and Grima-Olmedo, C. (2023b): A Framework to Assess Natural Chloride Background in Coastal Aquifers Affected by Seawater Intrusion in Eastern Spain. *Water*, 15: 2728

Manzano Arellano, M., Custodio Gimena, E. y Nieto López-Guerrero, P. (2004): El fondo natural del agua subterránea. Definición, establecimiento y papel en la Directiva Marco del Agua. En: *VIII Simposio de Hidrogeología (8º: 2004: Zaragoza).* Madrid: Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Asociación Española de Hidrología Subterránea, 223-237

Pulido-Velázquez, D., Baena-Ruiz, L., Fernandes, J., Arnó, G., Hinsby, K., Voutchkova, D.D., Hansen, B., Retike, I., Bikše, J., Collados-Lara, A.J., Camps, V., Morel, I., Grima-Olmedo, J. and Luque-Espinar, J.A. (2022): Assessment of chloride natural background levels by applying statistical approaches. Analyses of European coastal aquifers in different environments. *Mar Pollut Bull Jan*, 174: 113303

R Core Team (2023): *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria

Real Decreto 35/2023, de 24 de enero, por el que se aprueba la *revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro*.

Sharma, M.K. and Kumar, M. (2020): Sulphate contamination in groundwater and its remediation: an overview. *Environ Monit Assess* 192: 1-10

El modelo de flujo del Sistema Acuífero Multicapa Profundo de Úbeda (SAMPU). La evolución de una herramienta de planificación hídrica.

The flow model of the Úbeda Deep Multilayer Aquifer System (SAMPU). The evolution of a water planning tool.

J. Heredia Díaz[1], A. González-Ramón[2] y V. Cifuentes[3]

1 Hidrogeólogo Retirado. C/Santo Ángel, 81. 28043 Madrid. negrojghd@gmail.com.
2 C.N.Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Urb. Alcázar del Genil, 4.18002 Granada antonio.gonzalez@igme.es.
3 Planificación Hidrológica. Conf. hidrográfica del Guadalquivir. Plaza de España, 41071, Sevilla. vjcifuentes@chguadalquivir.es

Palabras clave: modelo de flujo, sistema acuífero multicapa profundo, Loma de Úbeda

Resumen

El SAMPU se explota para regar el olivar de la Loma de Úbeda (Jaén, España), cuya producción destaca mundialmente. El sistema tiene una geología muy compleja por su estructura multicapa (areniscas y margas triásicas y carbonatos jurásicos), la acción tectónica, que lo compartimenta e interconecta, y que un 60 % se extiende entre los 400 m y 800 m de profundidad. Esta complejidad, y la fuerte explotación desarrollada en los últimos 25 años, dificulta su conocimiento y gestión hídrica. En apoyo a su gestión los autores han desarrollado una serie de modelos de flujo, que fueron incorporando los avances en el conocimiento del sistema y la actualización de los datos de recarga y explotación.

El primer modelo, 2D, fue del acuífero jurásico. El segundo, 3D, incorporó en el modelo geológico los sedimentos triásicos, representando al período 2000/01-2005/06, 208 bombeos, 200 datos espacio-temporales piezométricos, basando su geometría en un modelo estocástico (Heredia *et al.*, 2013). El tercer modelo (Heredia y González-Ramón, 2024) atendió a una revisión geológica profunda (Marín Lechado *et al*., 2017) y representó el período 2000/01-2020/21, 251 bombeos y 1.586 datos espacio-temporales piezométricos. La calibración global se evaluó como “Excelente” acorde al índice de Nash-Sutcliffe y la sectorial comprendió el rango de “Excelente” a “Satisfactorio”.

Abstract

The SAMPU is exploited to irrigate the olive groves of the Loma de Úbeda (Jaén, Spain), whose production stands out worldwide. The system has a very complex geology due to its multilayered structure (Triassic sandstones and marls and Jurassic carbonates), the tectonic action, which compartmentalizes and interconnects it, and that 60% of it extends between 400 m and 800 m deep. This complexity, and the strong exploitation developed in the last 25 years, makes its knowledge and water management difficult. In support of its management, the authors have developed a series of flow models, which have incorporated the advances in the knowledge of the system and the updating of recharge and exploitation data.

The first model, 2D, was of the Jurassic aquifer. The second, 3D, incorporated in the geological model the Triassic sediments, representing the period 2000/01-2005/06, 208 pumpings, 200 spatio-temporal piezometric data, basing its geometry on a stochastic model (Heredia et al., 2013). The third model attended to an in-depth geological review (Marín Lechado et al., 2017) and represented the period 2000/01-2020/21, 251 pumpings and 1,586 piezometric spatio-temporal data. The global calibration was evaluated as "Excellent" according to the Nash-Sutcliffe index and the sectorial one comprised the range from "Excellent" to "Satisfactory".

Referencias

Heredia J., Pardo-Igúzquiza E., y González-Ramón A. (2013). In: *Mathematics of Planet Eath* (Pardo, Guardiola, Heredia, Moreno, Durán, Vargas Eds.). Springer, Heidelberg. 767-770.

Marín-Lechado, C., Pedrera, A., Peláez, J. A., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., & Henares, J. (2017). *Tectonics*, 36(6), 1072-1089.

Dinámica del flujo subterráneo en el túnel de Talave (cuenca del Segura, SE de España)

Groundwater flow dynamics in the Talave Tunnel (Segura basin, SE Spain)

J. Hornero[1] y M. Manzano[2]

1 CN Instituto Geológico y Minero de España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. C/Gran Vía Escultor Salzillo nº 23-25 30007 Murcia. j.hornero@igme.es
2 Departamento de Ingeniería Minera y Civil. Universidad Politécnica de Cartagena. Pº Alfonso XIII 52 30203 Cartagena. m.manzano@upct.es

Palabras clave: Túnel de Talave**,** Filtraciones de agua subterránea, Hidroquímica, Isótopos.

Resumen

El túnel de Talave (TT) es una infraestructura de 32 km de longitud que transporta agua del trasvase Tajo-Segura (TTS). Intersecta varios acuíferos en la transición hidrográfica Júcar-Segura, aunque principalmente el sector E del acuífero Alcadozo (cuenca del Segura). Un primer estudio hidrogeológico (2012-2016) informó sobre la interacción del TT con el acuífero y los rasgos hidroquímicos e isotópicos del agua filtrada a lo largo del túnel. Se cuantificó el volumen total drenado al túnel desde su perforación (1969-1978) y el impacto hidrodinámico en el entorno. Se identificaron las zonas de recarga del agua filtrada, los sectores principales de drenaje al TT (centro y tercio S del TT) y la existencia de una divisoria hidrogeológica con implicaciones en la identificación del origen y la escala del flujo (Hornero et al., 2021). Para verificar y actualizar la interacción TT-acuífero, se han generado nuevos datos en el periodo 2020-2022. Los aforos indican que el caudal filtrado está estabilizado (65-75 L/s). El coeficiente de agotamiento ($\alpha \approx 10^{-4}$) revela una óptima capacidad de regulación. La composición química global a la salida del túnel (10 muestras) muestra homogeneidad temporal, aunque a partir de noviembre de 2021 aumentó la mineralización y la contribución relativa de las descargas centrales. Los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ sugieren que la altitud de recarga preferente se mantiene (1200-1350 m s.n.m.). Los valores de ^{3}H, NO_3 y la relación Cl/Br sugieren la entrada de recarga en tránsito y de aguas recirculadas al túnel.

Abstract

The Talave tunnel (TT), with 32 km length, is an infrastructure used to transfer water from the Júcar to the Segura rivers basins. The TT crosses several aquifers, but mostly the eastern part of the Alcadozo aquifer (Segura basin). A first study (2012-2016) informed on several aspects of the TT-aquifer interaction, providing the hydrochemical and isotopic characteristics of the water inflowing along the tunnel. Total groundwater discharge since the drilling of TT and the piezometric impact on the aquifer were quantified. The preferential recharge areas of the inflowing groundwater, the zones inside the TT where discharge is occurring, and the existence of a hydrogeological divide controlling the groundwater source areas were identified. To update and verify the knowledge, a new study was conducted in the period 2020-2022. The measured outflow from the TT indicates that groundwater discharge is stabilized (65-75 L/s). The depletion coefficient ($\alpha \approx 10^{-4}$) points to a well-regulated aquifer. The chemical composition of groundwater at the TT exit (10 samples) shows temporal homogeneity, though the mineralization increased from November 2021, as well as the relative contribution of the central discharges. The isotopes $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ suggest that the elevation of the preferential recharge zone maintains (1200-1350 m s.n.m.). The ^{3}H, NO_3 and Cl/Br ratio values indicate that water from the unsaturated zone in the massif (recharge in transit) as well as groundwater recirculated are inflowing the tunnel.

Referencias

Hornero, J.; Manzano, M.; Custodio, E. (2021). Deciphering the origin of groundwater inflow into the Talave tunnel (SE Spain. *Science of The Total Environment*. Volume 789, 1 October 2021, 147904. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147904

Salinización de cultivos por riegos con aguas subterráneas en zonas de descarga de flujos regionales

Crop salinization by irrigation with groundwaters from discharge areas of regional flows

P. Huerta[1], E. Rodríguez-Jiménez[1, 2] L. Llera[3] P. Carrasco[4] C. Recio[1] J. Carrasco[4]

1 Dpto. Geología, Universidad de Salamanca, Pza. de la Merced S/N 37008 Salamanca. phuerta@usal.es
2 Confederación Hidrográfica del Duero, Avd/Italia, 1 37007 Salamanca, erj@chd.es
3 Barrio el Palacio, nº 10 Villaviciosa Asturias.
4 Dpto. Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Avd/Hornos Caleros, nº 50 05003 Ávila
retep@usal.es; tgeofisicas@gmail.com.

Palabras clave: salinización**,** flujo regional, cuenca del Duero, Cenozoico, riego.

Resumen

En la llanura aluvial del río Duero, en Tordesillas, en los últimos veranos se están produciendo varios episodios de salinización de pozos que afectan a cultivos. Para intentar detectar el origen de esta salinización se han llevado a cabo estudios hidrogeológicos, hidroquímicos, y geofísicos. La zona de Tordesillas es una de las zonas de descarga del gran sistema acuífero del cenozoico de la cuenca del Duero. Los mapas de isopiezas del acuífero cenozoico y del aluvial indican que existe una componente vertical ascendente del flujo de agua subterránea en la zona. La composición de las aguas en la zona varía dependiendo de la ubicación de los pozos. Las aguas bicarbonatadas cálcicas aparecen en sondeos situados fuera de la llanura aluvial del Duero mientras que las aguas cloruradas sódicas dominan en sondeos situados dentro de esta. Los sondeos electromagnéticos revelan que existen aguas salinas a profundidades de unos 260 m en la zona de Tordesillas aunque asciende lateralmente. Los datos de piezómetros abiertos a profundidades de 98-190 muestran unas variaciones muy acusadas que están asociadas a los bombeos para riegos. Cuando se producen descensos piezométricos importantes a estas profundidades las aguas salinas de las partes más profundas del acuífero cenozoico ascienden y son captadas por los pozos de riego produciendo la pérdida de los cultivos.

Abstract

In the alluvial plain of the Duero River in Tordesillas, several episodes of well salinization affecting crops have occurred in recent summers. To identify the origin of this salinization, hydrogeological, hydrochemical, and geophysical studies have been conducted. The Tordesillas area is one of the discharge zones of the large Cenozoic aquifer system in the Duero basin. Piezometric maps of the Cenozoic and alluvial aquifers indicate a vertical upward component of groundwater flow in the area. The water composition varies depending on the well location. Calcium bicarbonate waters appear in boreholes located outside the Duero alluvial plain, while sodium chloride waters dominate in boreholes located within it. Electromagnetic surveys reveal saline waters at depths of around 260 m in the Tordesillas area, although it rises laterally. Data from piezometers open at depths of 98-190 show pronounced variations associated with irrigation pumping. Significant declines in piezometric levels at these depths cause saline waters from the deeper parts of the Cenozoic aquifer to rise producing wells salinization and crop loss.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los proyectos de investigación: PGC2018-094566-B-C21 y PID2022-14713NB-100 financiados por el MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/ y FEDER “Una manera de hacer Europa”.

Modelización de la altura de la lámina de agua y aplicación de escenarios de cambio climático en la laguna de Santa Olalla (Parque Nacional de Doñana)

Water level modelling and application of climate change scenarios in the Santa Olalla pond (Doñana National Park)

A. Jiménez-Bonilla[1], J. L. Yanes[1], M. Rodríguez-Rodríguez[1], F. Moral[1]

1 Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Ctra. Utrera km 1, 41013 Sevilla.
ajimbon@upo.es, jlyancon@upo.es, mrodrod@upo.es, fmormar@upo.es

Palabras clave: lagunas peridunares, modelización, balances hídricos, Doñana

Resumen

La laguna de Santa Olalla es una laguna permanente localizada en el sistema peridunar de la Reserva Biológica de Doñana. Hasta el año 2022 solamente había registros de desecación completa de la laguna en dos ocasiones: años 1983 y 1995. El aumento de la temperatura media junto con la variación del régimen de precipitaciones ha favorecido que la laguna se seque durante el estiaje de los últimos dos años, 2022 y 2023. El objetivo de este trabajo es realizar una modelización de la altura de la lámina de agua y su validación durante un período de ocho años (de 2015 a 2023). El balance hídrico para la modelización ya se ha validado en trabajos previos (e.g. Jiménez-Bonilla *et al*., 2023) y tiene en cuenta las entradas (precipitación y escorrentía subterránea) y las salidas de agua (evapotranspiración). Una vez calibrado, el modelo se ha empleado para predecir cambios futuros en los niveles de la laguna según las previsiones RCP 4.5 y RPC 8.5 del IPCC para el período 2030-2060. Se ha observado que el hidroperiodo de 2015 a 2023 es el de una laguna casi permanente (93,5% del tiempo inundada). Una vez aplicados los escenarios de cambio climático, se obtiene un hidroperiodo de 89,5% para el RCP 4.5 y de 89% para el RCP 8.5. Además, el escenario RCP 8.5 se caracteriza por la prevalencia de eventos de precipitación extrema y temperaturas medias ligeramente superiores respecto del escenario RCP 4.5. Estos resultados prevén una disminución del hidroperiodo de la laguna de Santa Olalla, pasando de ser una laguna permanente a una laguna estacional.

Abstract

The Santa Olalla pond is a permanent lake located in the peridunal system of the Doñana Biologic Reserve. Until 2022, the lake only dried up two times, in 1983 and in 1995. The increase of the average temperature together with the variation of precipitations favoured that the lake dries during the last two consecutive summers, 2022 and 2023. The aim of this work is to model the water level and to validate the model during an eight-years period (from 2015 to 2023). The water balance, validated in previous works (e.g. Jiménez-Bonilla et al., 2023), includes water inputs (precipitation and subsurface runoff) and water outputs (evapotranspiration). Once the model is calibrated, we applied the model to predict changes on the water level in scenarios RCP 4.5 and 8.5 of the IPCC for the period 2030-2060. We observed that the hydroperiod from 2015 to 2023 is 93.5%. Once the climate change scenarios are applied, we obtained a hydroperiod of 89.5% for the RCP 4.5 and 89% for the RCP 8.5. Moreover, the RCP 8.5 is characterized by the prevalence of extreme precipitation events and average temperatures warmer than RCP 4.5. These results predict that the Santa Olalla pond hydroperiod tends to decrease, changing from a permanent lake to a seasonal lake.

Referencias

Jiménez-Bonilla, A., Rodríguez-Rodríguez, M., Yanes, J.L. and Gázquez, F. (2023). *Science of the Total Environment*, 905, 167183. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167183.

Midiendo la conductividad eléctrica con resolución diaria en goteos de cuevas con volúmenes de agua limitados

Measuring daily resolution electrical conductivity of cave drips having limited water volumes

K. Krklec[1], K. Matan[2], Ž. Zgorelec[2] y D. Domínguez-Villar[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca 37008 Salamanca. kkrklec@usal.es; ddvillar@usal.es
2 Dpto. Ciencias del Suelo, Facultad de Agricultura, Universidad de Zagreb 10000 Zagreb, Croacia. kmatan@agr.hr; zzgorelec@agr.hr

Palabras clave: Hidroquimica, conductividad eléctrica, goteo, espeleotema, Croacia

Resumen

Los registros paleoclimáticos en espeleotemas, generalmente se reconstruyen a partir de estalagmitas alimentadas por goteos muy lentos, lo que implica disponer de un volumen muy limitado de agua para su investigación. Durante el período 2019-2020, en una sala de la Cueva Stara Jametina (Croacia) a 60 m de profundidad, se monitorizó la temperatura, tasa de goteo, y la concentración de CO_2 en el aire de la cueva. Además, mensualmente se midió la hidroquímica del agua de goteo en muestras acumuladas durante el mes. También se desarrolló un método para medir la conductividad eléctrica (CE) en muestras de agua con volúmenes de goteo <2 ml. Después de un procesado de datos, se calculó la CE del agua de goteo con una resolución diaria. La CE también fue medida mensualmente utilizando un sensor portátil que fue calibrado con soluciones estándar antes de cada uso. Dado que no se registraron sesgos en los sensores a lo largo del tiempo, se pudo realizar una correlación entre los datos mensuales y diarios, usada para calibrar la serie de CE diaria y obtener datos precisos de CE del agua de goteo. De este modo, se registraron eventos de alta frecuencia que no podrían haber sido detectados en las campañas de monitoreo mensuales.

Las principales especies químicas que influyen en la CE del agua de goteo son el Ca^{2+} y el carbono inorgánico disuelto, mientras que la precipitación previa de calcita (PCP) es responsable de la marcada variabilidad estacional registrada en la hidroquímica del agua de goteo. Aunque el registro de la CE diaria revela la existencia de eventos poco comunes de alta frecuencia sin relación obvia con ninguno de los parámetros medidos (1% del período estudiado, probablemente relacionado con flujos de agua preferenciales ocasionales), la hidroquímica demuestra que el agua de goteo esta principalmente compuesta por agua vadosa bien mezclada.

Abstract

Long-term paleoclimate records are usually reconstructed from speleothems fed by very slow drips and consequently there is a limited volume of water available for monitoring research. During the period 2019-2020, in a 60 m deep hall within the cave Stara Jametina (Croatia), we monitored temperature, drip rate, concentration of cave air CO_2 and drip water hydrochemistry (samples accumulated during a month), but as well we developed a method to measure electrical conductivity (EC) in drip water samples with a volume <2 ml. Following filtering, we provide daily resolution drip water EC data that was calibrated using information from monthly measurements of aggregated samples taken with portable EC-meter, calibrated with standard solutions before each usage. Since there is consistency in data variability in both datasets, we can make corrections to the continuous dataset, get precise daily drip water EC values, and record high-frequency events that were missed by monthly monitoring campaigns.

The main chemical species influencing the EC of drip water, are Ca^{2+} and dissolved inorganic carbon, while prior calcite precipitation (PCP), is responsible for outstanding seasonal variability of drip water hydrochemistry. Although the high-resolution EC record reveals the existence of uncommon high-frequency events with no obvious relationship to any of the parameters measured (1% of the studied period, probably related to occasional preferential water flows) the hydrochemistry demonstrates that drip water is mostly governed by well mixed vadose water.

Recursos de agua subterránea dulce retenidos por diques en acuíferos volcánicos costeros e insulares: Aprendiendo de la Isla de El Hierro (España)

Dyke-impounded fresh groundwater resources in coastal and island volcanic aquifers: Learning from the El Hierro Island (Spain)

M. A. Marazuela[1,*], C. Baquedano[1], N. Cruz-Pérez[2], J. Martínez-Pérez[1], C. Laspidou[3], J. Jiménez[1], J.C. Santamarta[2], A. García-Gil[1]

1 Geological Survey of Spain (IGME), Spanish National Research Council (CSIC), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, Spain
2 Department of Agricultural and Environmental Engineering, University of La Laguna, Ctra. Geneto 2, 38200 La Laguna, Spain
3 Department of Civil Engineering, University of Thessaly, 38334 Volos, Greece
* Corresponding author. E-mail address: ma.marazuela@igme.es

Palabras clave: Dique volcánico, intrusión salina, acuífero costero, agua potable, modelación numérica.

Resumen

El agua dulce en acuíferos costeros e insulares es un recurso valioso cuya disponibilidad está fuertemente condicionada por la heterogeneidad geológica. Más del 80 % de la superficie terrestre es de origen volcánico, sin embargo, el efecto de los diques volcánicos en la geometría de la interfaz salina que separa el agua dulce del agua de mar aún es poco conocido. Este trabajo analiza el impacto de los diques volcánicos en la profundidad de la interfaz salina en acuíferos costeros e insulares y, subsecuentemente, en la disponibilidad de agua subterránea dulce. Se integraron datos hidrogeológicos e hidroquímicos de una galería que cruza perpendicularmente varias decenas de diques, con modelización numérica 2D en la isla volcánica de El Hierro (Islas Canarias, España). Los niveles hidráulicos medidos demostraron que la presencia de diques aumentó el gradiente hidráulico en más de un orden de magnitud, en comparación con un área adyacente no afectada por diques. La evaluación numérica confirmó que cuanto menor es la conductividad hidráulica de los diques, mayor es la profundidad de la interfaz salina tierra adentro. Este impacto supone un aumento de las reservas de agua subterránea dulce tierra adentro, en relación con un caso hipotético sin diques. Las simulaciones numéricas también demostraron que los diques pueden evitar la salinización de pozos de producción en acuíferos costeros e insulares. Ubicar los pozos de producción lo suficientemente tierra adentro en un área afectada por diques permitió una tasa de extracción de agua dulce más alta que si los diques no existieran. Cerca de la costa, el efecto tendió a ser el contrario. Estos resultados pueden ser clave para mejorar la gestión de los recursos de agua subterránea dulce en acuíferos volcánicos costeros, y especialmente en islas volcánicas como las Islas Hawaianas o Macaronésicas.

Abstract

Freshwater in coastal and island aquifers is a valuable resource whose availability is strongly conditioned by geological heterogeneity. More than 80 % of the Earth's surface is of volcanic origin, but the effect of volcanic dykes on the geometry of the saline interface that separates freshwater from seawater is still underexplored. This study analyses the impact of volcanic dykes on the depth of the saline interface in coastal and island aquifers and, subsequently, on the availability of fresh groundwater. Hydrogeological and hydrochemical data from a gallery, perpendicularly crossing several tens of dykes, were integrated with 2D numerical modelling on the volcanic island of El Hierro (Canary Islands, Spain). Measured hydraulic heads demonstrated that the presence of dykes increased the hydraulic gradient by more than an order of magnitude, with respect to an adjacent area not affected by dykes. Numerical assessment confirmed that the lower the hydraulic conductivity of the dykes, the greater the depth of the saline interface inland. This impact led to fresh groundwater reserves increasing inland, relative to a hypothetical case without dykes. Numerical simulations also demonstrated that dykes can prevent salinization of production wells in coastal and island aquifers. Locating production wells far enough inland in an area affected by dykes allowed a higher freshwater extraction rate than if dykes did not exist. Near the coastline, the effect tended to be the opposite. These results will be key to improving the management of fresh groundwater resources in coastal volcanic aquifers, and especially on volcanic islands such as the Hawaiian Islands or the Macaronesian archipelagos.

Clasificación de aguas minerales mediante técnicas de machine learning: aplicación a aguas envasadas del noroeste de España

Classification of mineral waters using machine learning techniques: application to bottled waters of northwestern Spain

A. L. Marqués Sierra[1]

1 Grupo de modelización matemática (ICTEA). Independencia 13, 33004 Oviedo. Principado de Asturias, Universidad de Oviedo, marquesantonio@uniovi.es

Resumen: El estudio de las aguas minerales se ha enfocado tradicionalmente desde la óptica únicamente hidroquímica, aunque últimamente se han explorado aproximaciones al estudio de ellas en combinación con las técnicas estadísticas multivariante. En este trabajo se trata de esbozar el potencial de las técnicas de machine learning aplicadas al estudio hidroquímico de aguas minerales envasadas en el noroeste peninsular.

Palabras clave: Kohonen, Self-Organising Map, hidroquímica, aguas envadas.

Abstract: *The study of mineral waters has traditionally focused from the hydrochemical perspective only, although lately they have explored approaches to the study of them in conjunction with multivariate statistical techniques. This paper tries to outline the potential of machine learning techniques applied to the hydrochemical study of mineral waters envadas in the peninsular northwest.*

Key words: *Kohonen, Self-Organising Map, hydrochemistry, Bottled water.*

INTRODUCCIÓN

España cuenta con decenas de miles de manantiales y el número de empresas dedicadas al envasado de agua (mineral, de manantial y potabilizada) supera el centenar ampliamente. Diversos trabajos han tratado las características de las aguas minerales en España atendiendo a distribución geográfica o sus características fisicoquímicas con visiones tradiciones de hidroquímica (Gutiérrez et al., 2012).

A nivel europeo, diversos trabajos se centran en el análisis del tópico de las aguas minerales, pero al igual que antes se centran en las clasificaciones hidroquímicas tradicionales (Ko et al., 2019). Sólo algunos trabajos centrados en las aguas minerales portuguesas y polacas exploran el análisis de estas mediante técnicas estadísticas avanzadas (Mann-Kendall, Análisis de componentes principales) (Lourenço et al., 2010).

En este trabajo se explora el potencial de las técnicas de machine learning en los procesos de clasificación de aguas minerales, centrándose en los Self-Organising Map (SOM) de Kohonen como clasificador no supervisado (Kohonen, 1981).

MATERIALES Y MÉTODO

Se ha partido de una base de datos (BD) compuesta por 286 análisis de aguas embotelladas procedentes de 136 manantiales. Esta base de datos ha sido confeccionada partiendo de los análisis que las marcas aportan en el etiquetado. A partir de esta BD se han filtrado los manantiales que se corresponden con la región noroeste de España, formada por las comunidades autónomas de Galicia, Principado de Asturias, Cantabria y el norte de Castilla y León (León, Palencia y Burgos). En total se dispone de análisis de 29 manantiales ubicados en la zona de estudio. Para estos manantiales, tabla 1, se dispone de los datos de aniones y cationes, así como del residuo seco.

Manantial	Provincia
Cabreiroa	Orense
Sousas	Orense
Sousas II	Orense
Fontenova	Orense
Carrizal II	León
Carrizal	León
Virgen del Camino	León
Los Barrancos	León
San Andres II	León
El Teleno	León
Cuevas	Asturias
Borines	Asturias
Fuensanta	Asturias
Ques	Asturias
Ortigosa del Monte	Burgos
Corconte	Burgos
Santolin	Burgos
Celtigos	Lugo
Fontecelta	Lugo
Fontoira	Lugo
Fonxesta	Lugo
Fonteval 2	Pontevedra
Agua Sana	Pontevedra
La Estrella 2	Pontevedra
Corconte	Santander
Fuencaliente	Santander
La Cueva	Palencia
Aquadomuns	Palencia

TABLA 1 – Manantiales del área en estudio

Los mapas autoorganizados o Self-Organising Map (SOM) son un algoritmo de aprendizaje similar a una red neuronal, que fue originalmente propuesto por Kohonen (1981), que ha encontrado un interés creciente en aplicaciones de recursos hídricos como, por ejemplo, clasificación de datos de imágenes satelitales y estimación de precipitaciones y modelización y análisis de procesos de precipitación-escorrentía (Kohonen, 2001). Típicamente, las redes SOM aprenden a agrupar los datos de entrada de alta dimensión en grupos con patrones similares en una red discreta de neuronas de baja dimensión (más comúnmente bidimensional) formado una capa de salida (Kohonen, 2001). Esto se hace de tal manera que las neuronas se encuentren físicamente cerca unas de otras en la salida. Se trata de una clasificación no supervisada, es decir, sólo se proporcionan los datos de entrada a la red en lugar de datos de entrada y salida.

Las principales ventajas del algoritmo SOM es su no linealidad y la capacidad de preservar la estructura topológica de los datos. En general, el algoritmo SOM agrupa las muestras en clases predefinidas (es decir, el número de neuronas es seleccionado a priori) y también ordena las clases en mapas significativos. La estructura típica de un SOM consta de dos capas: una capa de entrada y una capa de Kohonen o de salida (Figura 1).

La capa de entrada contiene una neurona para cada variable del conjunto de datos (HCO^{3-}, Cl^{-}, Ca^{2+}, etc.). Las neuronas de la capa de Kohonen están conectadas a cada neurona en la capa de entrada a través de ponderaciones ajustables o parámetros de red. Estos vectores de peso en la capa de Kohonen dan una representación de la distribución de los vectores de entrada en una forma ordenada.

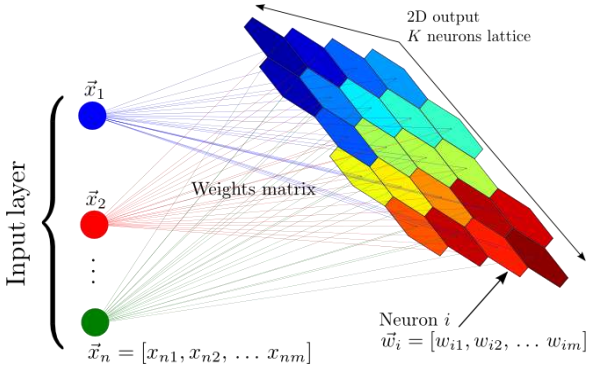


FIGURA 1. Mapa bidemensional del algoritmo SOM (Kohonen, 2001).

El SOM es una red neuronal artificial especialmente adecuada para la exploración de datos orientada para descubrir patrones en grandes conjuntos de datos multidimensionales, como es el caso de los datos hidroquímicos.

HIDROQUÍMICA Y CLASIFICACIÓN SOM

En el diagrama de Piper se observa que la mayoría de las aguas embotelladas de la zona de estudio presentan una facies bicarbonatada cálcica o cálcicomagnesica, un pequeño grupo una facies clorurada cálcica o calcicomagnesica, dos aguas con facies cloruradas sódicas y la facies del resto de aguas es bicarbonatada sódica (Figura 2).

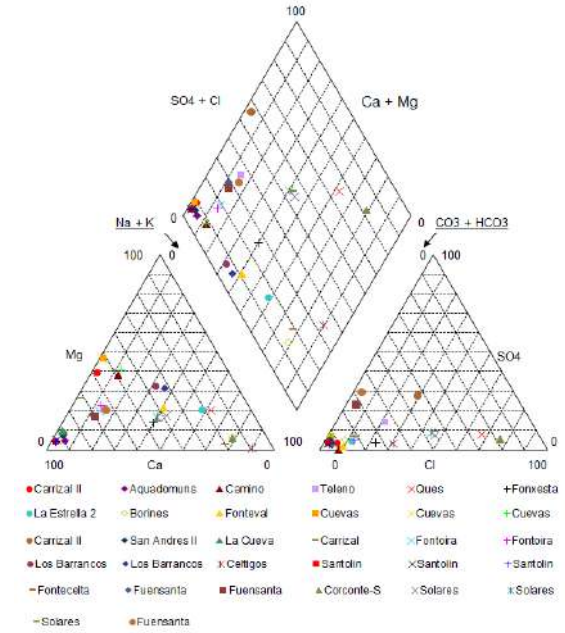


FIGURA 2. Diagrama de Piper.

Para la realización de la red neuronal de Kohonen se ha usado la librería SOM de R. La red se compone de una malla de 3x5 neuronas de salida, con 10000 epoch para asegurar el proceso de aprendizaje y lograr una meseta en los últimos entrenamientos.

En la figura 3 se muestra el resultado de los vectores principales (pesos) que hacen que una determinada agua embotellada se ubique en una determinada neurona.

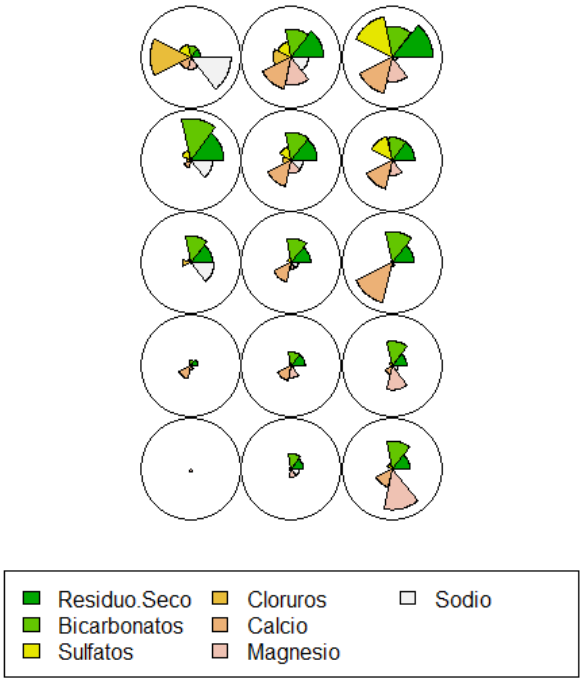


FIGURA 3. Mapa de componentes del SOM para las aguas minerales en estudio.

Una vez que cada muestra esta asignada en una neurona se procede a clasificar mediante un análisis cluster la red neuronal, asignando el corte en cuatro grupos en función de la distancia Ward.

El resultado de esta agrupación se observa en la figura 4, donde cada color representa un grupo. En la neurona 1(verde), que es la que más muestras agrupa, estas se caracterizan por un bajo residuo seco y un muy bajo contenido en aniones y cationes. La neurona 4 (verde) justo encima de la uno, presenta mayores contenidos de residuo seco, pero sigue teniendo los valores bajos de aniones y cationes, aunque son casi el doble de los que presentan las aguas embotelladas de la neurona 1.

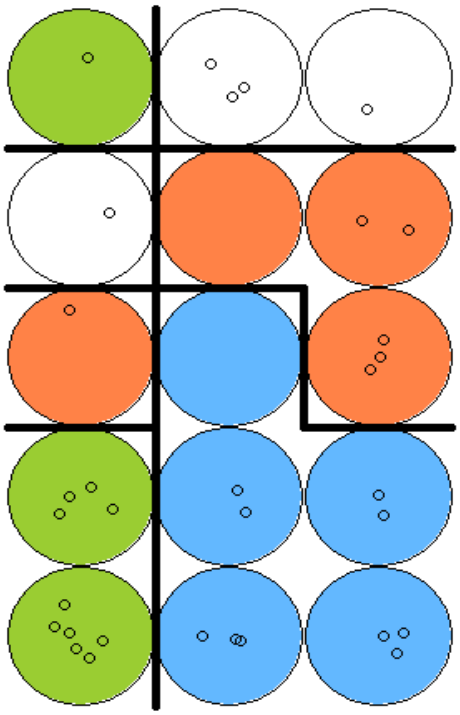


FIGURA 4. Clasificación cluster del SOM para las aguas minerales en estudio.

Las muestras de las neuronas 14 y 15 presentan concentraciones elevadas de aniones y cationes y altos contenidos de residuo seco. Si exploramos en detalle cada una de las neuronas observamos que el SOM va clasificando las aguas embotelladas en función del total de las variables que le sean introducidas en la capa de entrada. Dado que el nivel de corte del cluster es decidido a priori, se puede agrupar en las categorías que sean necesarias para explicar el fenómeno deseado (litologías, facies, etc). Los patrones muestran una posible correspondencia entre las formaciones que confinan el acuífero del manantial y las agrupaciones en las neuronas. Esta afirmación se hace en base a los datos observados en las neuronas, dado que las características hidroquímicas observadas en las aguas minerales son función de las litofacies del acuífero.

CONCLUSIONES

Las técnicas de machine learning, en este caso los Self-Organising Map, ofrecen a la hidroquímica una poderosa herramienta de clasificación, como se ha mostrado aquí sucintamente, ya que permite usar más variables de las permitidas en los gráficos hidroquímicos tradicionales.

REFERENCIAS

Gutiérrez, F., Seijo, I., Montoya, R., & Ternero, M. (2012). Caracterización fisicoquímica (Parámetros generales y componentes mayoritarios) de las aguas minerales naturales envasadas de España. Afinidad, 559: 165–174.

Ko, J., Muntean, E., Gega, J., Frymus, A., & Michalski, R. (2019). Major inorganic anions and cations in selected European bottled waters. Journal of Geochemical Exploration, 197: 27–36. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.006

Kohonen, T. (1981). Automatic formation of topological maps of patterns in a self-organizing system. In: Proc. 2nd Scand. Conf. on Image Analysis, 214–220.

Kohonen, T. (2001). Self-Organizing Maps. Spinger. 243 p.

Lourenço, C., Ribeiro, L., & Cruz, J. (2010). Classification of natural mineral and spring bottled waters of Portugal using Principal Component Analysis. Journal of Geochemical Exploration, 107(3):362–372. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.08.001

Investigaciones preliminares sobre la posibilidad de abastecimiento a la ciudad romana de *Acinipo* (Ronda, Málaga) mediante aguas subterráneas.

Preliminary investigations on the possibility of supplying the Roman city of Acinipo (Ronda, Málaga) with groundwater.

C. Martín Montañés[1], J.M. Castaño Aguilar[2], P. Corrales Aguilar[3], M. Moreno Alcaide[3], C. Husillos Rodríguez[1] y L. Hueso Quesada[1].

1 CN Instituto Geológico y Minero de España-CSIC. Unidad de Granada. Urb. Alcázar del Genil 4, Ed. Zulema bajo. 18006 Granada c.martín@igme.es; c.husillos@igme.es; l.hueso@igme.es
2 Museo de Ronda. Plaza de Mondragón, 29400 Ronda (Málaga) museoderonda@gmail.com
3 Área de Arqueología, Depto. Ciencias Históricas de la Universidad de Málaga. Facultad de Filosofía y Letras, Campus universitario de Teatinos, Boulevard Louis Pasteur, 27. 29010 Málaga mpcorrales@uma.es y mmorenoalcaide@uma.es

Resumen: El yacimiento arqueológico de *Acinipo*, que engloba la ciudad romana del mismo nombre e importantes restos prehistóricos desde el Neolítico hasta la Edad del Cobre, se ubica en una gran mesa caliza perteneciente a la Formación Las Mesas, que corresponde al nivel más alto de los conjuntos litoestratigráficos definidos en el relleno de la cuenca terciaria de Ronda. En la presente comunicación se valoran las entradas al acuífero conformado por las calizas de algas de esta formación, candidato a representar el elemento más significativo en el abastecimiento urbano, con datos actuales y con el objetivo de llevar a cabo una comparativa con la hipotética situación climática durante los periodos de ocupación del enclave.

Palabras clave: Yacimiento arqueológico, abastecimiento, acuífero, calizas, época romana.

Abstract: *The archaeological site of Acinipo, which includes the Roman city of the same name and important prehistoric remains from the Neolithic to the Copper Age, is located on a large limestone table belonging to the Las Mesas Formation, which corresponds to the highest level of lithostratigraphic sets defined in the filling of the Tertiary basin of Ronda. In this communication, the inputs to the aquifer formed by the algae limestone of this formation are assessed, a candidate to represent the most significant element in urban supply, with current data and with the aim of carrying out a comparison with the hypothetical climatic situation during periods of occupation of the enclave.*

Key words: *Archaeological site, supply, aquifer, limestone, Roman Age.*

INTRODUCCIÓN

La viabilidad y sostenibilidad de los abastecimientos urbanos, no han dejado de preocupar a lo largo de los tiempos a los grupos sociales, así como a sus autoridades. Es por ello que el suministro de agua a estos asentamientos ha sido una de las principales tareas de los colectivos humanos ya que puede condicionar en gran medida su perpetuación en el tiempo.

La ciudad romana de *Acinipo* (Ronda, Málaga) es uno de los yacimientos arqueológicos más destacados de la provincia malagueña, y el principal yacimiento de época romana de la Serranía de Ronda. Su excepcionalidad reside en su extensión, amplitud y conservación de los vestigios dada la nula afección urbanística posterior, y, finalmente, en la calidad ambiental y paisajística del marco natural donde se sitúa.

Será sobre esta meseta de forma oblonga y ligeramente inclinada hacia el este donde se documente una ocupación continuada desde época prehistórica, aunque los restos que tienen con mayor incidencia comienzan a manifestarse a partir del siglo IX-VIII a.C. : los niveles de estos momentos se identifican con la transformación de cinco cabañas o estructuras de habitación que evolucionan desde formas ovales y circulares (interpretadas como de origen autóctono) hacia otras con dependencias de forma cuadrangular, influenciadas por el contacto de estas poblaciones locales con las colonias fenicias instaladas durante el Bronce Final Reciente en las costas mediterránea y atlántica del sur peninsular (Aguayo de Hoyos et al. 1989). Tras esta fase protohistórica se produce un abandono de la mesa, que no volverá a ocuparse hasta época ibérica conformando un *oppidum* de innegables condiciones defensivas y estratégicas que controla toda la depresión. De este núcleo ibérico quedan algunos testimonios que todavía son visibles junto con los de la ciudad romana, como parte de la muralla rodeaba el asentamiento.

La presencia de Roma en los territorios hispanos impuso una nueva ordenación territorial que se servía de los modelos ensayados ya en la península Itálica. Con ella

se impone un sistema urbano en el que la ciudad asume el papel de centro territorial acorde con el modelo de sociedad mediterránea difundido por Roma en el conjunto del Imperio. Los principales resultados exhumados hasta el momento en este yacimiento se agrupan en tres espacios: teatro, *domus* y termas (Castaño Aguilar, 2019), pero los resultados derivados de la actividad arqueológica intermitente en el yacimiento, evidencian la falta de cohesión de los datos obtenidos que no permiten, en el estado actual de la investigación, un análisis integral del mismo. Para lograr ese acercamiento a la reconstrucción de la ciudad en sí y como elemento vertebrador de un rico territorio, es necesario acometer nuevas investigaciones en la que conocer el abastecimiento de agua que tuvo este lugar durante la Antigüedad es uno de los aspectos prioritarios de este proyecto de investigación.



FIGURA 1. *Localización del área de estudio*.

Una de las incertidumbres que presenta esta ciudad es el de su abastecimiento urbano de agua, ya investigado con anterioridad (García García et al., 2007) y puesto de manifiesto en numerosos trabajos divulgativos. Entre las actividades que se están llevando a cabo en el proyecto "*Acinipo* en el paisaje urbano romano de la Serranía de Ronda: Investigación interdisciplinar para la valorización patrimonial" (PID2022-140956NB-I00) se incluye una aproximación a esta incógnita. En la presente comunicación se valoran las entradas al acuífero candidato a representar el elemento más significativo en el abastecimiento urbano.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

El acuífero, definido aquí con la denominación de las Calizas de Acinipo, se localiza en la cuenca de Ronda (Fig. 1), la cual se sitúa cercana al límite de las Zonas Internas sobre materiales mesozoicos de la Zona Subbética y/o sobre otros pertenecientes a diversas Unidades del Campo de Gibraltar. Los sedimentos que la rellenan abarcan la totalidad del Mioceno superior manteniéndose el régimen marino hasta el Messiniense superior. Estos materiales pueden dividirse en varios conjuntos litoestratigráficos (Serrano Lozano, 1979).

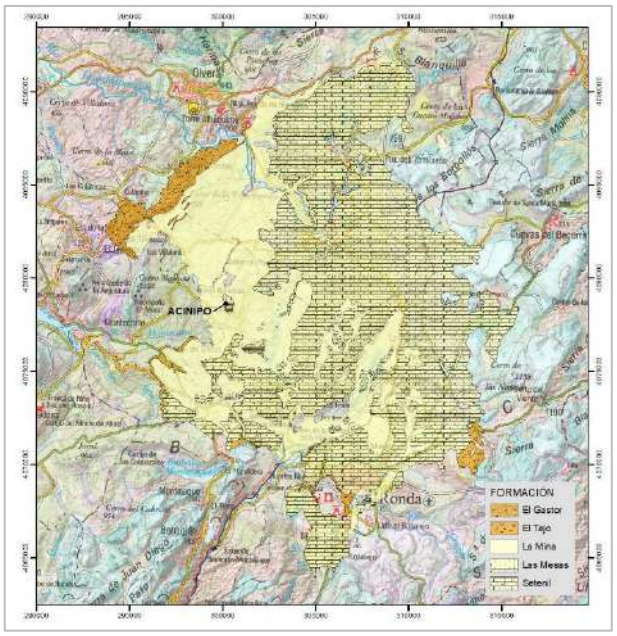


FIGURA 2. *Cartografía de las formaciones descritas en la cuenca de Ronda (elaboración propia sobre cartografía GEODE del IGME).*

Así, en el borde sur de la cuenca se desarrolló un abanico deltaico con potentes acumulaciones de conglomerados (Fm. El Tajo) sobre los que se disponen calcarenitas (Fm. Setenil), lo que evidencia el cambio a una plataforma bioclástica. En la parte oriental de la cuenca predominó la sedimentación calcarenítica de plataforma y, en la parte central, un conjunto de depósitos margosos más profundos (Fm. La Mina). Durante la última fase de evolución marina de la cuenca, destaca una formación arrecifal de calizas de algas originada en el Messiniense (Fm. Las Mesas) (Serrano Lozano, 1979). Esta formación, que toma el nombre del cerro de Las Mesas, es la que conforma el acuífero estudiado y sobre ella se ubica la ciudad romana de *Acinipo*. En la figura 2 se indica la distribución de las formaciones sobre la cartografía geológica GEODE del CN IGME-CSIC.

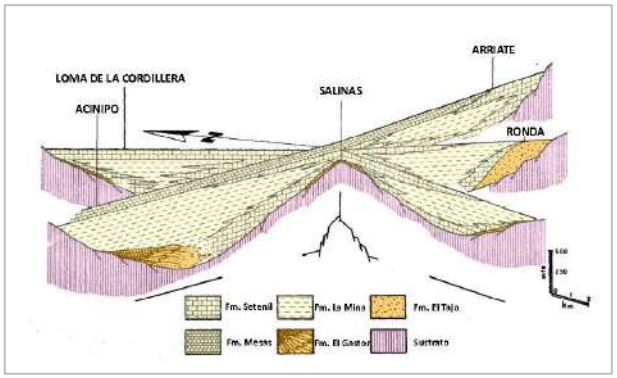


FIGURA 3. *Relación espacial de las formaciones descritas en la cuenca de Ronda* (Modificada de Rodríguez Fernández (1982)).

La Formación Las Mesas fue definida por Serrano Lozano (1.979) y equivale al miembro calizo de la Formación Setenil de Rodríguez Fernández (1982). Aflora en el centro de la depresión, en el Cerro de Las Mesas y Cerro de Los Villares, donde reposa sobre las

margas de la Formación La Mina. En el bloque diagrama de la figura 3 se presentan las relaciones espaciales entre formaciones (Rodríguez Fernández, 1982).

El acuífero estudiado se localiza en la mesa de *Acinipo*, uno de los dos afloramientos cartografiados como Fm. Las Mesas. Presenta una estructura en "tableta de chocolate" dispuesta sobre la Fm. La Mina. Las calizas de algas que lo conforman presentan, con una superficie de afloramiento de, aproximadamente, 0,40 km^2, una notable porosidad, laminación y buzamiento hacia el sureste, que varía entre 12º y 35º y constituyen un acuífero de permeabilidad vertical alta. Su potencia es variable de 6 a 30 m. A muro existe un nivel de calizas margosas muy masivas y porosas con presencia de ostras con una potencia en torno a los 3 m y buzamiento y sentido 12/167 (García García et al., 2007). El impermeable de base es la serie monótona de margas y arcillas beige pertenecientes a la Fm. La Mina, que supera en la cuenca los 800 m de potencia (Serrano Lozano, 1979).

Dentro del acuífero, García García et al. (2007) definen tres sectores vinculados a surgencias (posibles puntos de abastecimiento). Estos sectores son el Sector Norte (parte norte de acuífero drenado por los manantiales Cortijo y Escuela); el Sector Termas, al sur del anterior, que se drena por los manantiales Termas, y Laguna y el Sector Laguna, el más meridional (drena por la laguna y aparentemente, por la surgencia Puerta Sur).

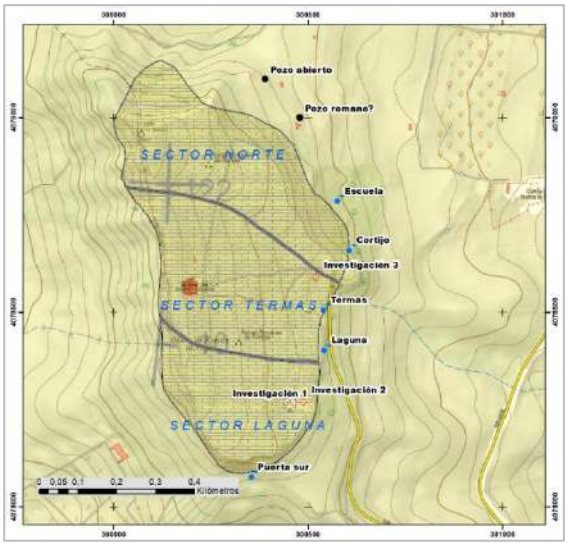


FIGURA 4. *Mapa hidrogeológico del acuífero de las Calizas de Acinipo con sectorización (Modificado de García García et al. (2007)).*

El inventario de puntos de agua en las cercanías de *Acinipo*, llevado a cabo en 2007 (García García et al., 2007) y confirmado con los trabajos de campo actuales consta de 5 manantiales, 2 pozos y 3 sondeos de pequeño diámetro, uno de ellos acondicionado para abastecimiento (Fig. 4).

MATERIAL Y MÉTODOS

La información meteorológica se ha obtenido mediante una herramienta en formato Jupyter Notebook desarrollada en el marco del proyecto SARAI (SARAI, 2023). Dicha herramienta permite leer datos directamente de las webs de la AEMET y la Dirección General del Agua, y a partir de un fichero de coordenadas extraer las series históricas de pluviometría, temperatura máxima y mínima a partir de medidas disponibles a una distancia de 5 km o inferior para cada uno de los puntos. En este trabajo se ha partido de series de datos diarios de precipitación y temperatura para un periodo de 70 años, comprendido entre los años 1951 y 2021 con los que obtenemos una precipitación anual para el año medio de 874 mm/año. El resto de estadísticos representativos se incluyen en la tabla I.

El año tipo seco se ha determinado como aquel cuya precipitación se aproxima más a la media de las precipitaciones consideradas estadísticamente secas (pp < 25% de la curva de distribución). El año tipo medio, en el que precipitación se aproxima más a la media de las precipitaciones y el año tipo húmedo, aquel cuya precipitación se aproxima más a la media de las precipitaciones consideradas estadísticamente húmedas (pp > 75% de la curva de distribución). Esta determinación se ilustra en la figura 5, en la que se ha representado distribución Normal ajustada.

Estadísticos representativos de la serie	Media	861,32
	Mínimo	327,13
	Máximo	1669,38
	Rango	1342,25
	Varianza	80722,63
	Desviación típica	284,12
	Coef. de variación	0,33
	Coef. de asimetría	0,65
	Curtosis	0,20
Años tipo	Seco (2012)	589 mm
	Medio (1985)	874 mm
	Húmedo (1955)	1121 mm
Año más seco (2005)		327 mm
Año más húmedo (1963)		1669 mm

TABLA I. *Años tipo y estadísticos de la serie de precipitación analizada.*

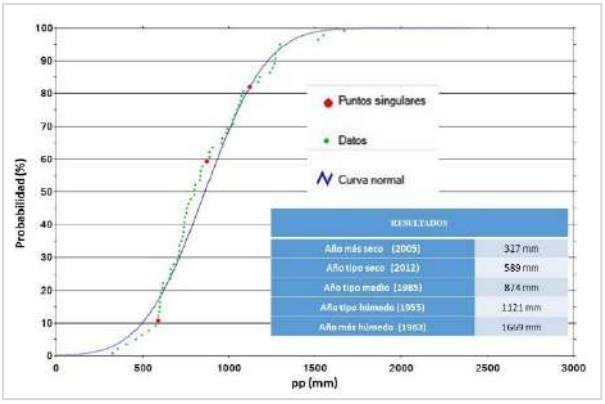


FIGURA 5. *Distribución Normal ajustada de las precipitaciones anuales sobre el acuífero de las Calizas de Acinipo.*

Las entradas se han calculado mediante el balance de agua en el suelo (BAS) que consiste en la aplicación del principio de conservación de masa a una cierta región de

volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno, siendo la diferencia entre el total de entradas y de salidas igual al cambio de agua almacenada durante el periodo de tiempo en el que se realiza el balance. A efectos prácticos, solo pueden ser medidos la precipitación, salidas por manantiales o extracciones por bombeo. El resto de componentes han de evaluarse a partir de la utilización de fórmulas semiempíricas (ETP, ETR y LLU).

El balance hídrico se ha realizado a partir de series de datos diarios de precipitación indicados anteriormente. Los valores de LLU se han calculado a partir de balances diarios de agua en el suelo utilizando un valor de reserva útil de 10 mm. Para descomponer la LLU en escorrentía (ESC) y en infiltración (INF) se ha seguido el método del Soil Conservation Service de los EEUU (Témez Peláez, 1978) con un umbral de escorrentía (Po) de 10. El cálculo de la recarga se ha realizado mediante la clásica metodología de Thornthwaite y Mather (1955) con datos diarios y con la ayuda del programa informático TRASERO 2.1.0 (Padilla y Delgado, 2011).

DISCUSIÓN

El tratamiento de los datos de precipitación y temperatura han permitido obtener, a partir de la LLU, la infiltración que se produce sobre los materiales permeables del acuífero estudiado. Este valor, multiplicado por la superficie de afloramiento nos da una aproximación óptima de la recarga natural. Al acuífero le asignamos una superficie de afloramiento de 394.469 m^2.

En nuestro caso, y con el fin de comparar estos valores con la desconocida, al menos en parte, infiltración de la precipitación en el periodo de habitación y abastecimiento de la ciudad (Imperio Romano, s.l.) hemos obtenido los volúmenes anuales que se presentan en la tabla II y que corresponderían, en esta primera aproximación.

Año tipo	pp anual (mm)	Infiltración (hm^3/año)	Caudal equivalente (l/s)
Seco (2012)	589 mm	0,14	4,3
Medio (1985)	874 mm	0,28	8,7
Húmedo (1955)	1.121 mm	0,32	10,3

TABLA II. *Volúmenes anuales infiltrados en las Calizas de Acinipo.*

Estos caudales suponen una cierta sobrevaloración con respecto a trabajos anteriores en la zona (García García et al., 2007) si bien estos se restringieron al sector del acuífero denominado Termas (0,043 hm^3/año).

CONCLUSIONES

Los valores de la recarga natural obtenidos para el acuífero de las Calizas de *Acinipo* se pueden considerar adecuados si bien, pendientes, en todo caso, de su contraste con datos de caudales drenados por los manantiales y extraídos mediante la única captación de aguas subterráneas, en la investigación en curso.

Asimismo, se considera que su comparación con la situación climática durante el Imperio Romano en la zona podría aportar algunas respuestas a la valorización patrimonial de *Acinipo*.

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación se incluye en los trabajos del proyecto “Acinipo en el paisaje urbano romano de la Serranía de Ronda: Investigación interdisciplinar para la valorización patrimonial” (PID2022-140956NB-I00) en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023.

REFERENCIAS

Aguayo de Hoyos, P., Carrilero Millán, M. y Martínez Fernández, G. (1989): Excavaciones en el yacimiento pre y protohistórico de Acinipo (Ronda, Málaga). En: *Anuario Arqueológico de Andalucía, 1986*, 11: 333-337.

Castaño Aguilar, J.M. (2019): La ciudad de Acinipo (Ronda). Yacimiento arqueológico y símbolo territorial, *Andalucía en la Historia*, 48-53.

García García, J.L., Lozano Rodríguez, J.A., Ruiz Puertas, G y Hódar Correa, M. (2007): Consideraciones hidrogeoarqueológicas sobre el yacimiento romano de Acinipo (Ronda, Málaga). En: *Proyecto general para la investigación, conservación y difusión del yacimiento romano de Acinipo (Ronda, Málaga) 2005-2007*. Nieto González, B. y Castaño Aguilar, J.M.(Coord.), 195-202.

Padilla A, y Delgado J. (2011): *Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas*. Diputación Provincial de Alicante, Alicante.

Rodríguez Fernández, J. (1982): *El Mioceno del sector central de las Cordilleras Béticas*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Secr. Publ. Univ. Granada, 379: 224 p.

SARAI (2023): *Proyecto SARAI*. Proyecto PID2020-116540RB-C22 financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033. Centro Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya y C.N. Instituto Geológico y Minero de España – CSIC

Témez Peláez, J.R. (1978): *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU.

Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather (1955). The Water Balance, Publications in Climatology VIII(1): 1-104, Drexel Institute of Climatology, Centerton, New Jersey.

Serrano Lozano, F. (1.979): *Los foraminíferos planctónicos del Mioceno superior de la cuenca de Ronda y su comparación con los de otras áreas de las Cordilleras Béticas.* Tesis doctoral. Fac. Cien. Univ. Málaga. 272 p

Actualización de la evolución piezométrica y la recarga natural del acuífero "Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana" de la MASb 052.800 "Montes Orientales. Sector Norte".

Update of the piezometric evolution of the "Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana" aquifer of the MASb 052.800 "Montes Orientales. Sector Norte".

C. Martín Montañés[1], C. Husillos Rodríquez[1], V. Cifuentes Sánchez[2], J. Jiménez Sánchez[1], L. Hueso Quesada[1], D. González Rojas[2] y J.P. Martín Ponce[2]

1 CN Instituto Geológico y Minero de España-CSIC. Unidad de Granada. Urb. Alcázar del Genil 4, Ed. Zulema bajo. 18006 Granada. c.martín@igme.es; c.husillos@igme.es; j.jimenez@igme.es; l.hueso@igme.es

2 Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Oficina de Planificación Hidrológica. Plaza de España s/n. 41071. Sevilla. vjcifuentes@chguadalquivir.es; dgonzalez@chguadalquivir.es; jpmartin@chguadalquivir.es

Resumen: En el marco de los trabajos que se están llevando a cabo dentro del Convenio de colaboración entre el CN IGME-CSIC y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, se pretende llevar a cabo una mejora del conocimiento hidrogeológico de una serie de Masas de Agua Subterránea (MASb) entre las que se encuentra la 052.800 "Montes Orientales. Sector Norte". En esta comunicación se exponen los resultados obtenidos para la recarga natural del acuífero de las Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana partiendo de los datos termopluviométricos de la AEMET, descargados mediante la aplicación "Interpolación de Datos Históricos de Precipitación, Temperatura y Piezometría" (IDHPTP), creada en el proyecto SARAI por personal del CN IGME-CSIC y se comparan los resultados obtenidos en proyectos anteriores con la evolución piezométrica que se controla actualmente dentro de los trabajos del proyecto.

Palabras clave: Acuífero, calcarenitas, precipitación, infiltración, recarga.

Abstract: *Within the framework of the work that is being carried out within the collaboration agreement between the CN IGME-CSIC and the Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, it is intended to improve the hydrogeological knowledge of a series of Groundwater Masses (MASb) among which is 052.800 "Montes Orientales. Sector Norte". This communication presents the results obtained for the natural recharge of the aquifer "Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana" based on thermopluviometric data from the AEMET, downloaded through the application "Interpolation of Historical Precipitation, Temperature and Piezometry Data" (IDHPTP), created in the SARAI project by personnel from the CN IGME-CSIC and the results obtained in previous projects are compared with the piezometric evolution that is currently controlled within the project work.*

Key words: *Aquifer, calcarenites, precipitation, infiltration, recharge.*

INTRODUCCIÓN

En el marco del "Convenio entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Instituto Geológico y Minero de España para la mejora del conocimiento hidrogeológico en el marco de la planificación hidrológica (2020-2024)", y debido al incremento de la información de carácter geológico e hidrogeológico generada en los últimos tiempos, se está llevando a cabo una actualización y mejora del conocimiento de la MASb 052.800 "Mts. Orientales. Sector Norte". Los resultados y conclusiones de la presente comunicación se han extraído de dichos trabajos.

EL ÁREA DE ESTUDIO

El acuífero de las Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana se localiza en el suroeste de la provincia de Jaén, a unos 70 km de la capital. Está situado al este del casco urbano de Alcalá la Real, limitando con el mismo y con la aldea de Santa Ana (Figura 1).

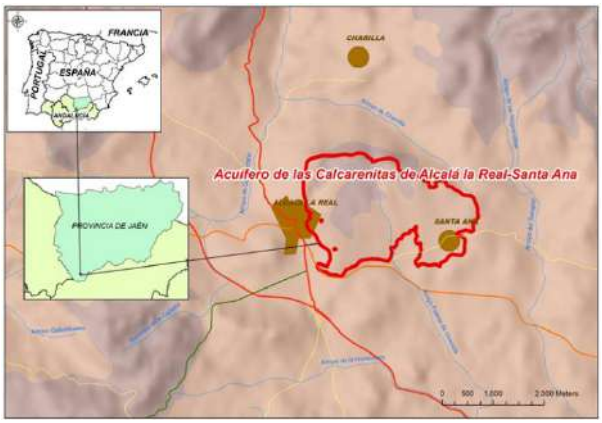


FIGURA 1. Localización del área de estudio.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

El acuífero de las Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana es un acuífero multicapa situado entre los núcleos de Alcalá la Real y Santa Ana y constituido por calcarenitas, arenas y conglomerados del Mioceno superior que ocupan una superficie de 6,6 km^2. Consiste en un afloramiento tabular con espesores entre 36 y 97 m (50-60 metros de espesor medio) que se dispone, horizontalmente o buzando ligeramente al suroeste, sobre una formación margosa del Mioceno que constituye sus límites y sustrato impermeable. Aunque presenta carácter libre, en su zona suroriental existen algunos sectores confinados o semiconfinados, debido a la existencia de cambios laterales de facies. En las figuras 3 y 4 se presenta un mapa hidrogeológico del acuífero y un corte hidrogeológico esquemático del mismo.

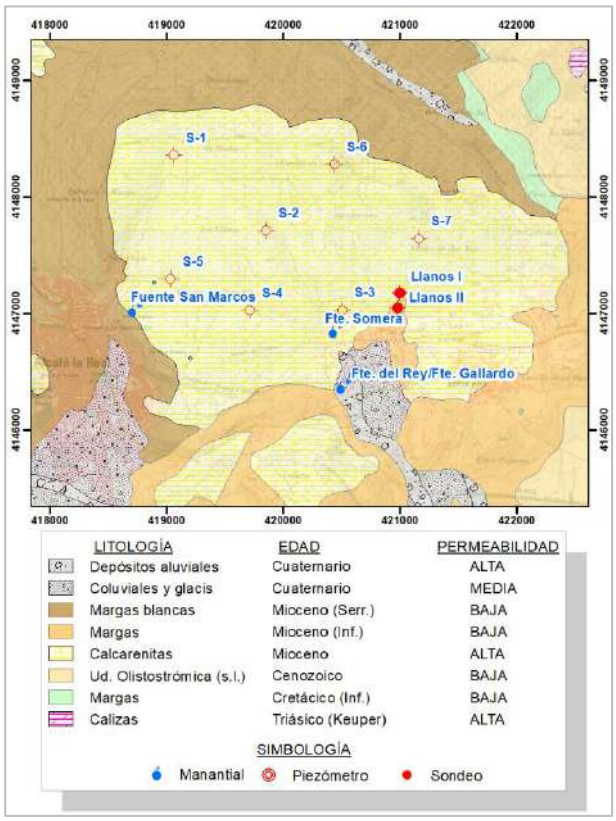


FIGURA 2. Mapa hidrogeológico del acuífero de las Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana.

El principal drenaje se localiza en el paraje de Fuente del Rey, donde se sitúan las surgencias más representativas: Fuente Somera, Fuente del Rey y Fuente Gallardo, que surgen a cotas comprendidas entre 900-925 m s.n.m. Otra surgencia significativa es Fuente San Marcos, situada en el extremo occidental del acuífero a 960 m s.n.m. Estos manantiales presentaban, hace 10-15 años, caudales de 20-40 l/s; sufriendo importantes descensos en los años siguientes, tras la puesta en funcionamiento sucesivamente de los sondeos de los Llanos, denominados Llanos Viejo, I, II y III, para abastecimiento a Alcalá La Real. Existen además perforaciones de titularidad particular, concentradas en Santa Ana y Fuente del Rey, algunas de las cuales se comportaron inicialmente como surgentes.

El flujo subterráneo se dirige principalmente hacia el SE, aunque una pequeña parte lo hace hacia el SO; el nivel piezométrico se sitúa entre 980 m s.n.m. en las zonas septentrionales y 900 m s.n.m. en las áreas de descarga.

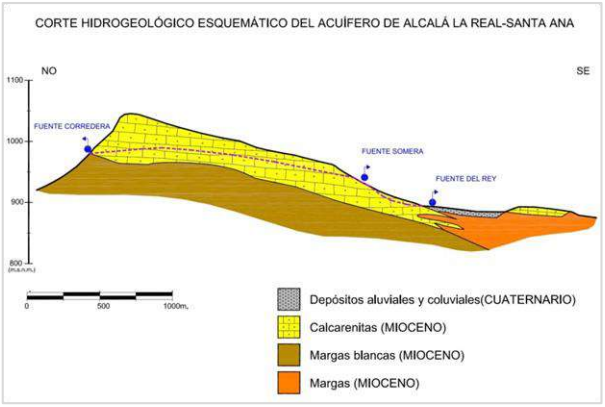


FIGURA 3. Corte hidrogeológico esquemático.

Los parámetros hidráulicos del acuífero, según los ensayos de bombeo realizados en los sondeos Llanos I y II, son de 2200-2400 m^2/d para la transmisividad y de 2x10^{-3} para el coeficiente de almacenamiento. La alimentación se produce exclusivamente por infiltración del agua de lluvia. Las salidas corresponden: por un lado, a los bombeos efectuados para abastecimiento de Alcalá la Real, y por otro, a las emergencias naturales a través de manantiales, y otros bombeos de escasa importancia.El balance hídrico medio del acuífero, para el período 2013-2019, que se podría considerar adecuado a las condiciones climáticas actuales, le asigna unos recursos renovables medios del acuífero de 2,17 hm^3/año de los que se aprovechan 0,6 hm^3/año para abastecimiento a Alcalá la Real, desconociéndose el volumen anual destinado a regadío (Martín Montañés et al., 2023).

MATERIAL Y MÉTODOS

La información meteorológica se obtuvo mediante la aplicación “Interpolación de Datos Históricos de Precipitación, Temperatura y Piezometría” (IDHPTP), una herramienta en formato Jupyter Notebook desarrollada en el marco del proyecto SARAI (SARAI, 2023). Dicha herramienta permite leer datos directamente de las webs de la AEMET y la Dirección General del Agua, y a partir de un fichero de coordenadas extraer las series históricas de pluviometría, temperatura máxima y mínima y piezometría a partir de medidas disponibles a una distancia de 5 km o inferior para cada uno de los puntos. Existen dos posibilidades para obtener cualquier serie histórica. En la primera, se tienen en cuenta únicamente los datos del nodo de la malla más próximo. En la segunda, se toma como histórico el valor promedio de la magnitud pesado por el inverso de la distancia del punto de muestreo a los nodos de la malla más cercanos, y a una distancia menor que la especificada en la configuración del programa. En este trabajo se ha partido de series de datos diarios de precipitación y

temperatura para un periodo de 70 años, comprendido entre los años 1951 y 2021, tomados según la segunda opción.

Las entradas al acuífero se han calculado mediante el balance de agua en el suelo (BAS) que consiste en la aplicación del principio de conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno, siendo la diferencia entre el total de entradas y de salidas igual al cambio de agua almacenada durante el periodo de tiempo en el que se realiza el balance. Por tanto, los métodos para la cuantificación de la recarga mediante balance de agua evalúan los volúmenes infiltrados al acuífero de forma directa, mediante la medida y el cálculo de los componentes del balance. A efectos prácticos, solo algunos de los componentes del balance pueden ser medidos (precipitación, salidas por manantiales o extracciones por bombeo), mientras que el resto de componentes han de evaluarse a partir de la utilización de fórmulas semiempíricas, que se emplean básicamente para el cálculo de la evapotranspiración de referencia o potencial (ETP), de la evapotranspiración real (ETR) y de la lluvia útil (LLU). La ETP se ha calculado según la ecuación propuesta en Thornthwaite (1948).

El balance hídrico se ha realizado a partir de las series descritas. Los valores de LLU se han calculado a partir de balances diarios de agua en el suelo utilizando un valor de reserva útil de 15 mm. Para descomponer la LLU en escorrentía (ESC) y en infiltración (INF) se ha seguido el método del Soil Conservation Service de los EEUU. Este método parte de un umbral de escorrentía (Po) a partir del cual se empieza a producir escorrentía superficial. El valor de este parámetro depende de la litología, de la pendiente y de la vegetación y se le ha asignado un valor de 10. El cálculo de la recarga se ha realizado mediante la clásica metodología de Thornthwaite y Mather (1955) con datos diarios y con la ayuda del programa informático TRASERO 2.1.0 (Padilla y Delgado, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tratamiento de los datos de precipitación y temperatura han permitido obtener, a partir de la Lluvia Útil, la infiltración que se produce sobre los materiales permeables en el acuífero estudiado. Este valor, multiplicado por la superficie de afloramiento nos da una aproximación óptima de la recarga natural. Los valores de precipitación y temperatura obtenidos con IDHPTP se han asignado al centroide del afloramiento de la formación acuífera estudiada. En la tabla I se presentan los valores de la lluvia útil, infiltración y recarga para una superficie total de afloramiento de ese acuífero de 6,6 km^2. Además, se ha representado la desviación acumulada de la precipitación anual respecto de la media para la identificación de periodos secos y húmedos y se aprecia que el periodo 2013-2019, del que disponemos datos de evolución piezométrica, fue un periodo seco, como se pone de manifiesto en el gráfico de la figura 4.

Año hidrológico	Total anual IGME-CHG 2023			
	pp (mm)	LLU para RU=15 (mm)	INF para RU=15 y P_o=10 (mm)	Entradas al acuífero (hm^3/año)
2013-2014	565,1	392,6	358,7	2,4
2014-2015	476,0	278,5	271,8	1,8
2015-2016	524,9	319,9	295,7	2,0
2016-2017	427,0	230,8	215,8	1,4
2017-2018	861,9	610,0	562,4	3,7
2018-2019	474,1	280,4	271,6	1,8
Media	554,7	351,9	329,4	**2,2**

Tabla I: Valores de la LLU, Infiltración y Recarga para el acuífero de las Calcarenitas de Alcalá la Real-Santa Ana (Periodo 2013-19).



FIGURA 4. Desviación acumulada de la precipitación anual respecto a la media.

En cuanto a la evolución piezométrica del acuífero, en la figura 5 se ha representado la evolución del nivel piezométrico controlado en los piezómetros S-1, S-2, S-6 y S-7, los tres últimos instalados con datalogger, junto con la desviación acumulada de la media con la misma escala temporal. En dicho gráfico se observa que existe una buena coincidencia entre los periodos húmedos y la recarga del acuífero en el caso del S-6 y S-1, la cual no se pone de manifiesto con tanta claridad en el S-2 y S-7.

Este fenómeno podría deberse a que los primeros están más alejados de la zona donde se concentran los bombeos, lo que hace que la evolución del nivel piezométrico se vea menos afectada por estos que en S-2 y S-7 y responda con claridad a los periodos húmedos con ascensos y a los secos con descensos. Por otra parte, también se podría interpretar como que en el acuífero existe una sectorización como se indica en trabajos anteriores además de otra que diferencia unos sectores al norte, con una respuesta rápida a la infiltración de la precipitación, representada por S-1 y S-6 y al sur con S-2 y S-7.

En el mismo gráfico de la figura 5 se observa que el sensor instalado en S-6 registra con claridad los periodos de recarga del acuífero. Sin embargo, el instalado en S-7 registra un ascenso en abril-mayo de 2014 que no se detecta en S-6 y, el nivel en este piezómetro, continúa descendiendo a partir de marzo de 2015, fecha a partir de la cual el nivel en S-7 parece tender a una estabilización, aunque en 2017-2018 sí registra una tendencia al ascenso

que se podría correlacionar con la observada en S-6, si bien con bastante menos entidad.

Por otra parte, si analizamos la serie completa se pone de manifiesto que el periodo seco que indica la tendencia descendente de la curva de la desviación acumulada de la media de la precipitación se refleja en todos los piezómetros controlados, siendo significativo el ascenso piezométrico, sobre todo en S-6 y S-1, para el año hidrológico 2017-2018 para el que se obtuvieron unas entradas para el acuífero de 3,71 hm^3/año (ver tabla I).

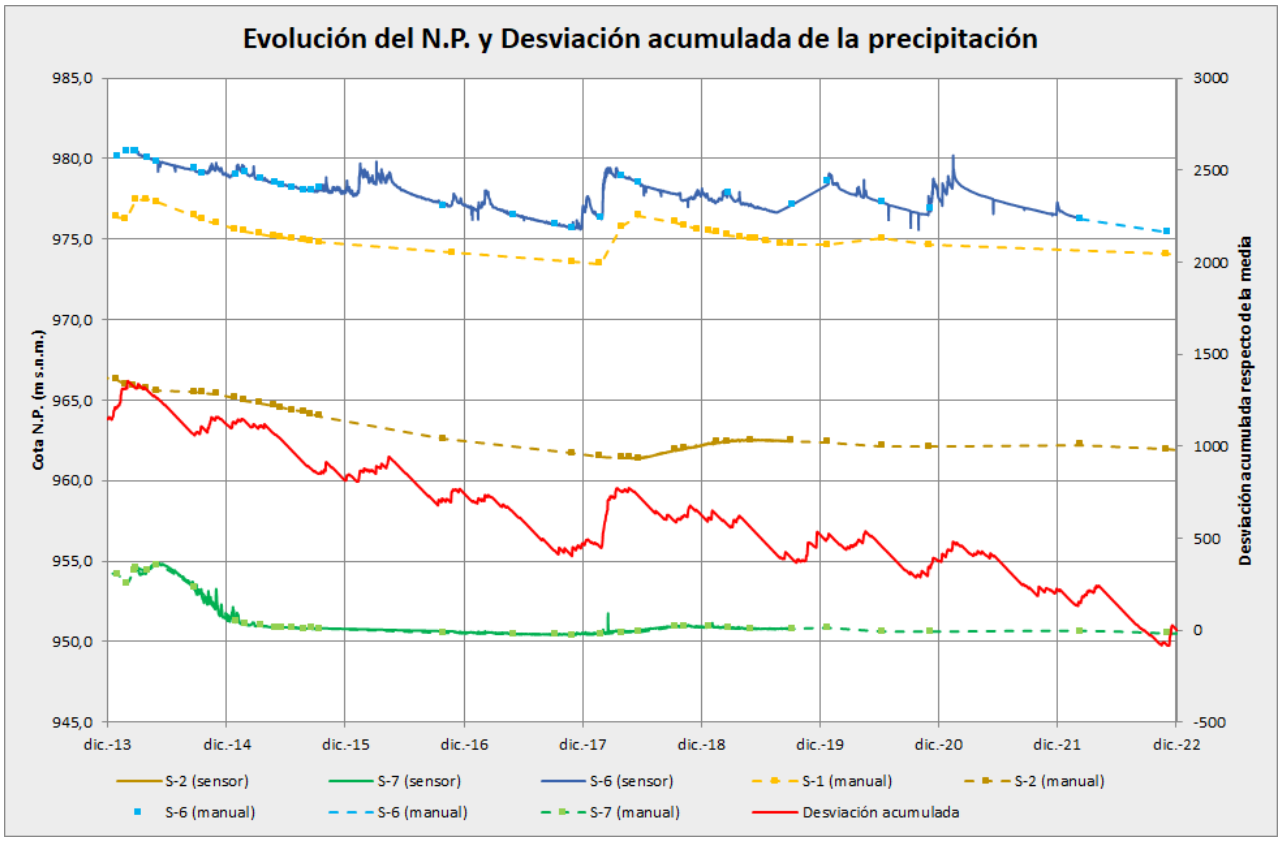


Figura 5. Desviación acumulada de la precipitación y evolución piezométrica

CONCLUSIONES

Los cálculos realizados ponen de manifiesto que el periodo de control de la piezometría está siendo un periodo seco y que el acuífero responde con un ascenso rápido del nivel piezométrico en la parte norte y mucho más atenuado en la sur. Asimismo, los valores de la recarga natural obtenidos se pueden considerar adecuados, según se observa en la evolución piezométrica controlada en el acuífero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y al CN Instituto Geológico y Minero de España-CSIC las facilidades para la elaboración de esta comunicación, la cual se encuadra dentro del proyecto “Investigación hidrogeológica para la mejora del conocimiento hidrogeológico en el marco de la Planificación Hidrológica del Guadalquivir (2020-2024)” del Convenio Específico de Colaboración entre el CN IGME-CSIC y la mencionada Confederación Hidrográfica.

REFERENCIAS

Martín Montañés, C., Husillos Rodríguez, C., Cifuentes Sánchez, V., Rodríguez Merino, E., Jiménez Sánchez, J. y Hueso Quesada, L. (2023): Estimación de la recarga por infiltración de la precipitación en los acuíferos calcareníticos de la MASb 052.800 “Montes Orientales. Sector Norte” partiendo de la aplicación “Interpolación de datos históricos de precipitación, temperatura y piezometría” (IDHPTP). En: *XI Simposio del Agua en Andalucía*. (en edición).

Padilla A, y Delgado J. (2011): Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Diputación Provincial de Alicante, Alicante. 49 p

SARAI (2023): Proyecto SARAI. Proyecto PID2020-116540RB-C22 financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033. Centro Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya Y C.N. Instituto Geológico y Minero de España – CSIC (en elaboración)

Thornthwaite, G. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographycal*. 38: 59-64

Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather (1955). The Water Balance, Publications in Climatology VIII(1): 1-104, Drexel Institute of Climatology, Centerton, New Jersey.

Soluciones basadas en la naturaleza para la resiliencia de las Islas Canarias ante el cambio climático: el proyecto NATALIE

Nature-based solutions for the resilience of the Canary Islands to climate change: the NATALIE project.

J. Martínez León[1], C. Baquedano[1], M.Á. Marazuela[1], J. Jimenez[1], S. Gasco Cervero[2], J. Rodríguez-Martín[3], J.C. Santamarta[4] y A. García-Gil[1].

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España (j.martinez@igme.es; c.baquedano@igme.es; ma.marazuela@igme.es; jon.jimenez@igme.es; a.garcia@igme.es)
2 Departamento de Salud de Madrid, Ayuntamiento de Madrid, España. (gascocs@madrid.es)
3 Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura, Universidad de La Laguna (ULL), Tenerife, España. (jrodrima@ull.edu.es)
4 Departamento de Ingeniería Agraria y Ambiental. Universidad de La Laguna, Tenerife, España (jcsanta@ull.edu.es)

Palabras clave: soluciones basadas en la naturaleza, cambio climático, Islas Canarias, humedales, drenaje urbano sostenible.

Resumen

El proyecto NATALIE propone el uso de soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para mejorar la resiliencia de las Islas Canarias (España) al cambio climático. Las SBN son enfoques, acciones o procesos que utilizan la naturaleza para resolver problemas relacionados con la gestión territorial y urbana como la adaptación al cambio climático, la gestión de los recursos, del agua, la seguridad alimentaria o la calidad del aire. El proyecto tiene tres casos de estudio, en Gran Canaria, Tenerife y Fuerteventura, donde se aplicarán diferentes SBN según las condiciones ambientales de cada isla. En Gran Canaria, se construirá una SBN basada en Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) en el barranco de Maspalomas, para retener el agua de escorrentía y reducir la degradación de la laguna de Maspalomas. En La Laguna (Tenerife), se propondrá la construcción de un parque que actuará como un depósito natural de agua de escorrentía, reduciendo las habituales inundaciones de la ciudad y mejorando el entorno urbano. En Fuerteventura, se restaurarán humedales degradados con sistemas de tratamiento natural que eliminarán los contaminantes del agua residual. El agua regenerada se usará para crear un proyecto piloto de recarga artificial de acuíferos, que aumentará la disponibilidad y calidad del agua subterránea. También se analizará la interacción del acuífero con los sistemas tradicionales de almacenamiento de agua ("gavias"). En todos estos proyectos se monitorearán y se realizarán modelos geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos para probar el funcionamiento de las SBN y su respuesta al cambio climático.

Abstract

The NATALIE project proposes the use of nature-based solutions (NBS) to enhance the resilience of the Canary Islands (Spain) to climate change. NBS are approaches, actions or processes that employ nature to address challenges related to territorial and urban management such as climate change adaptation, resource management, water management, food security or air quality. The project has three case studies, in Gran Canaria, Tenerife and Fuerteventura, where different NBS will be implemented according to the environmental conditions of each island. In Gran Canaria, an NBS based on Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) will be built in the Maspalomas ravine, to retain runoff water and reduce the degradation of the Maspalomas lagoon. In La Laguna (Tenerife), the construction of a park that will act as a natural reservoir of runoff water will be proposed, reducing the usual floods of the city and improving the urban environment. In Fuerteventura, degraded wetlands will be restored with natural treatment systems that will remove pollutants from wastewater. The regenerated water will be used to create a pilot project of artificial aquifer recharge, which will increase the availability and quality of groundwater. The interaction of the aquifer with the traditional water storage systems ("gavias") will also be analyzed. In all these projects, geological, hydrological and hydrogeological models will be monitored and performed to test the performance of the NBS and their response to climate change.

Los pozos de la catedral de Ávila, España

The wells of the Cathedral of Ávila, Spain

R. Morales García[1]

1 C.N. Instituto Geológico y Minero de España - CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28004 Madrid. r.morales@igme.es

Resumen: La catedral de Ávila, una de las grandes en España, constituye, desde el punto de vista funcional, el más poderoso ejemplo de templo-fortaleza que se conserva en Europa. Construida entre los siglos XII al XVII, presenta la particularidad de tener una serie de pozos de abastecimiento de agua en su interior. Los pozos están excavados en los materiales de alteración del granito sobre el que se asienta la ciudad de Ávila y, en parte, sobre los propios granitos, aprovechando la circulación hídrica subterránea a favor de algunas fracturas. Algunos de los pozos incluso tienen galerías horizontales que permiten captar de manera más eficiente el agua subterránea del acuífero superficial. En esta comunicación se presentan las referencias más destacadas al agua subterránea a lo largo de la historia de la catedral, así como la descripción detallada de los seis pozos documentados en la misma. Después de la inspección realizada en 2016 por el Área de hidrogeología y Aguas Subterráneas del Departamento de Recursos Geológicos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se ha podido establecer una interpretación hidrogeológica de los pozos, coherente con las referencias históricas y las observaciones efectuadas.

Palabras clave: hidrogeología, historia del agua subterránea, pozos de abastecimiento, patrimonio hidrogeológico

Abstract: *The Cathedral of Ávila, one of the greatest in Spain, is, from a functional point of view, the most powerful example of a temple-fortress preserved in Europe. Built between the twelfth and seventeenth centuries, it has the particularity of housing a series of water supply wells inside. The wells are dug in the materials of alteration of the granite on which the city of Ávila is based and, in part, on the granites themselves, taking advantage of the groundwater circulation in favor of some fractures. Some of the wells even have horizontal galleries that allow groundwater to be captured more efficiently from the surface aquifer. This paper presents the most prominent references to groundwater throughout the history of the cathedral, as well as a detailed description of the six wells documented. After the inspection carried out in 2016 by the Hydrogeology and Groundwater Area of the Department of Geological Resources of the Geological and Mining Institute of Spain (IGME), it has been possible to establish a hydrogeological interpretation of them, consistent with the historical references and observations made.*

Key words: *Hydrogeology, History of Groundwater, Supply Wells, Hydrogeological Heritage*

INTRODUCCIÓN

La catedral de Ávila, una de las grandes en España, está considerada como la primera catedral gótica española. Desde el punto de vista funcional, constituye el más poderoso ejemplo de templo-fortaleza que se conserva en Europa. Su ábside conforma uno de los cubos más grandes de la muralla de la ciudad, por lo que, al estar integrada en esta imponente estructura defensiva, debía contener una fuente de agua asegurada. Construida entre los siglos XII al XVII, en efecto, presenta la particularidad de tener una serie de pozos de abastecimiento de agua en su interior.

SITUACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

La ciudad de Ávila se localiza en el interior y centro de la Península Ibérica. Desde el punto de vista geológico se sitúa en el dominio occidental del Sistema Central, en el denominado Complejo de Gredos. La ciudad se asienta casi en su totalidad sobre rocas graníticas hercínicas que, de acuerdo con la cartografía geológica escala 1/50.000 (Hoja Geológica 351 Ávila de los Caballeros) se corresponden con adamellitas de grano medio-grueso biotíticas, en facies porfídicas. Estas rocas ígneas presentan, en general, baja permeabilidad, pudiendo contener localmente aguas subterráneas asociadas a zonas más alteradas o fracturadas del granito.

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CATEDRAL

La construcción de la primera catedral de Ávila se llevó a cabo en torno a los años 1091 y 1107. Según Benito (2011), comenzó como la reedificación de un templo que se encontraba en muy mal estado, como dicen las crónicas: Pedro II Sánchez de Zurraquines "*halló el templo de San Salvador asolado e malparado e el maderaje podrido con las aguas*". Esta catedral inicial (románica), denominada la "Catedral del Conde", se derribaría sin acabar en el siglo siguiente ya que, al construirse en el momento de la repoblación, las murallas

aun no estaban terminadas y sus muros "chocaron" contra la catedral.

La nueva catedral, de finales del siglo XII, se colocó ya en su lugar en relación con la muralla. En 1172 el maestro francés Fruchel, con el nuevo estilo cisterniense (románico de transición al gótico), traza el enorme cubo que sobresale de la línea amurallada: la girola con las capillas empotradas en el grueso muro. Por tanto, parece razonable pensar en la existencia de pozos en la catedral, pues al formar parte de la estructura defensiva de la ciudad, debía contar con pozos y depósitos de agua para abastecerse durante un posible asedio.

Algunas descripciones de la catedral ya señalan la existencia de estos pozos, como el relato de José Tello Martínez de finales del siglo XVIII, que recoge los principales conocimientos hasta la fecha en relación con la catedral: "*El edificio y extructura de esta yglesia es admirable, rico y fuerte…Tienen en sus suelos varios pozos disimulados la yglesia y claustro para recogerse las aguas e impedirse las humedades, una sala de capítulo o juntas…* (Tello, 2001).

Por otro lado, los trabajos arqueológicos llevados a cabo durante el vaciado de la Cripta de la Capilla de los Velada en el año 2005 corroboran el uso de la misma como aljibe desde el siglo XVII, y sobre todo en momentos históricos puntuales, como en las guerras carlistas donde se pone de manifiesto que se sigue teniendo al templo como fortaleza y lugar de aprovisionamiento de agua: en julio de 1836, el Comandante de Armas pide la situación de todos los pozos de agua potable existentes dentro de las murallas. En agosto de 1836, los comisionados municipales reconocen donde están los pozos y le remiten la información. En marzo de 1838, ante la llegada inminente de las fuerzas carlistas, se utiliza la catedral como fortificación inexpugnable. Así, el Comandante General militar pide al Ayuntamiento y a la Diputación, además de víveres para subsistir durante el cerco, el "*acopio de raciones de aguardiente, leña y vino*". Nunca se demanda agua para los sitiados en el templo-fortaleza. El hecho de pedir información acerca de donde están los pozos y de asentarse después en la catedral para el asalto implica que ésta debía tener agua suficiente, como se corrobora con el hecho de que el comandante no pidiese aprovisionamiento extra de agua para sus soldados. En momentos anteriores de esta misma guerra, también se pidieron vasijas para coger agua con destino a la catedral, pero nunca se solicitó el agua en sí, por lo que se deduce que había de sobra en el templo.

Hoy en día, están documentados por Aparicio (2010), seis pozos que se encuentran repartidos por todo el recinto catedralicio y sus dependencias (Figura 1). En mayo de 2016, el Área de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del Instituto Geológico y Minero de España realiza una visita a la catedral para comprobar la existencia y estado de conservación de los pozos.

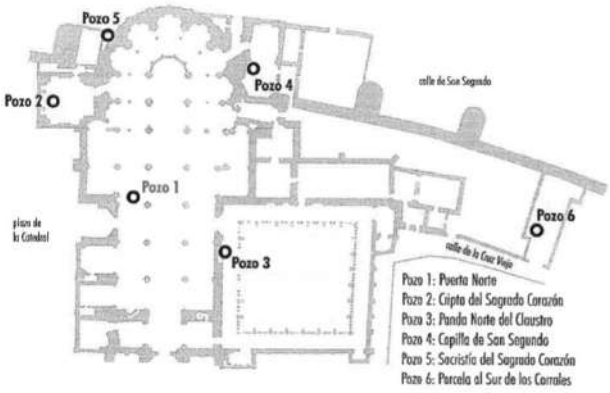


FIGURA 1. *Situación de los pozos en la catedral de Ávila. Fuente: Aparicio, 2010.*

DESCRIPCIÓN DE LOS POZOS

Pozo 1: en la puerta norte

Se abre sobre el pavimento de losas graníticas, perfectamente visible sobre el suelo de la catedral, cubierto por una tapa de hierro y cobre. Este suelo se instaló a principios del siglo XX, coincidiendo con la desaparición del brocal del pozo en 1927, en el momento de la retirada total de las *sepulturas de bulto* del templo. Es el más profundo de la catedral, con una profundidad de 8 m; la boca actual del pozo es un círculo de 0,40 m de diámetro labrado en una única losa de granito bajo la cual se continúa medio metro de brocal realizado de mampuestos de granito gris que descansan sobre una estructura de planta cuadrangular de 3 m de longitud, donde se distinguen cuatro hiladas de grandes bloques rectangulares de granito trabados en seco, seguido de un aparejo mixto de pequeños sillares con mampuestos de acabado muy tosco. Bajo este nivel, un travesaño en forma de trapecio soporta la anterior estructura de revestimiento del pozo apoyándose sobre el substrato geológico granítico, que en esta zona de la ciudad aparece en torno a los 4,5 metros de profundidad, y que constituye la zona de captación del pozo.

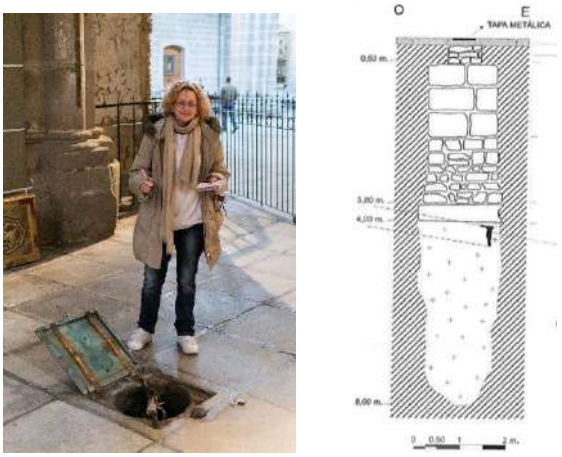


FIGURA 2. *Situación y diseño constructivo del pozo 1, en la Puerta Norte de la catedral de Ávila. Fuente: Aparicio (2010). Fotografía: Raquel Morales.*

Durante las tareas de limpieza del 2010, se ha descubierto una galería subterránea en forma de triángulo que sale a 4 m de profundidad por debajo del trapecio que

sujeta el encofrado del pozo, y que se dirige en dirección NO. Se encuentra horadada en el substrato granítico y presenta una base bien pavimentada, con paredes revestidas de sillares de granito gris. Se encuentra cubierta por el agua del pozo. En mayo de 2016 el nivel freático se encontraba a 2,72 m de profundidad.

La edad de construcción de pozo se estima entre el siglo XII y XIII, según Rodríguez Almeida (1974), arqueológicamente se han podido situar los dos pozos que se encuentran en el templo desde su construcción (pozos 1 y 3) (Benito, 2011).

Pozo 2: en la cripta de la Capilla del Sagrado Corazón o de Los Velada

La capilla de Los Velada, al norte de la cabecera de la catedral, arranca de un sótano de poca altura con una magnífica bóveda, la cripta. Fue mandada construir en el año 1603 pero tardó casi 200 años en terminarse, tanto por los problemas técnicos que las aguas subterráneas provocaron en la cimentación, como por factores económicos. Fue el arquitecto Francisco de Mora, que trabajó en el monasterio de El Escorial, quien ejecutó las primeras catas en 1609 y, tras horadar el terreno hasta 9 pies, advirtió al marqués de Velada de que se había encontrado una roca firme que ahorraría en los cimientos y hormigón, pero que "*tenía dentro de su cuerpo hasta agua*". Consigue drenar el agua subterránea de la cripta "*dando la mejor traza que se pudo para desaguarla desviándola hacia los pies de la iglesia*", siendo una solución momentánea, pues la cota de la calle creció y se invirtió el sentido del flujo del agua. Tras los sucesivos intentos de drenar el agua de origen subterráneo que se recogía en la cripta, tanto durante su dilatada etapa de construcción como ya en el siglo XX, el problema no se resolvió hasta que en 2005 se llevó a cabo una remodelación y se instalaron dos bombas eléctricas.

La cripta, con una superficie de 70 m^2, tiene una estructura cerrada y compacta, con solo dos ventanas como respiraderos (quedando una de ellas a ras del suelo en el exterior en la plaza de la catedral). Alcanza un volumen de 180 m^3, por lo que ha funcionado casi siempre como un excelente aljibe y se considera el lugar con mayor acumulación de agua de la catedral.

El pozo se realizaría en los primeros años de la construcción de la capilla. Presenta un brocal interior cuadrangular, de 38 x 50 cm, formado por cuatro bloques de granito, y una profundidad de 1,30 m desde el pavimento de granito. Este pozo ha estado oculto casi 300 años; desde 1630 hasta que fue descubierto en la investigación arqueológica del año 2005, quedando a ras del piso de losas graníticas. En su interior se colocaron las dos bombas eléctricas que impulsan diariamente el agua hacia el pozo del claustro, para el riego del jardín, manteniendo así el nivel freático por debajo del suelo de la catedral. En una inspección realizada en mayo de 2016, el nivel se encontraba a 0,95 m por debajo del suelo de la cripta. Al conjunto podría muy bien denominarse como un pozo-aljibe.

Pozo 3: en la Panda Norte del Claustro

Al comienzo del siglo XIII se inician las obras del levantamiento de la panda norte del claustro (pared sur de la catedral), trazada en simetría con el muro norte de la catedral. La tradición asegura que cuando se están realizando los cimientos se ven sorprendidos por una poderosa vena de agua que obligó al maestro de obras a variar el curso de los cimientos, llegándose incluso a paralizar las obras para obviar la surgencia de agua, finalizando así el muro con asimetría, que es observable en la actualidad. Según Rodríguez Almeida (1974), arqueológicamente se han podido situar los dos pozos que se encuentran en el templo desde su construcción (pozos 1 y 3). En relación con el pozo 3 existen referencias documentadas de su existencia en la localización de los enterramientos "*en derecho del pozo, cerca del pozo, en la claustra*" y su situación nos lleva a pensar que la oblicuidad respecto al eje longitudinal del muro sea necesaria para evitar la cimentación de dicho muro encima del pozo (Benito, 2011).

El pozo 3 se sitúa en el extremo oriental de la panda norte del claustro, entre dos arcosolios de piedra de granito gris. Sobre el actual enlosado se encuentra una portezuela metálica que da acceso al pozo. Tiene una profundidad total de unos 6 m. El brocal interior del pozo se desarrolla entero en morfología circular que va aumentando de diámetro. El primer tramo (0,62 m de diámetro) está construido con sillares de granito gris perfectamente labrados y careados adaptados a la curvatura. A los 1,62 m de profundidad aparece el segundo tramo (de 0,95 m de diámetro) con fábrica de bloques irregulares de granito. A los 3 m de profundidad se alcanza el nivel freático, dando paso a una estructura irregular semicircular (con 1,20 m de ancho máximo). En el fondo puede haber unos 0,5 m de lodos.

Pozo 4: en la Capilla de San Segundo

La capilla fue construida entre 1595 y 1602 por el arquitecto Francisco de Mora para cobijar los restos de San Segundo y, al igual que la de los Velada, se construye adosada a la muralla.

El pozo se sitúa junto a la pilastra que sujeta la cúpula de la cabecera, en el muro norte. En la actualidad se encuentra oculto bajo el entarimado de la capilla, con una profundidad de 3,35 m. Bajo una tapa circular de 0,5 m de diámetro, presenta dos tramos claramente diferenciados. El primer tramo, de 1,60 m de profundidad, tiene planta rectangular (de 0,46 x 0,33 m) con fábrica de sillería de granito pardo trabado en seco con ripios del mismo material. El segundo tramo alcanza 1,75 m, se ensancha hasta 1,10 m y pasa a una sección triangular de bloques irregulares de granito de diferentes tamaños.

Se desconoce la fecha de realización, aunque se supone que fue durante la construcción misma de la capilla. Aparicio (2010) entiende que podría ser anterior, si se atiende a la tradición oral que narra: "*en la capilla de San Segundo existe un pozo con agua permanente que*

en otros tiempos surtía del líquido elemento a los guardas y sus familias que tenían su casa próxima a la capilla; y además surtía de agua al Pilón de las Bestias, que se ubicaba debajo del Mercado Grande". Se sabe que en la segunda mitad del siglo XVI se emprenden las obras de desagüe de la fuente del Pilón de las Bestias. En la intervención arqueológica que se hizo en el Mercado Grande en 2002 se han descubierto varias atarjeas que apuntan en dirección al citado pilón y que podrían enlazar con la parte alta de la calle San Segundo y la capilla.

Pozo 5: en la Sacristía del Sagrado Corazón

No se tienen datos finales de sus características, solo su situación.

Pozo 6: en la parcela al sur de los corrales

Este pozo es el único fuera del ámbito cultual de la catedral pues se encuentra al sur de los Corrales o patio no edificado de la catedral, en un pequeño patio porticado que linda al oeste con la calle Cruz Vieja, donde vivieron canónigos y servidores de la catedral desde el siglo XIV. Actualmente este espacio está habilitado como una terraza de verano. Se trata de un pozo de almacenamiento que debió contener agua pero que, en el año 2006, momento de su descubrimiento por D. Vicente Aparicio, Canónigo Administrador de la Catedral, estaba seco. Aparece primero un brocal redondo de piedra y debajo una pieza cuadrangular de granito que tapa el brocal interior, que da acceso al pozo, de 6 m, dividido en tres tramos: el primero de planta pseudocircular el segundo con planta cuadrangular y el tercer tramo está formado por un par de elementos arquitectónicos en granito gris, reutilizados, cuya función es servir de apoyo a la construcción del brocal.

SIGNIFICADO HIDROGEOLÓGICO

Una de las leyendas populares de Ávila asegura que debajo del suelo de la catedral existe una laguna, hecho sorprendente teniendo en cuenta que la catedral se encuentra en lo más alto de una colina. Posiblemente, la cripta de los Velada sea el origen de esta leyenda, pues ha estado con agua casi 300 años, de ahí la costumbre de los niños abulenses de tirar piedrecitas por la ventana para oír el ruido que hacían al chocar contra el agua, sacando la conclusión errónea de que debajo de la catedral había una laguna.

Efectivamente, la catedral no se encuentra sobre ninguna laguna; se encuentra, al igual que el resto de la ciudad, sobre un substrato granítico que presenta una zona de alteración superficial generada por arenitización, es decir por la meteorización que sufren los granitos. Esta zona de alteración da lugar a una acumulación de fragmentos angulosos de cuarzo, de grano grueso (tamaño arena o grava), denominada *lehm* granítico, que constituyen un acuífero superficial de muy escaso espesor, de unos 4 metros de espesor medio en la zona, pero de gran extensión superficial y que, desde el punto de vista hidrogeológico, se comporta como un acuífero detrítico libre de notable permeabilidad, susceptible de almacenar agua subterránea y proveer pozos someros.

En profundidad, el granito va perdiendo permeabilidad a medida que desaparece la alteración, hasta que, en la roca inalterada, la circulación de las aguas subterráneas se restringe únicamente a favor de la red de fracturas presentes en el batolito granítico, pudiendo entonces estar el agua subterránea a presión, confinada por el propio granito inalterado o por intrusiones de diques impermeables, ya que éstos a su vez también pueden funcionar a veces como pantallas impermeables.

Así, puede decirse que en la catedral nos encontraríamos con dos tipos de pozos, aquellos que se encuentran sobre el acuífero superficial de arena granítica, en los que el agua mana lentamente y no ofrecen grandes caudales, y aquellos otros, más profundos, en los que, además del acuífero superficial, interceptan alguna fractura o zona de fracturas. Los pozos 2 y 3 estarían claramente dentro de éstos últimos, y posiblemente también el pozo 1 en el que se interpreta que la galería horizontal estaría excavada a favor de una fractura. El pozo 2 interceptaría el nivel freático en alguna zona de fracturación más intensa, posiblemente cercana a un dique de roca ígnea que actuaría como represa del agua subterránea, lo que condiciona la inundación de la cripta. El pozo 3 también interceptó una fractura, como se deduce de los textos históricos que aseguran que durante la construcción de la panda norte se vieron sorprendidos por una poderosa vena de agua que obligó al maestro de obras a variar el curso de los cimientos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a D. José María González Sierra, sacristán de la catedral de Ávila, por su gentileza al proporcionar la información disponible de los pozos de la catedral y permitir la visita e inspección de los mismos.

REFERENCIAS

Álvarez Alonso, M., Cámara Gómez, A. y Álvarez Alonso, M.D. (1991): Levantamiento planimétrico de la Catedral de Ávila/España. *Informes de la Construcción*, 43 (416), noviembre/diciembre, en http:// informesdelaconstruccion.revistas.csic.es.

Aparicio González, V. (2010): Secretos de la catedral. *Diario de Ávila*, 14, 21, 28 de noviembre y 5 de diciembre.

Benito Pradillo, M.A. (2011): *La Catedral de Ávila: evolución constructiva y análisis estructural*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 739 p. Madrid.

Rodríguez Almeida, E. (1974): *Ensayo sobre la evolución arquitectónica de la catedral de Ávila*, Caja de Ávila, Ávila. ISBN 978-84-500-1218-7.

Tello Martínez, J. (2001): *Cathalogo sagrado de los obispos de Ávila, 1788*. Ed. Institución Gran Duque de Alba. Diputación Provincial de Ávila. Ávila.

Resultados preliminares sobre la relación hidrogeológica entre acuíferos mediante el análisis de los isótopos estables $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$. Sistemas jurásicos y cretácicos de la Sierra de Segura. SE de España.

Preliminary results on the hydrogeological relationship between aquifers through the analysis of stable $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ isotopes. Jurassic and cretaceous systems of the Sierra de Segura. SE Spain.

A.L. Morales-González [1], J. Jódar-Bermúdez[2], A. González-Ramón[2], F. Moral-Martos[3], R. Jiménez-Espinosa [1] y F. Gázquez[4]

[1] Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Experimentales. UJA. 23071 Jaén. lmorales@ujaen.es, respino@ujaen.es

[2] Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC): j.jodar@igme.es, antonio.gonzalez@igme.es

[3] Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Área de Geodinámica Externa. UPO. 41013 Sevilla. fmormar@upo.es

[4] Departamento de Biología y Geología, Área de Geodinámica Externa. UAL. 04120 Almería. f.gazquez@ual.es

Palabras clave: Isótopos estables, área de recarga, acuífero, Prebético Interno.

Resumen: El área de estudio se localiza al NE de la provincia de Jaén, en la Sierra de Segura, dentro del dominio Prebético Interno de la Cordillera Bética. Los afloramientos carbonáticos jurásicos y cretácicos se encuentran asociados a dos sistemas acuíferos. Entre ambos, se localizan niveles de menor permeabilidad asociados al Cretácico Inferior, como las Facies Utrillas, formadas por arenas, arcillas y margas, además de niveles de margas y margocalizas. Con el fin de determinar la posible transferencia de recursos entre los acuíferos objeto de estudio (jurásico y cretácico), se han analizado los isótopos estables $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la molécula del agua tanto de las aguas subterráneas (450 muestras) como de las de precipitación (470 muestras) para el periodo mayo 2020 - octubre 2023. Los resultados preliminares muestran que los manantiales asociados al sistema jurásico presentan alturas de recarga superiores a su cota de afloramiento, mientras que los puntos de descarga subterránea relacionados con los materiales cretácicos muestran cotas en consonancia con los afloramientos de dicha formación. Estos datos son indicativos de la existencia de posibles transferencias entre los dos acuíferos a través de los materiales de baja permeabilidad produciendo así una recarga constante del acuífero jurásico.

Abstract: The study area is located in the NE of the province of Jaén, in the Sierra de Segura, within the Internal Prebetic domain of the Betic Cordillera. The jurassic and cretaceous carbonate outcrops are associated with two aquifer systems. In between, there are levels of lower permeability associated with the Lower Cretaceous, such as the Utrillas Facies, formed by sands, clays and loams, as well as levels of loams and marlstones. In order to determine the possible transfer of resources between the aquifers under study (jurassic and cretaceous), the stable $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ isotopes of the water molecule have been analysed for both groundwater (450 samples) and precipitation (470 samples) for the period May 2020 - October 2023. Preliminary results show that springs associated with the jurassic system show recharge altitude above their outcrop elevation, while groundwater discharge points associated with cretaceous materials show elevations in line with the outcrops of the jurassic system. These data are indicative of the existence of possible transfers between the two aquifers through the low permeability materials, thus producing a constant recharge of the jurassic aquifer.

Referencias

García-Hernández, M., 1978. *El Jurásico terminal y el Cretácico inferior en las Sierras de Cazorla y Segura (Zona Prebética)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 344 p.

Moral, F., (2005). *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral, Univ. Pablo de Olavide, Sevilla, 580 p.

Morales González A. L., Jiménez Espinosa R. & Jiménez Millán J. (2018). *Simposio Andaluz del Agua, 659-669.*

Modelización numérica de la intrusión marina bajo escenarios de cambio climático. Caso de estudio: el acuífero de la Plana de Castellón (España)

Numerical modelling of seawater intrusion in response to climate change scenarios. Case study: the Plana de Castellón aquifer (Spain)

A. Renau-Pruñonosa[1,2], B. R. Almazán[3], M.V. Esteller[3]

1 Dpto. Botánica y Geología, Facultad de Biología, Universitat de València ,46100, Burjassot (Valencia). arianna.renau@uv.es
2 Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas, Universitat Jaume I, 120071, Castelló.
3 Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA). Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Atlacomulco km. 14.5. 50200, Toluca, México.

Palabras clave: Intrusión marina, *upconing*, acuífero detrítico, cambio climático, modelización numérica

Resumen

En las regiones costeras, el agua subterránea suele ser el único recurso de agua dulce disponible, por lo que es esencial saber cómo responderá al cambio climático (Schorpp et al., 2023). En estas áreas, la intrusión marina es uno de los procesos naturales que se intensifica por la sobreexplotación del acuífero y el cambio en los patrones de precipitación y temperatura. Esta investigación se ha centrado en el estudio de la dinámica de la intrusión marina y *upconing* en el acuífero de la Plana de Castellón. Se ha construido y calibrado un nuevo modelo numérico de flujo y transporte en Visual MODFLOW-SEAWAT, que simula dos escenarios de cambio climático del 2015 al 2050 (SSP1-2.6 y SSP5-8.5, Copernicus, 2021) sobre las precipitaciones (pp) y temperaturas. Los resultados mostraron la respuesta del acuífero en términos de flujo y concentración de Sólidos Totales Disueltos (TDS) en estado transitorio, estableciendo la evolución de la intrusión marina y el *upconing*. El resultado obtenido durante el periodo de estudio muestra un descenso de los valores de TDS de 3.400 mg/L a 2.000 mg/L y retroceso del *upconing* debido a los patrones de precipitaciones que durante el periodo de estudio no varían, o ascienden ligeramente. (Copernicus, 2021).

Abstract

In coastal regions groundwater is often the only freshwater resource available, so it is essential to know how it will respond to climate change (Schorpp et al., 2023). In these areas, seawater intrusion is one of the natural processes that is intensified by the overexploitation of the aquifer and change in precipitation and temperature patterns. This research has focused on the study of the dynamics of a marine intrusion and *upconing* process in the Plana de Castellón aquifer. A new numerical flow and transport model has been built and calibrated in Visual MODFLOW-SEAWAT simulating two climate change scenarios from 2015 to 2050 (SSP1-2.6 and SSP5-8.5, Copernicus, 2021) on available future precipitation (pp) and temperatures. The results showed the response of the aquifer in terms of flow and concentration of Total Dissolved Solids (TDS) in a transient state, establishing the evolution of marine intrusion and the upconing process. The result obtained during the study period shows a decrease in TDS values from 3400 TDS values mg/l to 2000 mg/l and the upconing regression to the coastline, due to rainfall patterns that do not vary during de study period or the pp rise slightly (Copernicus, 2021)

Referencias

Copernicus (2021). CMIP6 climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) *Climate Data Store (CDS).* *https://climate.copernicus.eu/climate-projections*. DOI: 10.24381/cds.c866074c

Schorpp, L., Dall'Alba, V., Renard, P., Lanini, S., & Caballero, Y. (2023). Hydrogeological modeling of the the Roussillon coastal aquifer (France): stochastic inversion and analysis of future stresses. *Environmental Earth Sciences*, 82, 201 DOI:1007/s12665-023-10877-4

Caracterización hidrogeoquímica preliminar del agua subterránea en el entorno de la laguna de Zóñar (Aguilar de la Frontera, Córdoba)

Preliminary hydrogeochemical characterization of groundwater in the surroundings of Zóñar lake (Aguilar de la Frontera, Córdoba)

A. Palomino Gómez[1], M. Mudarra Martínez[1], J.M. Gil Márquez[1] y B. Andreo Navarro[1]

1 Centro de Hidrogeología y Departamento de Geología de la Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias. 29071, Málaga
adrianpalomino98@uma.es; mmudarra@uma.es; josemgil@uma.es; andreo@uma.es

Resumen: Los Complejos Caóticos Subbéticos (CCS) constituyen una franja plurikilométrica de afloramientos arcilloso-evaporíticos del Trías Superior (Keuper), situados al sur de la depresión del Guadalquivir, que engloban un conjunto desorganizado de materiales de edad comprendida entre el Triásico y el Mioceno con comportamiento hidrogeológico acuitardo. Los procesos de disolución de las evaporitas dan lugar a formas kársticas, como depresiones ocupadas por humedales, conductos kársticos subterráneos y manantiales. Los datos piezométricos y la información hidrogeoquímica ponen de manifiesto la existencia de flujos subterráneos en los que las aguas adquieren progresivamente mayor conductividad eléctrica (desde 0,63 hasta 184 mS/cm) por la disolución de los materiales evaporíticos triásicos y sus facies se van modificando desde bicarbonatadas, en los puntos de mayor cota, a sulfatadas y por último cloruradas en las surgencias salinas más bajas. La mayor temperatura del agua registrada en surgencias ubicadas a menor cota sugiere relativa profundidad en los flujos subterráneos. El carácter permanente de la laguna de Zóñar está influenciado por el aporte subterráneo que recibe de las formaciones geológicas existentes al E y S.

Palabras clave: Complejo Caótico Subbético, hidrogeoquímica, flujo subterráneo, disolución, laguna

Abstract: *The Subbetic Chaotic Complexes (CCS) are constituted by a kilometer-long strip of clayey-evaporitic outcrops of Upper Triassic (Keuper) age located at the south of the Guadalquivir depression. They include a disorganized group of rocks formations from Triassic to Miocene age with aquitard hydrogeological behaviour. The dissolution processes of the evaporites give rise to karstic forms, such as depressions occupied by wetlands, subterranean karstic conduits and springs. The piezometric contours and the hydrogeochemical information show the existence of groundwater flow paths through which the waters acquire progressively higher electrical conductivity values (from 0.63 to 184 mS/cm) due to the dissolution of the Triass evaporitic rocks, and their facies are modified from bicarbonate, in the higher elevations, to sulphate and finally chloride in the saline springs at lower elevations. The high temperature observed in the lower elevation springs suggests deep groundwater flows. The permanent character of the Zóñar lake is influenced by the subterranean contribution it receives through from the formations located at E and S.*

Key words: *Subbetic Chaotic Complex, hydrogeochemistry, groundwater flow, dissolution, wetland*

INTRODUCCIÓN

Los Complejos Caóticos Subbéticos (CCS) de la Zona Externa de la Cordillera Bética afloran, según dirección SO-NE, a lo largo de una franja de 300 km de longitud en la zona central de Andalucía, en la cuenca del Río Guadalquivir (Fig. 1). En conjunto, se trata de una megabrecha con estructura interna caótica, en la que hay un amplio predominio de litologías triásicas de facies germano-andaluza (arcillas, evaporitas, carniolas, ofitas, areniscas, etc.), pero que contiene, además, olistolitos y bloques de otros materiales (calizas, dolomías, margas, areniscas) pertenecientes a diferentes edades, a veces incluidos en sedimentos del Mioceno (Vera y Martín-Algarra, 2004). A escala regional, los CCS se comportan hidrogeológicamente como un acuitardo, debido al predominio de materiales de baja permeabilidad. Sin embargo, la existencia de enclaves evaporíticos (yeso y halita), más solubles que las rocas carbonáticas, así como la concurrencia de movimientos halocinéticos y de los sistemas de fracturas asociados (Calaforra y Pulido-Bosch, 1999), han favorecido localmente los procesos de disolución y karstificación, y los respectivos aumentos de la porosidad y permeabilidad secundaria. Como consecuencia de ello se han originado redes de conductos kársticos altamente inestables, cuyo colapso y hundimiento condicionan la génesis y la evolución de formas típicas del modelado exokárstico, como las áreas endorreicas. Algunas de estas depresiones pueden inundar de manera más o menos permanente, lo que da lugar a la formación de humedales (Gil-Márquez, 2018). La relación de estos espacios con las aguas subterráneas condiciona en gran medida el funcionamiento hídrico y el hidroperiodo de cada humedal, así como las propiedades físico-químicas de sus aguas (Linares, 2008; Andreo et al., 2016; Gil-Márquez, 2018).

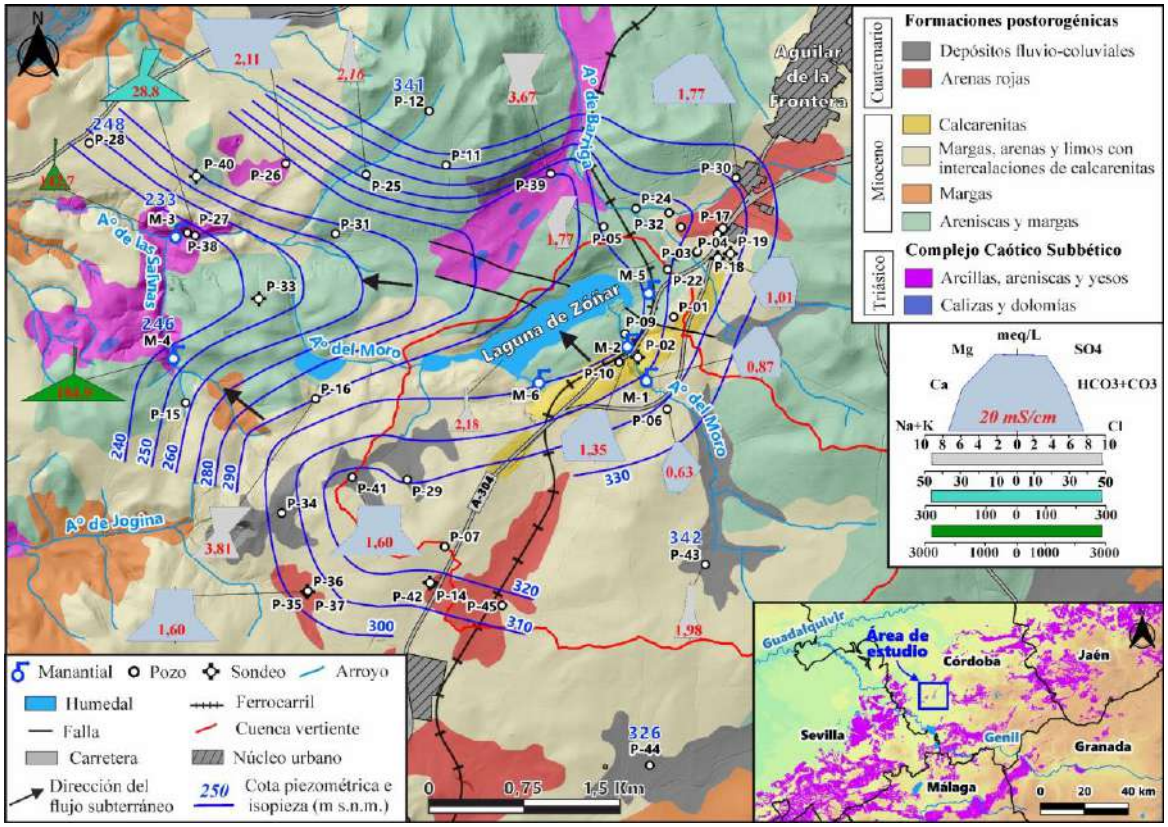


FIGURA 1. *Ubicación del área de estudio y los CCS en la depresión del Guadalquivir y mapa hidrogeológico del entorno de la laguna de Zóñar donde se representan los diagramas de Stiff, el esquema piezométrico y la dirección del flujo subterráneo.*

Uno de los humedales más relevantes situados en este contexto es la laguna de Zóñar (Aguilar de la Frontera, Fig. 1), ubicada en la campiña cordobesa y declarada Reserva Natural por la Junta de Andalucía. La relación de esta laguna con las aguas subterráneas se ha descrito anteriormente en diversos estudios hidrogeológicos (Moya, 1988; ADARO, 1989; Recio y Espejo, 2008; Rodríguez et al., 2010). Sin embargo, aún no se ha determinado la influencia de dicha relación en los procesos que condicionan las características hidrogeoquímicas de las aguas o la continuidad del flujo subterráneo más allá de la laguna. El objetivo de este trabajo es, precisamente avanzar en la comprensión del funcionamiento hídrico de la laguna de Zóñar e identificar los procesos hidrogeoquímicos que condicionan la mineralización de sus aguas.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La laguna de Zóñar (295 m s.n.m.) se localiza en el tercio suroccidental de la provincia de Córdoba, a 4,5 km al SO del núcleo urbano Aguilar de la Frontera (Fig. 1). Se trata de un humedal permanente, de 37 ha de superficie, con una morfología alargada en dirección NE-SO y una profundidad máxima de columna de agua de 16,67 metros (CMA, 1985; 2022). La cuenca vertiente al humedal (10,05 km^2) se extiende hacia el S y E sobre una zona de pendiente suave y relieve alomado. Tanto la carretera A-304 (Aguilar de la Frontera-Puente Genil) como la línea de ferrocarril Córdoba-Málaga discurren por el borde sur y oriental de la laguna. Al O del humedal, la topografía es más abrupta y se localizan las cotas más bajas del ámbito de estudio, coincidentes con el Arroyo de las Salinas (Fig. 1). En la zona existen otras áreas encharcadizas de inundación temporal. El clima de la región es de tipo Mediterráneo, con valores medios anuales de precipitación y temperatura (periodo 1985-2022) de 530 mm y 16ºC, respectivamente, mientras que la evapotranspiración potencial media anual varía entre 800 y 900 mm (CMA, 1985; 2022).

En la región predominan margas y areniscas de edad Mioceno, que reposan de manera discordante sobre los materiales de los CCS, cuyos principales afloramientos están al N y O de la laguna (Fig. 1). El Mioceno inferior está formado por margas y arenas principalmente, con escasa permeabilidad, lo que le confiere características de acuitardo. En cambio, las calcarenitas del Mioceno superior constituyen la formación acuífera principal de la zona. Estas afloran en el sector meridional de la laguna, donde se ubican los manantiales de Arroyo del Moro (M-1) y Fuente de Zóñar (M-2). Los depósitos cuaternarios más abundantes son arenas rojas, de espesor reducido, formadas por procesos de disolución-karstificación-acumulación. En el fondo de las áreas endorreicas y en las inmediaciones de los cauces se pueden identificar gravas, arenas y arcillas, de interés hidrogeológico reducido, pese a su permeabilidad, por presentar espesor y extensión limitados.

METODOLOGÍA

Se ha llevado a cabo un reconocimiento geológico del ámbito de estudio y una actualización del inventario de puntos de agua. En total, se han contabilizado 37 pozos y 8 sondeos en los que se han realizado medidas del nivel piezométrico. A partir de esta información se han trazado las líneas isopiezas orientativas de la figura 1 (otoño 2023). De manera simultánea a las medidas de nivel piezométrico, se tomaron muestras de agua y se realizaron medidas *in situ* de parámetros físico-químicos (conductividad eléctrica -C.E.- y temperatura del agua) mediante un equipo de la marca WTW (modelo 3310). Las concentraciones de los iones mayoritarios y alcalinidad de las muestras de agua procedentes de 28 captaciones, además de la laguna y de los manantiales, se determinaron mediante cromatografía iónica en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de (CEHIUMA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra la distribución espacial de las isopiezas (octubre de 2023) junto con los diagramas de Stiff. Las isopiezas presentan valores comprendidos entre 330 y 240 m s.n.m y parecen estar condicionadas por la topografía. Los flujos de agua subterráneas se producen desde las zonas situadas a mayor altitud hacia la laguna y los cauces y arroyos situados al O de ella. En este contexto, el humedal se encontraría en una situación de tránsito respecto a los flujos subterráneos, con aportaciones por sus bordes oriental y suroriental, donde se hallan las calcarenitas, y descargas en los bordes opuestos. El aporte regular de agua subterránea, junto con la dimensión y profundidad de la cubeta, incide en el funcionamiento hídrico de la laguna y le confieren a esta un carácter permanente.

El funcionamiento hidrodinámico deducido más la variabilidad de litologías en el entorno de la laguna de Zóñar condiciona las características físico-químicas de las aguas y su evolución espacial (Fig. 1). En general, se aprecia un aumento progresivo de la mineralización según el sentido del flujo subterráneo, desde 0,63 mS/cm (P-06) hasta 184,9 mS/cm (M-04). Los valores más bajos de C.E. han sido registrados en los sondeos (P-06, P-18) y en los manantiales (M-1 y M-2) asociados a las calcarenitas miocenas. Sus aguas presentan facies que varían entre bicarbonatada-cálcica (P-06), sulfatada-clorurada cálcica (M-1) y clorurada sódica-cálcica (M-2) (Figs. 1 y 2). Existen otros 2 manantiales asociados a las calcarenitas, actualmente secos, en la orilla meridional de la laguna: Fuente Escobar (M-5) y Fuente de los Eucaliptos (M-6). Datos bibliográficos describen sus aguas con valores de mineralización en torno a 1 mS/cm y facies mixtas (Rodríguez et al., 2010).

Por su parte, el agua de las captaciones ubicadas en las margas del Mioceno inferior es ligeramente más mineralizada. Muestra un rango de C.E. comprendido entre 1,6 y 3,81 mS/cm y facies de tipo mixta: sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica (Figs. 1 y 2). Los puntos P-39, P-33 y P-26 presentan facies sulfatadas cálcico-magnésicas, mientras que P-15 y P-16 muestran facies sulfatadas sódicas.

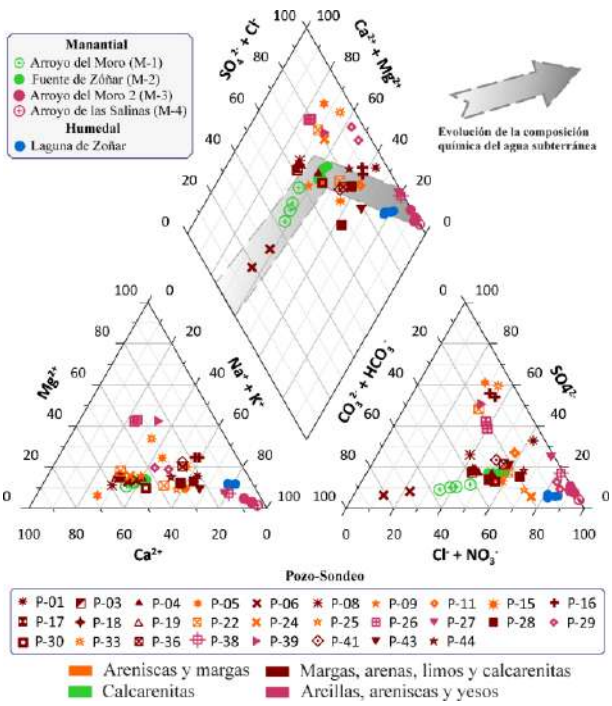


FIGURA 2. *Diagrama de Piper en el que se representa la composición y evolución química de las muestras y la litología a la que se asocian*

Los valores de CE medidos en el agua de la laguna de Zóñar (1,95 a 2,35 mS/cm) serían coherentes con la existencia de flujos subterráneos procedentes de las margas del Mioceno inferior que rodean buena parte del humedal. Este rango de CE también se podría atribuir a procesos de evapoconcentración, ya que desde el periodo de investigación se ha observado un descenso progresivo del nivel de lámina de agua y simultáneamente un ascenso de la CE. Recio y Gómez (2008) interpretaron una continuidad de las calcarenitas bajo la cubeta de la laguna, lo que podría indicar un aporte subterráneo adicional a través de estas. En general, el aporte subterráneo representa un 25% del aporte total de la laguna y supone un desfase de 2 años desde la infiltración en las calcarenitas y la descarga en los manantiales (Rodríguez et al., 2010). Sin embargo, el agua del humedal presenta facies clorurada sódica. Según Moya (1988) atribuye esto a los procesos de disolución de los materiales evaporíticos que conforman el vaso lagunar y dan lugar a mayores concentraciones de Na^+ y Cl^-. Los valores de temperatura superficial del agua de la laguna muestran gran variabilidad, con valores comprendidos entre los 19,70 y 31,82 ºC.

Finalmente, hacia el Oeste, donde se encuentran los arroyos de las Salinas (M-4) y del Moro (M-3), las cotas piezométricas son más bajas y las aguas presentan los valores de mineralización y temperatura más elevados medidos en el ámbito de estudio (Fig. 1). Tanto el agua de las surgencias M-3 y M-4 como en los pozos P-27 y P-38, que también captan de los CCS, muestran facies cloruradas sódicas (Fig. 2). Estos valores de salinidad tan elevados, junto con la alta concentración de los iones de

Na^+ y Cl^- y la presencia de precipitados salinos, ponen de manifiesto la existencia de flujos subterráneos en contacto con halita, de largo recorrido y tiempo de residencia, al igual que los descritos en otros enclaves de los CCS (Gil-Márquez, 2018). Con respecto a la temperatura, se ha registrado un aumento a medida que desciende la cota de las surgencias. En M-1 y M-2 se han obtenido valores medios de 18,25 y 18,58 ºC respectivamente. Sin embargo, en M-3 y en M-4 se han obtenido los mayores valores de temperatura del agua, (20 y 26,35ºC, respectivamente), superiores a la temperatura media anual del aire de (16ºC), lo que indica un termalismo asociado a flujos profundos.

CONCLUSIONES

Los resultados expuestos en este trabajo aportan información sobre las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas en el entorno de la laguna de Zóñar y el papel de estas en el funcionamiento hidrológico del humedal. Pese a la complejidad hidrogeológica que suponen los CCS y las formaciones postorogénicas suprayacentes, ha podido deducirse una evolución hidroquímica espacial del agua subterránea condicionada, además de por la litología y la interacción agua-roca, por el sentido general E - O de los flujos subterráneos, desde los puntos situados a mayor cota piezométrica (áreas de recarga) hasta los cauces en los que se encuentran las surgencias hipersalinas (zonas de descarga). Las aguas adquieren progresivamente valores más elevados de mineralización (desde menos de 1 a 185 mS/cm) y temperatura (de 18 a 26 ºC), y sus facies evolucionan de bicarbonatadas cálcicas a sulfatadas mixtas y, por último, a cloruradas sódicas, en concordancia con el modelo regional de flujo. Las propiedades hidráulicas de los materiales, unidas a condiciones -longitud y profundidad- en las que se produce el flujo subterráneo determinan el tiempo de residencia del agua en el medio subterráneo y, por tanto, los procesos hidrogeoquímicos que experimentan las aguas subterráneas.

La laguna de Zóñar se comportaría en este sistema hidrogeológico como un humedal de tránsito, en el sentido expuesto por Andreo et al. (2016). Recibiría aportes subterráneos procedentes de las formaciones geológicas situadas al E y S del humedal. En su extremo occidental, se produciría infiltración. Al oeste, tendría lugar la descarga natural del sistema, por los manantiales salinos.

Las conclusiones obtenidas en este trabajo son un ejemplo de la relación existente entre humedales y aguas subterráneas. Los humedales son ambientes sensibles, que están condicionados por el medio, y cualquier cambio en este provoca alteraciones tanto en su régimen hídrico como en sus características químicas y ecológicas. Los estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, entre otros, cobran especial importancia ya que permiten definir de manera más precisa, modelos conceptuales del funcionamiento hidrológico de los humedales y consecuentemente elaborar políticas de gestión para estos ecosistemas que actualmente se encuentran gravemente afectados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del programa Andalucía INVESTIGO (P20_01118), financiado por la Unión Europea-Next Generation UE. Se ha realizado en el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). Se agradece el apoyo y colaboración del Patronato de las Lagunas del Sur de Córdoba.

REFERENCIAS

ADARO (1989). Estudio Hidrogeológico de la Laguna de Zóñar. Empresa nacional Adaro e Investigaciones Mineras, S.A.

Andreo, B., Gil-Márquez, J. M., Mudarra, M., Linares, L., & Carrasco, F. (2016). Hypothesis on the hydrogeological context of wetland areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaén provinces, Southern Spain). Environmental Earth Sciences, 75, 1-19.

Calaforra, J. M., & Pulido-Bosch, A. (1999). Gypsum karst features as evidence of diapiric processes in the Betic Cordillera, Southern Spain. Geomorphology, 29(3-4), 251-264.

CMA (1985 a 2022). Memoria Anual de las Actuaciones en las reservas y parajes naturales de las zonas húmedas del sur de Córdoba. Año 1985 a 2022. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Inédito.

Gil Márquez, J.M. (2018). Caracterización hidrogeológica de humedales y manantiales salinos asociados a acuíferos kársticos evaporíticos del sector central del subbético. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.

Linares, L. (2008): Lagunas y humedales andaluces relacionados con surgencias. En: Manantiales de Andalucía (A. Castillo, coord.). Agencia Andaluza del Agua, Junta de Andalucía, Sevilla, 153-167.

Moya, J.L. (1988). Hidrogeología de las zonas Húmedas del Sur de la provincia de Córdoba. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, 278 páginas.

Recio Espejo, J. M., & Gómez Romero, D. (2008). Laguna o Lago de Zóñar (Aguilar de la Frontera, Córdoba): consideraciones sobre su génesis reciente.

Rodríguez-Rodríguez, M., Martos, F. M., & Jiménez, M. B. (2010). Caracterización del funcionamiento hidrológico de la laguna de Zóñar (Andalucía, España). Implicaciones de la extracción de aguas subterráneas en la evolución del nivel de agua. Geogaceta, (48), 135-138.

Vera, J. A., Martín-Algarra, A., Sánchez-Gómez, M., Fornós, J. J., & Gelabert, B. (2004). Cordillera Bética y Baleares. Geología de España, 347-464.

Uso de imágenes termográficas obtenidas mediante dron en la caracterización de la dinámica del aire en sistemas kársticos.

Application of UAV-derived thermographic imaging in characterizing airflow dynamics in karst systems.

J. L. Yanes[1], F. Moral[1], M. Vélez-Nicolás[2], S. García-López[2], L. Barbero[2].

1 Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Ctra. Utrera km 1, 41013 Sevilla.
jlyancon@upo.es, fmormar@upo.es
2 Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, Avda. República Saharaui s/n 11510 Puerto Real (Cádiz)
mercedes.velez@uca.es, santiago.garcia@uca.es, luis.barbero@uca.es.

Palabras clave: sistemas kársticos, ventilación, CO_2, termografía, dron.

Resumen

La dinámica del aire en sistemas kársticos determina, en buena medida, la hidrogeoquímica del agua subterránea o la intensidad del proceso de karstificación (e.g., Yanes y Moral, 2023), ya que los patrones de ventilación influyen significativamente en la circulación y almacenamiento del CO_2 en estos sistemas. Dado que el aire de la zona vadosa presenta una temperatura casi constante a lo largo del año, es posible detectar las salidas de aire del karst por el contraste térmico con el aire exterior, especialmente en los periodos de temperaturas ambientales extremas. El uso de ortoimágenes infrarrojas térmicas (TIR), constituye una herramienta especialmente útil en la caracterización geomorfológica y estructural o la identificación de cuevas en terrenos kársticos (e.g., Pérez-García *et al.*, 2018). En este trabajo se presenta una metodología basada en el tratamiento digital de imágenes TIR de alta resolución, obtenidas desde UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) en el afloramiento calizo del Peñón del Berrueco, al sur de la sierra de Ubrique (Cádiz y Málaga). Se expone la instrumentación utilizada, la planificación en la adquisición de datos, el flujo de trabajo en el procesamiento y los resultados obtenidos. El análisis de las imágenes ha permitido relacionar anomalías térmicas con salidas de aire que podrían permitir la caracterización del patrón de ventilación estacional a escala de sistema.

Abstract

Airflow dynamics in karst systems largely determine groundwater hydrogeochemistry or karstification process intensity (e.g., Yanes and Moral, 2023), as ventilation patterns significantly influence CO_2 circulation and storage in these systems. Since the air in the vadose zone has an almost constant temperature throughout the year, it is possible to detect karst air outlets by the thermal contrast with the external air, especially in periods of extreme ambient temperatures. The use of thermal infrared (TIR) orthoimages is an especially useful tool in the geomorphological and structural characterization or identification of caves in karst terrains (e.g., Pérez-Garcia et al., 2018). This study presents a methodology based on the digital processing of high-resolution TIR images, acquired using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) over the limestone outcrop of Peñón del Berrueco, to the south of the Sierra de Ubrique (Cádiz and Málaga). It outlines the instrumentation used, the planning in data acquisition, the workflow in processing, and the obtained results. The analysis of the images has allowed for the correlation of thermal anomalies with air outlets that could enable the characterization of the seasonal ventilation pattern at a system scale.

Referencias

Pérez-García, J.L., Sánchez-Gómez, M., Gómez-López, J.M., Guerra, T., Gil, D. and Fernández, T. (2018). *Engineering Geology* 246, 277–287. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.09.014

Yanes, J.L. and Moral, F. (2023). *Science of The Total Environment* 907, 168141. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168141

Caracterización mineral de los residuos mineros de la presa San Quintín Oeste (Puertollano, Ciudad Real)

Mineral characterization of the San Quintin West mine tailings (Puertollano, Ciudad Real)

P. Adánez[1], J. A. Arranz-González[1], V. Rodríguez-Gómez[1] y F. J. Fernández-Naranjo[1]

1 CN Instituto Geológico y Minero de España (CSIC), Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. p.adanez@igme.es, jc.arranz@igme.es, v.rodriguez@igme.es, fj.fernandez@igme.es

Palabras clave: minería secundaria, minería de Pb-Zn, residuos mineros, San Quintín.

Resumen

Partiendo del reciente trabajo de Rosario Beltré et al. (2023) en el que se seleccionó la información composicional de 21 instalaciones mineras inventariadas por el IGME, la balsa de lodos de San Quintín Oeste resultó ser una de las más interesantes de España, desde el punto de vista del valor de los contenidos elementales que presenta. El Complejo Minero se encuentra en el Valle de Alcudia (Zona Centro Ibérica) y fue uno de los productores más importantes de Pb-Zn durante los siglos XIX y XX. La explotación se realizaba en venas con textura brechoide, siendo los minerales principales galena y esfalerita. En 1988 fue clausurada definitivamente. En este trabajo se ha estudiado la balsa de lodos de San Quintín Oeste, donde se tomó muestra en 20 puntos y además se realizó una pequeña calicata. Se han llevado a cabo análisis elementales mediante FRX e ICP-AES, además de mineralógicos con DRX y MEB con microanálisis. Los elementos principales, Pb-Zn, no solo se presentan en su forma primaria, si no que se han alterado a minerales como anglesita y cerusita, y como hemimorfita. La jarosita parece evolucionar a plumbojarosita en algunas muestras. Estos minerales se encuentran en forma tanto de impregnaciones amorfas como de agregados cristalinos o granos liberados de pequeño tamaño. En el MEB también se ha detectado una alta cantidad de barita, que generalmente aparece agregada a galena. En la calicata se interpreta cierta estratificación con el paso de anglesita en las muestras superficiales a cerusita en las más profundas.

Abstract

Based on the recent work of Rosario Beltré et al. (2023) in which compositional information from 21 mining facilities inventoried by the IGME was selected, the San Quintín West tailings dam turned out to be one of the most interesting in Spain, due to the value of its elemental contents. The Mining Complex is located in the Alcudia Valley (Central Iberian Zone) and was one of the most important producers of Pb-Zn during the 19th and 20th centuries. It was mined in brecciated veins, the main minerals being galena and sphalerite. In 1988 it was definitively closed down. In this work, the San Quintín West dam has been studied. Samples were taken at 20 points and a small test pit was also dug. Elemental analyses have been carried out by XRF and ICP-AES, and mineralogical analyses by XRD and SEM with microanalysis. The main elements, Pb-Zn, are not only present in their primary form, but have also been altered to minerals such as anglesite and cerussite, and as hemimorphite. Jarosite appears to evolve to plumbojarosite in some samples. These minerals are found both as amorphous impregnations and as crystalline aggregates or small liberated grains. In the SEM, a high amount of barite has also been detected, which generally appears aggregated with galena. In the test pit, some stratification is interpreted in the change from anglesite in the shallower samples to cerussite in the deeper ones.

Referencias

Rosario-Beltré, A., Sánchez-España, J., Rodríguez-Gómez, V., Fernández-Naranjo, F. J., Bellido-Martín, E., Adánez-Sanjuán, P. y Arranz-González, J. (2023). *Journal of Cleaner Production* 407, 137163.

Contribución del IGME a la cartografía paneuropea de los recursos minerales críticos: el proyecto GSEU.

IGME's contribution to the critical raw materials pan-european map: GSEU project.

P. Adánez[1], E. Boixereu[1], C. Fernández-Leyva[2], F.J. González[1], E. Marino[1], I. Martín-Méndez[1], V. Rodríguez-Gómez[1], S. M. Timón-Sánchez[3] y GSEU Mineral Resources team[4]

1 IGME-CSIC Ríos Rosas 23, 28003 Madrid p.adanez@igme.es, e.boixereu@igme.es, fj.gonzalez@igme.es, e.marino@igme.es, i.martin@igme.es, v.rodriguez@igme.es
2 IGME-CSIC Urb. Alcázar del Genil, Edf. Zulema Bajo, 18006 Granada c.fernandez@igme.es
3 IGME-CSIC Plaza de la Constitución, 1. 37001 Salamanca s.timon@igme.es
4 EuroGeoSurveys, Rue Joseph II, 36-38, box 7 1000 Brussels, Belgium

Palabras clave: materias primas críticas, recursos primarios, recursos secundarios, recursos submarinos, cartografía.

Resumen

El proyecto GSEU (Horizon-CL5-2021-D3-02-14) tiene como principal objetivo establecer un Servicio Geológico para Europa, como punto de entrada a una red de colaboración permanente entre servicios geológicos y organizaciones asociadas, para proporcionar a las instituciones, empresas y ciudadanos europeos información actualizada y de alta calidad sobre la tierra que se encuentra bajo nuestros pies y los recursos geológicos que alberga. Una de las principales áreas del proyecto es la dedicada a las materias primas. Su objetivo principal es reevaluar tanto los recursos minerales primarios - en los dominios terrestre y submarino- como los residuos mineros, con especial atención a las materias primas estratégicas y críticas necesarias para la transición energética, la transformación digital y el desarrollo sostenible. Para ello se está elaborando, tras la armonización de la información disponible, una completa actualización de la cartografía paneuropea de recursos minerales estratégicos y críticos. Dicha cartografía servirá de punto de partida para valorar el potencial europeo en materias primas minerales a partir de los recursos conocidos y los recursos por conocer, de una forma armonizada y estandarizada. Además, este estudio ha servido para identificar y caracterizar las lagunas en la información a nivel europeo, que permitirán proponer líneas de investigación futuras, con el fin de fortalecer el aprovisionamiento de materias primas críticas en Europa.

Abstract

The main objective of the GSEU project (Horizon-CL5-2021-D3-02-14) is to establish a Geological Service for Europe, as an entry point to a permanent collaborative network of geological surveys and partner organizations to provide European institutions, companies and citizens with high quality and up-to-date information about the earth beneath our feet and the geological resources it holds. One of the main areas of the project is dedicated to raw materials. Its main goal is to reassess both primary mineral resources - in the onshore and offshore domains - and mining waste, with a special focus on strategic and critical raw materials needed for energy transition, digital transformation and sustainable development. To this end, a complete update of the pan-European mapping of strategic and critical mineral resources is being prepared after harmonising the available information. This mapping will serve as a starting point for assessing the european potential in mineral raw materials based on known and unknown resources, in a harmonised and standardised way. In addition, this study has served to identify and characterise the gaps in the information at european level, which will allow future lines of research to be proposed, with the aim of strengthening the supply of critical raw materials in Europe.

Prospección geoquímica, experiencia metodológica en el muestreo de sedimentos fluviales activos en Ecuador

Geochemical prospecting, methodological experience in stream sediments sampling in Ecuador

F. Andrade[1] y P. Cobacango[2]

1 Instituto de Investigación Geológico y Energético. Dirección de la Innovación. Quito–Ecuador. fernanda.andrade@geoenergia.gob.ec

2 Instituto de Investigación Geológico y Energético. Dirección de Gestión de la Información. Quito–Ecuador. pablo.cobacango@geoenergia.gob.ec

Resumen: El Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), tiene como objetivo generar y promover conocimiento en el ámbito de la geología y la energía, mediante investigación científica, asistencia técnica y servicios especializados para el aprovechamiento responsable de los recursos renovables y no renovables, contribuyendo a la toma de decisiones en beneficio de la sociedad, por lo que se encuentra actualizando y completando el cartografiado geológico, geofísico y geoquímico del territorio continental ecuatoriano orientado a la caracterización litológica, mineralógica y estructural del sustrato rocoso para la identificación de ocurrencias minerales. Este documento tiene como objetivo proporcionar los procedimientos para la selección de los sitios de muestreo, la recolección de muestras de sedimentos fluviales en drenajes de primer y segundo orden, así como también el muestreo de sedimentos pesados de las muestras recolectadas en campo.

Palabras clave: anomalía, drenaje, geoquímica, muestreo, sedimento.

Abstract: *The Geological and Energy Research Institute (IIGE by its acronym in Spanish) aims to generate and promote knowledge in the field of geology and energy, through scientific research, technical assistance and specialized services for the responsible use of renewable and non-renewable resources, contributing to decision-making for the benefit of society, which is why it is updating and completing the geological, geophysical and geochemical mapping of the Ecuadorian continental territory aimed at the lithological, mineralogical and structural characterization of the rock substrate for the identification of mineral occurrences. This document aims to provide the procedures for the selection of sampling sites, the collection of river sediment samples in first and second order drainages, as well as the sampling of heavy sediments of samples collected in the field.*

Key words: *anomaly, drainage, geochemistry, sampling, sediment.*

INTRODUCCIÓN

Una base de datos geoquímicos de alta calidad es importante para una amplia gama de investigaciones en ciencias de la tierra y debe considerarse como un componente esencial del conocimiento. La metodología de muestreo y los procedimientos de control de calidad para el levantamiento geoquímico, deben ajustarse a prácticas estándares internacionales como las recogidas en Darnley et al. (1995), donde se exponen las recomendaciones para el mapeo geoquímico internacional.

En el Ecuador, se han realizado diferentes campañas de Prospección Geoquímica que datan desde los años 1968, el cual se inicia con el levantamiento de datos geoquímicos, con el muestreo de 4.635 puntos como parte del Programa de Desarrollo de la Naciones Unidas - Operación 8, donde se realizó una campaña de exploración en el noroccidente de la provincia del Azuay en los sectores de Fierro Urco y Chaucha.

En 1978, la Dirección General de Geología y Minas recopiló datos geoquímicos de 2.562 puntos con la colaboración de la Asistencia Técnica del Gobierno del Reino Unido en parte de las provincias de Tungurahua, Bolívar y Los Ríos.

En el año 1979, en el Convenio entre la Dirección General de Geología y Minas y la Comisión para el Desarrollo de las provincias del Sur (PREDESUR), se obtuvieron datos geoquímicos de 485 puntos en la provincia de Loja.

En 1984, la Dirección General de Geología y Minas con la Asistencia Técnica del Gobierno de Bélgica ejecutó el Proyecto Noroccidente orientado a las provincias del Carchi, parte de Esmeraldas e Imbabura, donde se recopilaron 822 puntos.

La compañía RTZ en 1986, procedió a realizar el re-análisis de las muestras tomadas por antiguas campañas

de exploración, dando como resultado anomalías en los ríos: Junín, Morán y Parambas.

Entre 1991 y 1997, *The Japan Internacional Cooperation & Metal Mining Agency of Japan*, realizaron estudios más detallados en Junín.

Durante el periodo de 1998 al 2000, se desarrollaron trabajos de geoquímica de sedimentos fluviales a cargo de CODIGEMM con la Misión Británica. Estos estudios cubrieron un área de 41.903 km^2 de la Cordillera Occidental, donde se tomaron 15.175 muestras, analizadas para 38 elementos, desarrollados mediante el Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental (PRODEMINCA) bajo el "Programa de Información Cartográfica y Geológica" (PICG) que comenzó en 1998 (MERNNR, 2020).

Desde el año 2013 el Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico (INIGEMM), actualmente nombrado como Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), viene ejecutando el Proyecto de "Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano", que tiene como objetivo en el componente 2: "Elaborar la carta de ocurrencias minerales y de áreas de interés geológico minero de las Cordilleras Occidental y Real y de la Zona Subandina, mediante el procesamiento de la información existente y nueva, referente a geología, geoquímica y geofísica", apoyado en la Actividad 2.3: "Levantamiento, Procesamiento e Interpretación de datos de Geoquímica, en la Cordillera Real y la Zona Subandina".

En base a las experiencias obtenidas de campañas anteriores y principalmente de PRODEMINCA, El Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) pudo adaptar una metodología normalizada, cuyos protocolos se ajustan a prácticas estándares internacionales de larga data, como se documenta en Darnley et al. (1995).

Actualmente el IIGE basado en la metodología de PRODEMINCA, ha generado procedimientos internos para la toma de muestras de sedimentos fluviales y rocas que garantizan una correcta recolección de muestras en campo.

METODOLOGÍA

El proceso de toma de muestras para análisis geoquímico debe ser previamente planificado en oficina, por tal razón, se realiza un plan de muestreo dependiendo de las características del terreno de la zona de estudio, se considera: ubicación, clima en la región, hidrografía, vías de acceso o senderos y actividad antrópica dentro del área de estudio. Una vez que estas características están definidas, se puede realizar la campaña de prospección geoquímica con la toma de muestras de sedimentos fluviales activos, teniendo en cuenta que debe ser representativa para el área de estudio seleccionada.

Durante las campañas de prospección geoquímica en campo, se accede a los ríos o drenajes de muestreo donde se procede a tomar la muestra de sedimentos en los márgenes convexos (internos) donde se acumula el material fino (Fig. 1).



FIGURA 1. *Proceso de toma de muestra de sedimentos fluviales en el afluente del Río Dué Chico (Reventador-Ecuador).*

PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

Las muestras de sedimentos de ríos se utilizan a menudo en la fase de exploración debido a su fácil procesamiento, bajo costo por unidad de área y alta confidencialidad.

El procedimiento en campo empieza con la colocación de un recipiente plástico de manera equilibrada sobre el terreno para evitar derrames de la muestra. Sobre este recipiente se coloca en columna un tamiz malla #80 (0.17 mm de diámetro de abertura) y un tamiz malla # 10 (2 mm de diámetro de abertura). Usando una pala pequeña, se recoge sedimento fluvial de al menos 4 lugares aledaños al sitio de muestreo, ubicados en los márgenes convexos del río o drenaje, para hacer un solo concertado, representativo del área investigada, luego se tamiza la muestra con agua, tomada del mismo cauce, haciéndola recircular por la columna de tamices. El sedimento retenido en los tamices es dejado reposar por un período de 20 minutos para que decante el material fino en suspensión.

El sedimento que pasa por el tamiz de malla #80, retenido en el recipiente plástico inferior debe ser homogenizado y luego cuarteado hasta obtener un peso aproximado de 300 gramos en muestra seca. La muestra final debe ser colocada en una funda Kraft identificada con el código de la muestra. El sedimento más grueso (entre 2 y 0.17 mm de diámetro) retenido en la mitad de la columna de tamices, es lavado en un platón realizando movimientos elípticos para eliminar el material liviano reteniendo el sedimento pesado (concentrado de batea), no se deberá eliminar la fracción metálica magnética. Este último, al igual que el sedimento fluvial, es guardado en fundas herméticas con su respectiva codificación para su posterior análisis (Fig. 2).

El sedimento pesado deberá examinarse con lupa y se tomará nota de los minerales de interés. En el caso de la presencia de oro se deberá contar y caracterizar las partículas en una carga de batea (puede variar entre varias pruebas). La muestra de sedimentos pesados deberá ser correctamente empacada en fundas plásticas.

La codificación de las muestras de sedimentos pesados se realizará de la misma manera que se hace para los sedimentos finos, y no incluirá ningún código especial por tratarse de muestras de sedimentos pesados. Por ejemplo: Muestra: AR1- 00001- SP1. Donde AR1 es el código asignado al técnico que realiza la toma de muestra; 00001 es el número de muestra de sedimento pesado y SP1 es la abreviación para sedimento pesado (Andrade, 2020).



FIGURA 2. *Toma de muestras de sedimentos pesados. Sector Nambija-Ecuador.*

Dentro del procedimiento para la toma de sedimentos pesados, la muestra debe ser secada y en este punto, hay varios criterios acerca de la temperatura a la que se debe realizar, en nuestro caso se considera una temperatura no mayor a 50°C, ya que no suelen haber pérdidas de metales volátiles a dicha temperatura, sin embargo, esto depende de la naturaleza del sedimento, por lo cual, se acostumbra realizar los secados de las muestras a temperaturas inferiores a 50°C. Además, se ejecuta un análisis granulométrico y de textura, con el fin de conocer la distribución de los tamaños de grano y el aporte de metales pesados. Para estos últimos se deben tener ciertas precauciones al momento de realizar el trabajo analítico a niveles de traza, porque los equipos e instrumentos usados en el laboratorio pueden llegar a ser una fuente de contaminación de las muestras analizadas. Se realiza el barrido manual observando los diferentes minerales en un microscopio estereográfico Olympus, de tal manera que se pudiera examinar toda la muestra de sedimento pesado en varias porciones sobre en una placa de acrílico transparente.

Los tipos de análisis para sedimentos fluviales realizados en laboratorio generalmente son: ensayo al fuego para determinación de oro (Au), espectrometría ICP-OES con digestión de dos ácidos para 34 elementos, espectrometría de absorción atómica por vapor frío para determinación de mercurio (Hg), espectrometría ICP-MS con fusión alcalina para determinación de tierras raras más uranio (U) y torio (Th), y espectrometría XRF con fusión alcalina para determinación de elementos mayores. Para muestras que sobrepasan el límite de medición de Au en la técnica de ensayo al fuego (> 5 ppm) se utilizan técnicas gravimétricas (Robles, 2019).

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, se realiza un tratamiento de datos geo-estadístico para elaborar mapas de concentración (anomalías) de los principales elementos metálicos y otros elementos de interés (ej., Au, Cu, Mo, Pb, Zn, Ag).

En base a lo expuesto, se pudo definir que las muestras de sedimentos fluviales deben provenir de cuencas de drenaje que no superen los 100 km^2, la densidad del muestreo se define de acuerdo a la escala del levantamiento, por lo tanto, la densidad de muestreo que se estableció para el muestreo geoquímico a escala 1:50.000 fue de una muestra por cada 2.50 km^2 de superficie de estudio, la cantidad total de muestras es de alrededor de 205 muestras para un área aproximada de 520 km^2, lo anterior está en función de las características topográficas e hidrografía de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al IIGE por la apertura de la información recopilada para la elaboración del presente trabajo investigativo.

REFERENCIAS

Andrade, F. (2020): *Manual de procedimientos para la prospección geoquímica de sedimentos fluviales activos.* IIGE. 15-16.

Darnley, A.G., Bjorklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P.V., Plant, J.A., Steenfelt, A., Tauchid, M. y Xuejing, X. (1995): *A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for international geochemical mapping: final report of IGCP Project 259*. UNESCO 1995, ISBN 92-3-103085-X.

Robles, A. (2019): *Manual de Procedimiento para la Prospección Geoquímica de Sedimentos Fluviales Activos.* IIGE, 105-114.

MERNNR (2020): *Plan Nacional de desarrollo del sector minero 2020 – 2030.* Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables – Viceministerio de Minas, 183-184.

La consideración del riesgo para fijar prioridades de cara a la recuperación de recursos secundarios en instalaciones abandonadas de residuos mineros

Consideration of risk in setting priorities for secondary resource recovery at abandoned mining waste facilities

J. C. Arranz-González[1], A. Rosario-Beltré[1], V. Rodríguez-Gómez[1], F. J. Fernández-Naranjo[1], P. Adánez-Sanjuán[1]

1 CN-Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28004 Madrid. jc.arranz@igme.es, aj.rosario@igme.es, v.rodriguez@igme.es, fj.fernandez@igme.es, p.adanez@igme.es

Resumen: Partiendo de la información disponible en el CN-IGME, obtenida durante la realización del inventario de instalaciones de residuos cerradas y abandonadas, se hizo una valoración económica de aquellas con mayor potencial para la recuperación de recursos secundarios. En este trabajo, se menciona que se llevó a cabo también una evaluación de los posibles costes de rehabilitación de las instalaciones en su estado actual. Finalmente, se aplicó un procedimiento para considerar también el beneficio social y ambiental que se podría derivar de dicha recuperación de recursos, asumiendo una posterior minimización de los riesgos mediante el correspondiente proyecto de rehabilitación.

Palabras clave: recuperación**,** recursos secundarios, rehabilitación, residuos mineros

Abstract: *Based on the information available at the CN-IGME, obtained during the inventory of closed and abandoned waste facilities, an assessment was made of the economic value of those with the most potential for the recovery of secondary resources. An evaluation of the possible costs of rehabilitating the facilities in their current state was also carried out. Finally, a procedure was applied to also consider the social and environmental benefit that could be derived from such resource recovery, assuming a subsequent minimization of risks, by means of the corresponding rehabilitation project.*

Key words: *recovery, secondary resources, rehabilitation, mining waste*

INTRODUCCIÓN

El estudio de los residuos mineros para reconocer el potencial para el aprovechamiento como fuente de materias primas secundarias, especialmente críticas o estratégicas, está adquiriendo relevancia en los últimos años (p. ej.: Villa Gómez et al., 2022; Rosario-Beltre et al. 2023). En España, partiendo de la información obtenida por el CN-IGME durante las tareas de inventario de instalaciones cerradas y abandonadas de residuos mineros, se ha realizado recientemente una valoración del potencial económico de la recuperación de recursos secundarios contenidos en los mismos, lo que quedó reflejado en la publicación de Rosario-Beltré at al. (2023). Todas las instalaciones consideradas en dicho trabajo representan en la actualidad un riesgo para la seguridad de las personas y para el medio natural y socioeconómico. El aprovechamiento de esos recursos secundarios puede ofrecer la posibilidad de reducir esos riesgos. Por esta razón, también se ha estimado de interés prestar atención a este aspecto, más allá de la mera valoración crematística de los recursos potencialmente presentes en las instalaciones. Esta comunicación muestra cómo se ha abordado esta tarea, valorando, en primer lugar, los costes de rehabilitación de las instalaciones seleccionadas por su potencial económico e introduciendo la componente de valoración del riesgo como complemento para la toma de decisiones.

ANTECEDENTES

Atendiendo a la aplicación del artículo 20 de la Directiva 2006/21/CE, sobre la gestión de residuos de industrias extractivas, el CN-IGME fue encomendado para realizar el inventario nacional de instalaciones de residuos abandonadas con riesgo para la salud y seguridad de las personas y el medioambiente. El inicio de los trabajos partió de la revisión exhaustiva del antiguo Inventario Nacional de Balsas y Escombreras (realizado entre 1983 y 1989), así como de la "Actualización del inventario nacional de depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas" (realizado entre 2000-2002). Se tuvo especial consideración a la clasificación de las presas y balsas en cuanto a "clase" y "categoría", la cual fue realizada con arreglo a lo establecido en la derogada Orden de 26 de abril de 2000 por la que se aprobó la Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01 relativa a "Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas". A raíz de la revisión realizada se obtuvo una selección de instalaciones que fueron posteriormente inspeccionadas. El resultado de todos los trabajos desarrollados, a lo largo de diez años, es un

inventario que incluye actualmente 109 instalaciones (MITERD, 2022).

Con motivo de la elaboración del inventario, se disponía de información obtenida mediante la inspección, muestreo, caracterización geoquímica y evaluación del riesgo de presas de residuos y escombreras mineras abandonadas. En determinado momento, se decidió explorar todo el conjunto de datos analíticos de instalaciones mineras abandonadas disponible en el IGME. Además, se amplió la perspectiva a todas las instalaciones para las que se tenía información sobre contenidos totales de elementos, medidos con diferentes técnicas analíticas, más allá de las incluidas en el mencionado inventario. Por esto, para la valoración económica a la que se refiere el trabajo de Rosario-Beltre et al. (2023), se trabajó con 142 conjuntos de datos analíticos de residuos mineros, situados en muy diversos puntos de la geografía española.

El primer criterio para seleccionar las instalaciones de mayor interés desde el punto de vista de la recuperación de recursos secundarios fue el Factor de Enriquecimiento (FE) respecto a los contenidos de la corteza terrestre superior, para elementos críticos y/o estratégicos, y otros con potencial interés económico. Los valores de concentración se tomaron de la propuesta de Rudnick y Gao (2014). En base a estos criterios, se seleccionó finalmente un total de 21 instalaciones que superaban un cierto nivel de enriquecimiento (diferente para cada elemento considerado) y, además, alcanzaban o superaban un volumen de 50.000 m^3.

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RECURSO

Con la medida del volumen de cada instalación, empleando un peso específico medio y las concentraciones elementales, se calculó la masa de elementos de interés disponible, con lo que se pudo cuantificar su valor económico bruto en millones de euros, según los precios de mercado en €/kg. El precio asignado a cada elemento se obtuvo a través de la media de los precios de cierre alcanzados durante el periodo 2018-2022. Por supuesto, ese valor potencial, no representa el beneficio económico, pues no tiene en cuenta los costes operativos que son inherentes a cualquier proyecto de recuperación (como, por ejemplo, el transporte y la manipulación, el diseño y la construcción de las plantas de tratamiento, los procesos de tratamiento, la rehabilitación final, etc.). En definitiva, no se trata más que de una primera aproximación al valor potencial.

La Tabla I muestra los resultados obtenidos para las instalaciones finalmente seleccionadas. Destaca, en primer lugar, la situada en Nerva (Huelva). Esta instalación estaba representada por dos muestras compuestas (938-IV-4-002 Rojo y 938-IV-4-002 Gris), pues se reconocieron dos tipos de residuos en la instalación. En el caso de las instalaciones con código de inventario 976-II-3-005 y 976-II-3-006 (Mazarrón, Murcia), situadas prácticamente en contacto, se consideró la posible explotación conjunta.

De todas las instalaciones finalmente analizadas, la pila de lixiviación de Tharsis (959-I-4-001), que fue declarada en el año 2012 como recurso de la sección B, no fue, por este motivo, incluida en el inventario reciente del CN-IGME.

VALORACIÓN DE LOS COSTES DE REHABILITACIÓN

La valoración de los costes de rehabilitación, cuyos resultados también se incluyen en la Tabla I, se abordó atendiendo a las posibles actuaciones necesarias para reducir el riesgo que representan las instalaciones, partiendo de la información disponible sobre la situación en que se encontraban cuando se realizó el inventario. Incluye todo aquello que normalmente contempla un presupuesto de ejecución material de actuaciones de rehabilitación en lo que se refiere a drenaje, remodelación topográfica, refuerzo de la estabilidad, protección frente a la erosión, cubrición con capas de impermeabilización, suelos o sustitutos de suelo, etc.

Instalación de residuos	Municipio	Valor recursos (M€)	Coste rehabilitación (M€)
809-II-1-001	Villamayor de Calatrava	109,16	3,8
835-II-1-001	Almodovar del Campo	54,1	1,2
858-IV-3-004	Villanueva del Duque	175,6	2,1
858-IV-3-002	Alcaracejos	44,7	1,4
880-II-2-001	Alcaracejos	7,4	2,9
905-II-1-012	Linares	474,1	3,5
938-IV-4-002	Nerva	1762,1	5,5
959-I-4-001	Alosno	793,6	--
976-II-3-005/006	Mazarrón	114,3	2,1
976-II-3-007	Mazarrón	95,1	1,2
977-II-4-100	La Unión	220,6	2,1
978-I-1-009	Cartagena	76,9	0,6
978-I-3-026	La Unión	69,4	5,1
977-II-4-041	Cartagena	172,8	1,6
977-II-4-043	Cartagena	166,1	1,6
34-III-4-001	Torrelavega	249,8	2,3
34-III-4-002	Torrelavega	20,3	1,6
34-III-4-003	Cartes	78,8	0,9
34-III-4-006	Cartes	149,1	3,3
125-III-4-001	Pedrafita do Cebreiro	697,2	1,4

TABLA I. *Valoración monetaria de los recursos mineros potenciales de las instalaciones de residuos seleccionadas y de los costes de rehabilitación de las mismas.*

Como se ha mencionado, la instalación de Tharsis (959-I-4-001) no fue inventariada, por lo que no se disponía de información. La valoración que se aporta

sobre la instalación San Cristóbal Oeste (976-II-3-007) procede directamente de una documentación que pudo ser consultada sobre las actuaciones que con carácter de urgencia se realizaron en la instalación. Hay que decir que, con respecto a la valoración de la rehabilitación de las presas 976-II-3-005/006, también en Mazarrón, se consideró necesaria la preparación e impermeabilización de un lugar para la recepción de parte de sus residuos, el cual podría haber recibido también residuos de la ya rehabilitada, aunque el coste se hubiera incrementado notablemente.

A pesar de lo ya comentado en relación con la valoración económica de los recursos presentes en los residuos, se observa una enorme diferencia entre los valores de los recursos frente a los costes de rehabilitación, lo que claramente sugiere la posibilidad de cubrir esos costes con el beneficio que pudiera realmente obtenerse, máxime si se piensa en las mejores condiciones que existirían después del beneficio. Por esta razón, no se ha querido perder la oportunidad de introducir de algún modo una cierta medida del interés social o ambiental que representaría la reducción de riesgos asociados a las instalaciones estudiadas. Esta aproximación es posible abordarla gracias a que se dispone de una evaluación del riesgo que es la base para la selección de las instalaciones incluidas en el inventario varias veces mencionado, con la excepción de la pila de Tharsis (959-I-4-001).

VALORACIÓN DEL RIESGO DE LAS INSTALACIONES

La evaluación de riesgos aplicada a las instalaciones se realizó de acuerdo con la metodología desarrollada por el CN-IGME (Alberruche del Campo et al., 2014). Esta metodología, adaptada a las instalaciones abandonadas de residuos mineros, considera que, en la generalidad de los casos que pueden presentarse, el origen de los riesgos determina un conjunto limitado de escenarios tipificados, definidos con frases o descriptores, que puede ser capaz de analizar lo más destacable de los riesgos que representan: generación de efluentes contaminantes con afección a las aguas superficiales, generación de efluentes contaminantes con afección a los recursos hídricos subterráneos, movilización de polvo por acción del viento, emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica, contacto directo para personas originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades, y fallo o rotura del talud o dique de las instalaciones. La severidad de los posibles efectos se evaluó sobre tres tipos de receptores ya preestablecidos: las personas o la población, el medio natural y el medio socioeconómico y cultural. A cada uno de los escenarios se asoció un código alfanumérico. Para cada escenario evaluado, la probabilidad y la severidad se establecieron a través de los denominados: índice de probabilidad (IP) e índice de severidad (IS), cuyas valoraciones entre 0 y 5 permitieron el posicionamiento de cada código de escenario sobre matrices de riesgo representativas de cada instalación.

Igualmente, se concibió un sistema para fijar las prioridades de actuación basado en los resultados de la evaluación. Después de probar diversas opciones, el equipo de trabajo decidió finalmente basar la priorización en la forma en que quedaban plasmadas las evaluaciones en las matrices de riesgo, es decir, en función de la situación de los códigos de los escenarios en los diferentes sectores de las matrices de riesgo. Así, como resultado final de la evaluación de riesgos de las instalaciones inventariadas, se pudo obtener un listado ordenado de prioridades de actuación para todas ellas (MITERD, 2022).

INCORPORACIÓN DEL INTERÉS SOCIAL Y AMBIENTAL

La propuesta para incorporar el resultado final del análisis de riesgos a la toma de decisiones sobre el posible aprovechamiento es simple: se aceptó que, cuanto mayor riesgo represente una instalación, más interés social o ambiental puede tener el desarrollo de una actuación de aprovechamiento, considerando que llevará asociada una rehabilitación al final.

Teniendo en cuenta la posición ocupada por cada una de las instalaciones que se han considerado poseedoras de potencial económico, se ha establecido una valoración entre 1 y 10 para la posición ocupada en la lista de prioridades según el nivel de riesgo. Es decir, el valor 10 se asignó a la que ocupa la posición más alta (en este caso a la instalación 978-I-3-026). A continuación, de forma proporcional se asignaron valores al resto de instalaciones según la posición que ocupan en la lista completa evaluada. Estos valores comprendidos entre 0 y 10 vienen a ser valores de un índice del interés social Y ambiental que representaría la explotación de los recursos de una instalación, asumiendo una posterior minimización de los riesgos, mediante el correspondiente proyecto de rehabilitación. Para este análisis se exceptuó la presa ya rehabilitada San Cristóbal Oeste (976-II-3-007).

De manera semejante, se estableció un índice entre 0 y 10 para el interés económico, transformando las cantidades monetarias mostradas en la Tabla 1. Se asignó el valor 10 para la que arroja un mayor valor monetario (en este caso, la instalación 938-IV-4-002). Para las siguientes se atribuyó un valor proporcional entre 0 y 10, a partir del valor económico calculado con respecto al máximo obtenido. Así, teniendo valorados el interés social/ambiental y el interés económico en una única escala de 0 a 10, se pueden situar los correspondientes valores en una gráfica en la que cada eje representa a cada uno de ambos tipos de intereses (Fig. 1).

La posición de los puntos que representan a las instalaciones estudiadas señala el interés que tendría la explotación de los recursos conjugando ambos aspectos, lo que permite ordenar las instalaciones según la distancia al origen de coordenadas (magnitud del vector en el sistema de coordenadas). Se decidió, finalmente, que el nuevo orden de prioridades se fijaría en función del valor del módulo del vector posición para cada una de las instalaciones analizadas, donde la medida del interés

económico y del interés social/ambiental estén representados cada uno por un eje de coordenadas.

La primera posición en la lista de prioridades la ocupa de nuevo la instalación 938-IV-4-002, ubicada en el municipio de Nerva (Huelva). Presenta valores muy elevados tanto para la variable relacionada con el interés económico como para la variable que representa su riesgo para la salud de las personas y el medioambiente. Reúne residuos extremadamente ácidos de dos tipos, con un elevadísimo contenido en elementos contaminantes totales y solubles. Destaca por el potencial que ofrece el contenido en diversos elementos tales como Sb, As, Se, Tl o Ag.

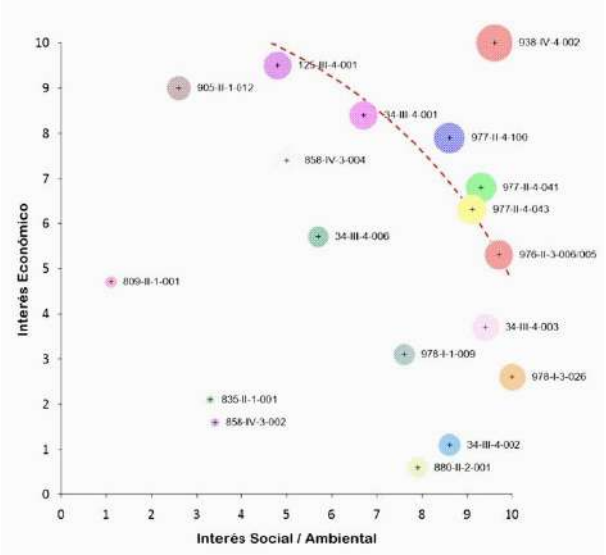


FIGURA 1. *Posición de cada instalación de residuos analizada (Interés económico vs. Interés social / ambiental), calculado en función de su posición en la lista de prioridades según su riesgo. El tamaño de los círculos es representativo del módulo del vector.*

Las siguientes 4 posiciones corresponden a instalaciones de residuos ubicadas en la Región de Murcia. Como caso curioso estaría, en quinto lugar, el conjunto formado por las instalaciones 976-II-3-005 y 976-II-3-006 (Mazarrón), en las que puede interesar realizar de manera conjunta tanto el aprovechamiento como la rehabilitación. Son residuos muy acidificados y presentan contenidos elevados de Ag, Sb, Th o Tl.

La instalación que ocuparía el último lugar es la presa minera 858-IV-3-002, situada en Alcaracejos (Córdoba). Llama la atención que la que ofrecía el menor interés económico (880-II-2-001), también en Alcaracejos, no resulta la última si se incorpora la componente social/ambiental.

CONCLUSIONES

Cuando se trata de establecer prioridades de actuación sobre conjuntos o inventarios de instalaciones abandonadas de residuos mineros, parece claro que, en determinados casos, el potencial aprovechamiento de los recursos secundarios contenidos en ellos permitiría cubrir los costes de rehabilitación. Además, parece indudable que considerar el interés social y ambiental que se deriva de la reducción de riesgos asociada a dicha rehabilitación es o debe ser un elemento más a considerar en la toma de decisiones. La incorporación de ese interés social y ambiental puede facilitarse siempre y cuando se realice una valoración preliminar de los riesgos sumada a la valoración preliminar del interés económico. No obstante, conviene dejar claro que la obtención de información más detallada que la que normalmente va asociada a la elaboración de inventarios podría servir para mejorar la información de base, tanto para la evaluación de recursos como para la evaluación del riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se deriva de diversas fórmulas de colaboración con diferentes subdirecciones del MITERD desde el año 2011 hasta la actualidad. Este trabajo también se ha beneficiado de fondos europeos a través del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (RRM). Los autores agradecen al personal de laboratorios del CN-IGME su colaboración desde siempre.

REFERENCIAS

Alberruche del Campo, E., Arranz González, J.C., Rodríguez Pacheco, R., Vadillo Fernández, L., Rodríguez Gómez, V., Fernández-Naranjo, F.J. (2014): *Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas*. Instituto Geológico y Minero de España-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, 377 p.

MITERD (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) (2022): Inventario de instalaciones de residuos mineros clausuradas y peligrosas en España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/mineria/Mineria/Documents/inventario_IRM_clausuradas-peligrosas.pdf

Rosario-Beltré, A.J., Sánchez-España, J., Rodríguez-Gómez, V., Fernández-Naranjo, F.J., Bellido-Martín, E., Adánez-Sanjuán, P. y Arranz-González, J.C. (2023): Critical Raw Materials recovery potential from Spanish mine wastes: A national-scale preliminary assessment. *Journal of Cleaner Production*, 407: 137-163.

Rudnick, R. L., y Gao, S. (2014): Composition of the Continental Crust. In H. D. Holland and K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier. pp. 1-51.

Villa Gómez, D., Sáez Salgado, E., Mejías, O., Pat-Espadas, A. M., Pinedo Torres, L. A., Jackson, L., y Parbhakar-Fox, A. (2022): Data Integration of Critical Elements from Mine Waste in Mexico, Chile and Australia. *Minerals*, 12(2): 122.

Recuperación sostenible de metales en sedimentos contaminados mediante separación magnética

Sustainable recovery of metals in polluted sediments through magnetic separation

D. Baragaño[1], B. Astray[3], E. Berrezueta[2], V. Chrastný[3] y M. Komárek[3]

1 Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono, INCAR-CSIC, Francisco Pintado Fe, 26, 33011 Oviedo. diego.baragano@incar.csic.es
2 Instituto Geológico y Minero de España CN IGME-CSIC, Matermático Pedrayes, 25, 33006 Oviedo. e.berrezueta@igme.es
3 Czech University of Life Science Prague, Kamýcká 129, 165 00, Prague, Czech Republic. komarek@fzp.czu.cz

Palabras clave: metales, contaminación, sedimentos, revalorización, isótopos de plomo.

Resumen

Ciertos metal(oid)es presentes en sedimentos marinos pueden causar graves daños ambientales incluso en bajas concentraciones, aunque también tienen un valor económico considerable. Como caso de estudio, se tomaron 50 kg de sedimento del estuario de Avilés (Asturias, norte de España), debido a concentraciones que excedían los límites legales establecidos (Baragaño *et al*., 2022).

En este trabajo, se utilizó la técnica de separación magnética de alta intensidad de campo en vía húmeda (WHIMS) para recuperar estos metal(loid)es de los sedimentos contaminados (Baragaño et al., 2023). Se evaluó la distribución de estos elementos mediante tamizado en vía húmeda y análisis en ICP-MS. Luego, se seleccionó la fracción granulométrica óptima para la separación magnética a tres intensidades de campo diferentes. Finalmente, se realizó un análisis mineralógico mediante DRX y SEM, junto con microsonda electrónica e isótopos de Pb, para discernir la mineralogía que alberga los metales.

Los análisis químicos revelaron que aproximadamente el 40% de As, Cd, Cu, Pb y Zn se concentra en un 5% en peso del material inicial, mientras que el 95% restante presenta concentraciones por debajo de los límites establecidos. Además, los isótopos de Pb mostraron que la fracción magnética tiene una huella isotópica similar a las fuentes de contaminación en el área, sugiriendo que este método podría ser útil para identificar la fuente de contaminación, especialmente en casos de contaminación múltiple.

Abstract

Several metal(loid)s in marine sediments pose environmental risks, even at low concentrations, but economic factors are also important. For this study, 50 kg of sediment from the Avilés estuary (Asturias, northern Spain) were collected due to concentrations exceeding legal limits (Baragaño et al., 2022).

High-intensity wet magnetic separation (WHIMS) was utilized to recover these metal(loids)s from the contaminated sediments (Baragaño et al., 2023). The distribution of these elements in the sediment was assessed via wet sieving and ICP-MS. Subsequently, the optimal particle size fraction was selected for magnetic separation. Finally, mineralogical analysis, through XRD, SEM, electron microprobe and Pb isotope analysis, was conducted to identify the mineralogy hosting the target elements.

Chemical analyses revealed that approximately 40% of As, Cd, Cu, Pb, and Zn is concentrated in 5% by weight of the initial material, while the remaining 95% exhibits concentrations below legal limits. Furthermore, Pb isotopes revealed a similar isotopic fingerprint between the magnetic fraction and industrial activities in the area, suggesting the utility of this method in identifying pollution sources.

Referencias

Baragaño, D., Ratié, G., Sierra, C., Chrastný, V., Komárek, M. y Gallego, J. R. (2022). *Journal of Hazardous Materials* 424(15), 127413.

Baragaño, D., Berrezueta, E., Komárek, M. y Menéndez-Aguado, J. M. (2023). *Journal of Environmental Management* 339, 117884.

Implicaciones mineralógicas durante la remediación de un suelo contaminado con enmiendas

The role of soil mineralogy in remediation of polluted soils with amendments

D. Baragaño[1], M. A. López-Antón[1] y G. Ratié[2]

1 Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono, INCAR-CSIC, Francisco Pintado Fe, 26, 33011 Oviedo. diego.baragano@incar.csic.es y marian@incar.csic.es
2 Nantes Université, Univ. Angers, Le Mans Université, CNRS, Laboratoire de Planétologie et Géosciences LPG UMR 6112, F-44000 Nantes, Francia. gildas.ratie@univ-nantes.fr

Palabras clave: suelos contaminados, remediación, hierro cero-valente, isótopos estables, especiación.

Resumen

La aplicación de enmiendas en suelos contaminados ha surgido como una Solución Basada en la Naturaleza (SBN) cada vez más popular, gracias a su bajo coste, alta eficacia y facilidad de implementación. Esta técnica implica la adición de diversos productos orgánicos o inorgánicos al suelo, los cuales interactúan con los contaminantes para generar nuevas fases estables en el suelo. Este proceso conduce a la inmovilización de los contaminantes, previniendo su absorción por parte de las plantas o su lixiviación hacia las aguas subterráneas, reduciendo así el impacto negativo sobre el medioambiente (Baragaño *et al.*, 2022).

Entre las enmiendas inorgánicas que han ganado mayor relevancia recientemente se encuentran las nanopartículas de hierro cero-valente (nZVI). Sin embargo, al aplicarse en el suelo, este nanomaterial experimenta transformaciones que resultan en la formación de diversos óxidos de Fe, cuya naturaleza dependerá de las condiciones ambientales específicas. Estas transformaciones no solo afectan la especiación del Fe en el suelo, sino también la de los contaminantes (Baragaño *et al.*, 2020).

Este trabajo recopila una serie de investigaciones centradas en los cambios mineralógicos que ocurren en suelos contaminados tras la aplicación de nZVI, con énfasis en la especiación de As, Cd y Hg.

Abstract

The application of amendments in polluted soils has emerged as an increasingly popular Nature-Based Solution (NBS), thanks to its low cost, high effectiveness, and ease of implementation. This technique involves the addition of various organic or inorganic products to the soil, which interact with contaminants to generate new stable phases in the soil. This process leads to the immobilization of contaminants, preventing their uptake by plants or leaching into groundwater, thereby reducing the negative impact on the environment (Baragaño *et al.*, 2022).

Among the inorganic amendments that have gained increasing relevance recently are zero-valent iron nanoparticles (nZVI). However, when applied to the soil, this nanomaterial undergoes transformations resulting in the formation of various Fe oxides, the nature of which depends on specific environmental conditions. These transformations not only affect the speciation of Fe in the soil but also that of contaminants (Baragaño *et al.*, 2020).

This work compiles a collection of research focused on the mineralogical changes that occur in polluted soils following the application of nZVI, with special emphasis on the speciation of As, Cd, and Hg.

Referencias

Baragaño, D., Forján, R., Álvarez, N., Gallego, J. R. y González, A. (2022). *Journal of Hazardous Materials* 433, 128748.

Baragaño, D., Alonso, J., Gallego, J. R., Lobo, M. C. y Gil-Díaz, M. (2020). *Chemosphere* 238, 124624.

Mapa Geoquímico de América Latina y el Caribe

Geochemical Map of Latin America and the Caribbean

M.J. Batista[1], A. Turel[2], I. Martín-Méndez[3], J. Larizzati[4], G. Prieto[5] y Grupo de Expertos en Geoquímica de ASGMI[6]

1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Apartado 7586, 2610-999 Alfragide, Portugal. mjoao.batista@lneg.pt
2 Servicio Geológico Minero Argentino, SEGEMAR, Buenos Aires, Argentina.
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), C/Ríos Rosas 23, 28003, Madrid. i.martin@igme.es
4 Serviços Geológicos do Brasil.
5 The Commission on Global Geochemical Baselines (CGGB), IUGS.
6 Grupo de Expertos en Geoquímica de la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos.

Palabras clave: mapa geoquímico, armonización, escala continental.

Resumen

Uno de los objetivos del Grupo de Expertos en Geoquímica de la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos es intercambiar conocimientos de geoquímica de exploración y cartografía geoquímica como resultado de la experiencia de cada Servicio Geológico. Actualmente, el grupo de expertos ha comenzado a probar una metodología para recopilar información para el Mapa Geoquímico de América Latina. La referencia continental es la Red Terrestre Global (GTN) de Darnley *et al.* (1995) tomando celdas de 40x40 km en lugar de 160x160 km. Se recogerán los datos geoquímicos de celda y se determinará un valor medio (mediana o media geométrica). El medio seleccionado para producir el mapa será los sedimentos de corriente, dado que la mayoría de los Servicios Geológicos utilizan y tienen datos de archivo de geoquímica de sedimentos de corriente de proyectos de exploración previos. La información geológica y de recursos minerales en cada celda de 40x40 km también formará parte de la tabla de atributos que compondrá la base de datos. El criterio para nivelar los datos entre conjuntos de datos contiguos será la mayor similitud entre los métodos de análisis químicos. El mapa geológico continental del mapa metalogénico de América Latina y el Caribe también se utilizará para el mapa geoquímico de América Latina y el Caribe. Este mapa contendrá tantos elementos químicos como sea posible a escala continental.

Abstract

One of the objectives of the Geochemistry Expert Group of the Association of Geological Surveys of Ibero-America is to exchange knowledge of exploration geochemistry and geochemical mapping resulting of the experience of each Geological Survey. Currently, the group of experts has begun testing methodology to collect information for the Geochemical Map of Latin America. The continental data unit used is the Global Terrestrial Network (GTN) of Darnley *et al.* (1995) but instead of 160x160 km, it will have a cell of 40x40 km on each side. The geochemical data will be collected in each cell, and a mean value (median or geometric mean) will be determined. The medium used to carry out the harmonization of the information will be stream sediments, since most Geological Surveys use and have archive of stream sediment geochemistry data from previous exploration projects. The geological and mineral resource information of the 40x40 km cell will also be part of the attribute table that will make up the database. The criterion for leveling data between contiguous data sets will be the greatest similarity between chemical analysis methods. The continental geological map of the metallogenic map of Latin America and the Caribbean will also be used for the geochemical map of Latin America and the Caribbean. This map will contain as many chemical elements as possible on a continental scale.

Referencias

Darnley, A.G., Bjorklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P.V., Plant, J.A., Steenfelt, A., Tauchid, M. y Xuejing, X. (1995). *A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for international geochemical mapping: final report of IGCP Project 259*. UNESCO 1995, ISBN 92-3-103085-X.

Mineralizaciones y plegamiento: depósitos de scheelita asociados a la cizalla extensional de Martinamor (Salamanca, España)

Mineralizations and folding: scheelite extensional shear-related mineralizations in Martinamor (Salamanca, Spain)

D. Bermejo[1], J. Gómez-Barreiro[2], L. Ortega[1], S. Barrios[2], P. Castiñeiras[1] y E. Crespo[1].

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología. Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid (España). dabermej@ucm.es, lortega@ucm.es, castigar@ucm.es, ecrespo@ucm.es.
2 Dpto. de Geología. Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca (España). jugb@usal.es, s.barrios@usal.es.

Resumen: El distrito minero de Sn-W de Morille-Martinamor (Salamanca) forma parte del domo gnéisico de Martinamor, formado durante el colapso gravitacional tardi-Varisco. La exhumación del domo es controlada por un despegue extensional de escala regional durante la segunda etapa extensional tardi-Varisca (E2). En este contexto, se han observado mineralizaciones de Sn-W con un control estructural heterogéneo. Atendiendo al nivel estructural dentro del domo, en niveles profundos dominan las mineralizaciones de tipo filoniano, mientras que, en niveles someros, predominan mineralizaciones estratoligadas de W en la secuencia metasedimentaria. En este estudio se describe el control estructural de la mineralizacion de scheelita asociada al desarrollo de los pliegues recumbentes y en vaina dentro de la cizalla extensional. Estos depósitos se localizan tanto en las charnelas como en los flancos de los pliegues y tienen implicaciones significativas para la exploración, ya que han sido históricamente una pieza clave en la explotación del wolframio en la región, y representan una importante fuente económica debido al adicional enriquecimiento en scheelita de las mineralizaciones estratoligadas.

Palabras clave: scheelita, pliegues recumbentes/en vaina, budinaje.

Abstract: *The Sn-W mining district of Morille-Martinamor (Salamanca, Spain) is part of the Martinamor gneissic dome, formed during the late Variscan gravitational collapse. The exhumation of the dome is controlled by a regional-scale extensional detachment during the late Variscan second extensional stage (E2). In this context, Sn-W mineralizations with heterogeneous structural control have been observed. Examining the structural level within the dome, vein-type mineralizations dominate in deeper levels, while stratiform W mineralizations prevail in the metasedimentary sequence at shallower levels. This study describes the structural control of the scheelite mineralization related with the development of recumbent and sheath folds within the extensional shear zone. These deposits are located both at the hinges and on the boudinaged limbs of the folds and have significant implications for exploration, as they have historically been a key component in tungsten exploitation in the region. They represent a crucial economic source due to the additional scheelite enrichment in the stratiform mineralizations.*

Key words: *scheelite, recumbent/sheath folds, boudinage.*

INTRODUCCION

El distrito minero de estaño y wolframio de Morille-Martinamor (Jiménez Benayas et al., 1996), localizado en la zona centro-este de la provincia de Salamanca, forma parte del domo de gneis de Martinamor. Domos extensionales como este se formaron en las zonas internas del Macizo Ibérico debido al colapso gravitacional tardi-Varisco. Las zonas de cizalla dúctil extensional que se encuentran a techo de estos domos acomodaron este proceso y llevaron a una denudación tectónica y atenuación térmica de la corteza (Martínez Catalán et al., 2014).

El domo de Martinamor se formó como resultado de la delaminación causada por un despegue extensional durante la segunda etapa extensional tardi-varisca (E2), y su génesis y su evolución tectono-térmica está bien documentada (Diez Balda et al., 1995; Martínez-Catalán et al., 2019). La deformación aumenta a medida que nos acercamos a la zona de cizalla extensional, con el desarrollo de una foliación subhorizontal (SE2), pliegues recumbentes y en vaina, y bandas de cizalla (SCC') que muestran un sentido para la cizalla del techo hacia el sureste. La exhumación del bloque de muro resultó en una descompresión isotérmica y una transferencia de calor a través de la zona de cizalla. Esto produjo un metamorfismo sin-cinemático de baja presión que alcanzó condiciones de fusión en el núcleo del domo, superpuesto a la signatura metamórfica barroviense previa.

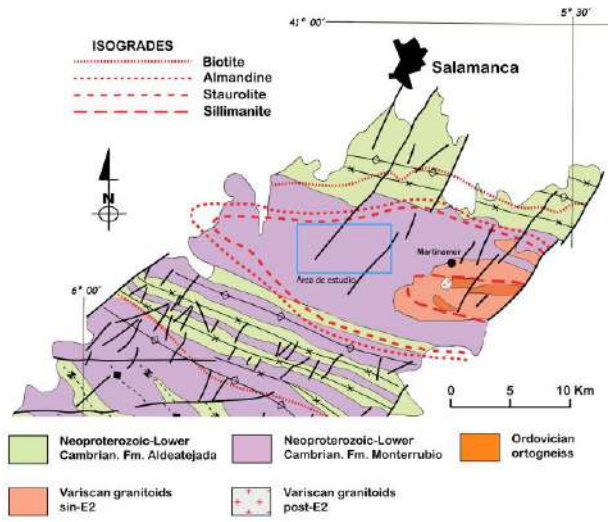


FIGURA 1. *Mapa geológico del domo de gneiss de Martinamor. Modificado de Martínez Catalán et al. (2019).*

En este contexto, las mineralizaciones de Sn-W se concentran principalmente a lo largo de la zona de cizalla extensional y sus características dependen del nivel estructural en el que se desarrollaron.

El domo tiene una cierta inmersión hacia el oeste, por lo que las zonas más profundas afloran en la zona oriental (Fig. 1). En los niveles estructurales más profundos, los depósitos de Sn-W ocurren en venas de cuarzo con wolframita, scheelita y casiterita. Por otro lado, en zonas más someras, predomina la mineralización estratoligada de W en la secuencia metasedimentaria, con scheelita asociada a los niveles calcosilicatados. En estas zonas estructurales también se encuentran las mineralizaciones de W en vetas objeto de este estudio. Estas son también mineralizaciones de scheelita con un fuerte control estructural asociado al movimiento de la cizalla extensional.

CONTROL ESTRUCTURAL DE LAS MINERALIZACIONES DE SCHEELITA

La evolución de la deformación dentro del despegue extensional condujo a mineralizaciones controladas estructuralmente. De esta forma, la deformación progresiva que dio lugar a los pliegues recumbentes y en vaina, formados en los niveles más competentes, genera distintos tipos de depósitos asociados a estas estructuras.

En estos pliegues, la mineralización de scheelita se concentra tanto en las charnelas como en los flancos, con diferencias entre ellas dependiendo del tipo de pliegue.

Las mineralizaciones asociadas a las zonas de charnela se han observado principalmente en los pliegues en vaina bien desarrollados. Estas forman depósitos de tipo *saddle/leg-reef*, con grandes cristales (>1 cm) de scheelita, vesubianita y apatito en forma de bolsadas. En ocasiones también aparecen pequeñas venas de extensión tangencial en el arco externo de las charnelas.

Por otro lado, los depósitos asociados a los flancos suelen aparecer en forma de venas o bolsadas de cuarzo y scheelita, o scheelita, vesubianita y apatito, y aparecen tanto en pliegues en vaina como en pliegues recumbentes. Estas mineralizaciones están asociadas al estiramiento y al abudinamiento de los flancos y el tipo de deformación predominante (cizalla simple o pura) controla su estilo y morfología.

Cuando en los flancos domina la cizalla pura, se forman venas y bolsadas simétricas en los cuellos de budines y venas de tensión subverticales en los niveles competentes. En los casos en los que la deformación predominante es por cizalla simple, las mineralizaciones que se forman son bolsadas y venas asimétricas en los cuellos de los budines y venas *en echelon.* En este régimen de deformación, a veces se generan abudinamientos a favor de bandas de cizalla, generalmente de tipo dominó. En estas estructuras también es habitual encontrar mineralizaciones filonianas emplazadas entre los budines, producto de la apertura en tijera generada durante la rotación de los bloques.

IMPLICACIONES EN EXPLORACIÓN

Durante el siglo XIX y principios del XX, se iniciaron trabajos mineros que alcanzaron su apogeo durante la Segunda Guerra Mundial y la fiebre del wolframio. Posteriormente, la actividad minera cesó hasta las décadas de los 70 y 80, cuando hubo una reactivación y comenzaron a investigar nuevos yacimientos (Arribas, 1980; IGME, 1985; Barrios et al., 2020). En esta zona, el wolframio se explotaba principalmente a partir de la scheelita asociada a los niveles calcosilicatados. Sin embargo, los mineros sabían que las mayores leyes de wolframio en estos niveles se encontraban en lo que ellos describían popularmente como “caparazones”. Esta definición, por supuesto, hace referencia a la morfología en forma de caparazón que presentan algunos niveles calcosilicatados al abudinarse. Además de la scheelita estratoligada asociada a los caparazones, el abudinamiento de estos niveles calcosilicatados en los flancos de los pliegues produjo la creación de sitios propicios para la precipitación de scheelita. En estas zonas mineralizadas, la scheelita se presenta en forma de cristales centimétricos, a veces incluso en forma de agregados masivos en los cuellos de los budines.

Este tipo de depósitos estructuralmente controlados suponen un mayor enriquecimiento en scheelita de los niveles calcosilicatados. Por esta razón, estas mineralizaciones han tenido, tienen y tendrán una gran importancia a nivel económico para la explotación del wolframio en este distrito minero.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito e interpretado el control estructural de las mineralizaciones de scheelita asociadas a la deformación dúctil el domo de Martinamor. Estos depósitos se encuentran en zonas estructuralmente

someras del domo, y están relacionados con el plegamiento producido por la deformación en el despegue extensional en el bloque de techo. Están asociadas tanto a las charnelas como a los flancos de los pliegues recumbentes y en vaina. Este tipo de depósitos tienen un gran interés a nivel económico ya que suponen un enriquecimiento adicional en scheelita de los niveles calcosilicatados de por sí portadores de gran cantidad de este mineral, y desde tiempos inmemorables han sido los objetivos en la minería del wolframio en esta zona. Esto hace que la identificación de este tipo de estructuras pueda jugar un papel muy importante en posibles proyectos de exploración futuros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por los proyectos de investigación PID2020-117332GB-C22 y PID2020-117332GB-C21 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, TED2021-130440B-I00 y European Union NextGenerationEU/PRTR. Daniel Bermejo agradece la financiación recibida por la Universidad Complutense de Madrid y el Banco Santander a través de un contrato predoctoral de personal investigador en formación (CT82/20-CT83/20).

REFERENCIAS

Arribas (1980): Los yacimientos de tungsteno de la zona de Morille (provincia de Salamanca). *Boletín Geológico y Minero*, XCI-II: 143-159.

Barrios, S., Gómez-Barreiro, J., Compaña, J.M. y Dos Santos, K. (2020): Mineralizaciones metálicas del extremo oriental del distrito de Morille-Martinamor (Salamanca, España). *Acopios*, 11: 37-119.

Díez Balda, M. A., Martínez Catalán, J.R. y Ayarza Arribas, P. (1995): Syn-collisional extensional collapse parallel to the orogenic trend in a domain of steep tectonics: the Salamanca Detachment Zone (Central Iberian Zone, Spain). *Journal of Structural Geology*, 17(2): 163–182.

IGME (1985): Inventario Nacional de Recursos de Volframio. Ministerio de Industria y Energía, 168p.

Jiménez Benayas, S., Crespo, J.L. y Cabrera, R. (1996): *Mapa Geológico y Minero de Castilla y León. Escala 1:400.000.* Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León.

Martínez Catalán, J.R., Díez Balda, M.A., Escuder Viruete, J., Villar Alonso, P., Ayarza, P., González Clavijo, E. y Díez Montes, A. (2019): Cizallamientos dúctiles de escala regional en la provincia de Salamanca. En: *XXX Aniv. de la Comisión de Tectónica de la SGE*. Geo-Guías 11, 109-118.

Martínez Catalán, J.R., Rubio Pascual, F.J., Díez Montes, A., Díez Fernández, R., Gómez Barreiro, J., Dias da Silva, Í., González Clavijo, E., Ayarza, P., y Alcock, J.E. (2014): The late variscan HT/LP metamorphic event in NW and Central Iberia: Relationships to crustal thickening, extension, orocline development and crustal evolution. En: Schulmann, K., Martínez Catalán, J.R., Lardeaux, J.R., Janoušek, V. y Oggiano, G. (eds.), The Variscan Orogeny: Extent, Timescale and the Formation of the European Crust. Geological Society Special Publication, 405, 225–247.

Transformación de pasivos mineros en activos energéticos. El caso del proyecto START.

Transforming mining wastes into energy assets. The case of the START project.

E. Boixereu[1], C. Fernández-Leyva[2], R. Jiménez-Martínez[1], P. Adánez[1] y D. Gómez-Limón[3]

1 CN-Instituto Geológico y Minero de España. c/Ríos Rosas, 23, Madrid e.boixereu@igme.es, r.jimenez@igme.es, p.adanez@igme.es
2 CN-Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil, edificio. Zulema bajo. Granada c.fernandez@igme.es
3 ETSI Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. c/Ríos Rosas, 21, Madrid

Resumen: El objetivo general del proyecto es transformar un material desechado en las escombreras mineras, en concreto, minerales del Grupo de la tetraedrita, en recuperadores de calor residual. De esta forma se lograría sustituir a los actuales termoelementos tipo P comerciales, basados en telurio, que resultan caros y raros desde el punto de vista de su accesibilidad. Las tetraedritas son sulfosales de cobre y arsénico o antimonio, con otros metales (Ag, Zn. Fe, Cd, Hg, Se Te, Mn, Ni, In). Por sus características físicas y su estructura de celda, tienen excelentes propiedades para aplicaciones termoeléctricas. Por otro lado, son relativamente abundantes en algunos residuos mineros de cobre. Se ha llevado a cabo una selección de yacimientos de toda España en cuyas escombreras hay una mayor potencialidad para encontrar tetraedritas. Se han muestreado un total de 4 yacimientos, en los que se han realizado ensayos de separación y concentración del mineral.

Palabras clave: Tetraedrita, semiconductor, residuos mineros, economía circular, yacimientos españoles.

Abstract: *The overall objective of the project is to transform mining waste materials, namely those belonging to the tetrahedrite group, into waste heat recovery materials. This would replace current commercial p-type thermos elements, which are based on tellurium, and expensive and rare in terms of accessibility. Tetrahedrites are sulphosalts of copper and arsenic or antimony, with other metals (Ag, Zn, Fe, Cd, Hg, Se, Te, Mn, Ni, In). Due to their physical characteristics and cell structure, they have excellent properties for thermoelectric applications. Besides, they are relatively abundant in some copper mining waste. Ore deposits throughout Spain have been selected regarding in whose mining wastes there is a greater potential to find tetrahedrites. A total of 4 deposits have been sampled, in which mineral separation and concentration tests have been carried out.*

Key words: *Tetrahedrite, semiconductor, mining waste, circular economy, Spanish mineral deposits*

ANTECEDENTES

El proyecto START es un proyecto europeo perteneciente al Pilar II (Desafíos mundiales y competitividad industrial europea), Cluster 4 (Mundo digital, industria y espacio). El concepto fundamental es la transformación de materiales existentes en residuos mineros en recuperadores del calor residual.

El calor residual es aquel generado como subproducto en el sector industrial o terciario, que se disipa en el aire o el agua. Casi todos los procesos y maquinarias de fabricación generan calor y se calcula que dos tercios de la energía primaria producida en todo el mundo se pierde como calor residual. En resumen, es un calor generado por los humanos y las actividades que desarrollan. El potencial de recuperación de calor residual estimado en la UE podría evitar decenas de millones de toneladas de emisiones de CO_2.

La posibilidad de utilizar materiales termoeléctricos para capturar y convertir directamente el calor residual en energía eléctrica es un enfoque muy atractivo y valioso para mejorar la eficiencia energética global. Permiten transformar el calor residual en una fuente de energía, convirtiendo una diferencia de temperatura en electricidad. Un material termoeléctrico eficaz debe ser buen conductor eléctrico y mal conductor térmico. Hay pocos materiales con estas características. Actualmente, los más utilizados son materiales basados en telurio (Bi_2Te_3, PbTe) o silicio (SiGe). que además son caros, raros o tóxicos.

El objetivo general del proyecto es crear un ecosistema de innovación en la UE relacionado con el desarrollo de sistemas termoeléctricos de aprovechamiento del calor residual, sostenibles, económicamente viables y libres de telurio.

LAS TETRAEDRITAS COMO MATERIAL TERMOELÉCTRICO

Las tetraedritas son sulfosales de Cu y As o Sb ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$), con otros metales (Ag, Zn. Fe, Cd, Hg, Se Te, Mn, Ni, In).

Estos minerales tienen excelentes propiedades para las aplicaciones en termoelectricidad. Se caracteriza por tener una estructura cúbica y por su baja conductividad térmica, consecuencia del gran volumen de la celda primitiva.

Un generador termoeléctrico funciona gracias a un gradiente térmico (∇T) entre dos materiales termoeléctricos, que produce un campo eléctrico (E) entre el lado frío y el lado caliente de cada material. Uno de los materiales es un semiconductor de tipo N (en el que la mayoría de las cargas libres son electrones) y el otro de tipo P (en el que la mayoría de las cargas libres son huecos, es decir, electrones ausentes). El cociente $E/\nabla T$ es negativo en el material tipo N y positivo en el tipo P. Como resultado se obtiene un *ciclo de Carnot* que convierte el calor suministrado en el lado caliente en energía eléctrica en el lado frío.

En algunos yacimientos españoles de cobre, los minerales del grupo de la tetraedrita constituyen la mena y, por tanto, han sido objetivo de explotación. Sin embargo, todavía se pueden encontrar con relativa abundancia en sus escombreras. Otras ventajas del uso de la tetraedrita es que es un mineral relativamente abundante, del que se conocen yacimientos en muchas regiones del mundo y, además, su precio es alrededor de 4 €/kg, mientras que otros materiales termoeléctricos cuestan entre 24 y 146 €/kg. En definitiva, en este proyecto se pretende convertir las tetraedritas desechadas, presentes en escombreras de mina, en recuperadores de calor residual. En otras palabras, **el objetivo es transformar los residuos mineros en un recurso energético**.

SELECCIÓN DE TETRAEDRITAS EN ESPAÑA

España se caracteriza por su amplia variedad de litologías y una compleja geología que, sumado a su larga y fuerte tradición minera hacen que el potencial para encontrar tetraedritas en yacimientos abandonados sea relativamente alto.

Mediante la recopilación de datos bibliográficos y la compilación de datos geoquímicos y mineralógicos del IGME procedentes de la Base de Datos de Recursos Minerales (BDMIN) y del Inventario Nacional de Lodos y Escombreras, se estableció un ranking de áreas potenciales. Con los resultados se confeccionó un listado de alrededor de 250 zonas donde la tetraedrita está presente. De este primer listado, se seleccionaron aquellos lugares en los que la tetraedrita fuera el mineral principal, resultando un conjunto de 50 yacimientos. Finalmente, teniendo en cuenta otros datos como el contenido en tetraedrita, el tamaño de grano o el volumen de las escombreras, se seleccionaron 21 localizaciones para su estudio, que están repartidas a lo largo de toda la península: En la Zona Cantábrica (4) Zona Astur-occidental Leonesa (2), Zona Centroibérica (1), Zona de Ossa Morena (2) y en la Zona Sudportuguesa (3), en Pirineos (2), en la Cordillera Ibérica (6) y Cordillera Bética (1).

Sin embargo, la información sobre estas zonas no estaba suficientemente verificada, por lo que se ha tenido que comprobar sobre el terreno. Actualmente se está llevando a cabo una campaña de campo. El objetivo final de esta fase es la validación de los yacimientos seleccionados previamente. Los lugares validados están siendo muestreados y se está llevando a cabo la caracterización de las tetraedritas.

En este momento, de los 21 puntos, se han seleccionado, de forma preliminar, para su muestreo y caracterización como materiales para el proyecto, aquellos con mayor porcentaje de tetraedrita, mayor volumen de escombrera y un tamaño de grano favorable para la separación de la tetraedrita: Minas El Coriellu (Fig. 1) y Delfina (Asturias), Peña Negra (León); Santísima Trinidad (Teruel), Santa Filomena (Cuenca), Lanteira (Granada) y Sierrecilla (Huelva) (Tabla 1).



FIGURA 1. *Tetraedrita (cristales de 1 cm de arista) procedente de escombrera en la mina El Coriellu (Asturias)*

ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN

Se han estudiado tanto muestras sin procesar como secciones pulidas para completar una caracterización mineralógica con microscopio óptico y Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). Esto ha permitido identificar la forma en que se encuentra la tetraedrita y su alteración, así como identificar otros sulfuros en la muestra que puedan perjudicar a la hora de obtener los concentrados.

Una vez lograda la caracterización mineralógica y de acuerdo con su composición, se están llevado a cabo ensayos de separación mineralúrgica. Los procedimientos seguidos en cada una de las muestras dependen principalmente de la paragénesis mineral que presentan.

Mina	Volumen de escombrera	Cantidad de tetraedrita	Tamaño de grano
Mina Delfina	6.000 m^3*	presente	mm
El Coriellu	500 m^3*	abundante	mm
Santísima Trinidad	6.000 m^3 + 3.000 m^3	abundante	mm
Lanteira	50.000 m^3	presente	mm
La Sierrecilla	3.500 m^3	abundante	mm-micras
Peña Negra	500 m^3**	presente	mm

*Una parte de la escombrera está en el interior de la propia mina, por lo que podría ser mayor
**Las escombreras están muy tapadas por la vegetación, por lo que es muy difícil calcular su volumen real
TABLA I. *Minas seleccionadas para su muestreo según sus características*

ENSAYOS MINERALÚRGICOS

Hasta el momento se han ensayado las muestras procedentes de 3 yacimientos, que es donde mayor posibilidad existe de recuperar tetraedritas de sus escombreras. Estos yacimientos son: la mina Delfina, en Ortiguero y El Coriellu en Llerandi, ambas en Asturias y la mina Santísima Trinidad, en el barranco del Hontanar, Torres de Albarracín (Teruel).

Las muestras obtenidas han sido trituradas y tamizadas a varias fracciones, desde menos de 0,063 mm - 0,125 mm - 0,25 mm - 0,5 mm hasta 1 mm y con la ayuda de un estereomicroscopio se ha determinado el tamaño de grano de liberación. Este procedimiento se ha repetido en varios ciclos hasta obtener el tamaño de grano óptimo en cada una de las muestras.

En la mina Delfina (Ortiguero, Asturias) (Fig. 2), la mineralización corresponde a un depósito hidrotermal de baja temperatura (90-130°C) encajado en las calizas carboníferas correspondientes a la formación Picos de Europa. Se dispone como vetas y filoncillos subverticales así como en bosadas y masas irregulares rellenando cavidades kársticas (Sáinz de Baranda Graf, 2021). Según describen García García (1992) y el Grupo Mineralogista de Madrid (1994), la mineralización primaria, muy alterada, estaría compuesta por pirita, calcopirita y cobres grises de la serie tetraedrita-tannantita. Se han transformado en limonita y carbonatos y arseniatos de cobre. También son frecuentes silicatos (crisocola). Se tomó una muestra de 25 kg que fue molida y tamizada. El primer paso para separar las tetraedritas, en este caso, ha sido por densidad en Mesa Wifley. De esta forma, se ha generado un concentrado de tetraedrita, quedando en la fracción de menor densidad la caliza y el cuarzo de la roca de caja, y otros minerales como la tirolita, que en las muestras era muy abundante. Posteriormente se ha llevado a cabo separación electromagnética con separador magnético isodinámico Frantz. A una intensidad de 1 A la tetraedrita queda en la fracción magnética.

La tetraedrita en la mina El Coriellu, aparece en bolsadas y filoncillos de cuarzo incluidos en la Caliza de Montaña (Carbonífero superior). En ocasiones se muestra parcialmente alterada a carbonatos de cobre (azurita y malaquita). En esta mina las escombreras presentan pequeño volumen, pero todavía es posible observar fragmentos de cuarzo filoniano con tetraedrita. La muestra recogida, tras la molienda y tamizado tiene un tamaño de liberación desde 500 µm. Las fracciones > 0,063 resultado de la molienda fueron trabajadas por gravedad en la mesa Wifley para separar el cuarzo y los carbonatos de la tetraedrita. Tras lavado y secado, la fracción densa fue separada electromagnéticamente con el separador Franz a 0,7 A. La fracción magnética resultante es un concentrado de tetraedrita.



FIGURA 2. *Castillete conservado en la mina Delfina (Asturias).*

La mina Santísima Trinidad, Torres de Albarracín, explotaba una mineralización filoniana alojada en cuarcitas ordovícicas, La mineralización es de galena y tetraedrita con abundante siderita acompañada de cuarzo y calcita. Se tomó una muestra de 38,2 kg de la escombrera. Esta muestra contiene mayoritariamente siderita (> 80%), acompañada de tetraedrita, galena y cuarzo. Una vez molida y tamizada se comprobó que el tamaño de grano de liberación de la tetraedrita es de500 µm. La separación de la siderita se llevó a cabo en un imán de alta intensidad (SMAI de banda), en el que la siderita quedó en la fracción magnética. Seguidamente la fracción no magnética se sometió a una separación por gravedad en mesa Wifley. De esta forma se pudo separar gran parte de la galena que iba asociada a la tetraedrita y los minerales menos densos. Finalmente, tras lavado y secado, la fracción densa fue separada electromagnéticamente con el separador Franz a 0,7 A. La fracción magnética resultante es un concentrado de tetraedrita.

Otro yacimiento que ha sido muestreado es el de Lanteira (Granada), pero todavía no se han iniciado los trabajos de separación y concentración de la tetraedrita. En la mina El Vagón de Lanteira (Granada), la tetraedrita se encuentra en filones con corridas máximas de 80-10 m y potencias que no suelen superar 1,5 m, aunque excepcionalmente alcanzan los 5 m (Molina-Molina y Ruiz-Montes, 1993). Estos filones encajan en una formación de esquistos grafitosos incluida en el Complejo Nevado-Filábride de las Cordilleras Béticas. La mineralización primaria está constituida principalmente por sulfuros y sulfosales de cobre, donde predominan la calcopirita y la tetraedrita y siempre se encuentra asociada a siderita.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El Proyecto START se basa en la utilización de minerales existentes en residuos mineros, para transformarlos en recuperadores del calor residual. Estos minerales son las tetraedritas, sulfosales de cobre que pueden ser utilizadas para la fabricación de materiales termoeléctricos. En España existen cerca de 250 yacimientos con presencia de tetraedrita, siendo el mineral principal explotado en 50 de ellos. De este medio centenar de yacimientos, se han seleccionado 21 y sólo 4 han sido muestreados hasta el momento: minas El Coriellu y Delfina (Asturias), Santísima Trinidad (Teruel) y Lanteira (Granada). En los 3 primeros ya se han realizado los ensayos de separación y concentración de la tetraedrita para su posterior estudio piloto de fabricación de materiales.

A falta de muestrear las escombreras de las minas de La Sierrecilla y Peña Negra y, de la realización de los ensayos mineralúrgicos pertinentes a las procedentes de Lanteira, los resultados obtenidos hasta el momento sitúan a España como un país con gran potencial para el suministro de materias primas para la fabricación de dispositivos termoeléctricos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado como resultado del proyecto START (*Sustainable Energy Harvesting Systems based on Innovative Mine Waste Recycling*-Project: 101058632), Proyecto de Horizonte Europa cofinanciado por la Unión Europea.

REFERENCIAS

García García, G. (1992) Mina Delfina. Ortiguero (Asturias). *Azogue. Revista del Grupo Mineralogista de Madrid*, 11: 13-20.

Grupo Mineralogista de Madrid (1994). Ortiguero, la azurita de los picos. *Bocamina*, 0:50.

Molina-Molina, A. y Ruiz-Montes, M. (1993). Las mineralizaciones filonianas del Complejo Nevado-Filábride (Cordilleras Béticas, España). *Boletín Geológico y Minero*, vol. 104-6, 621-639.

Sáinz de Baranda Graf, B. (2021). La mina "Delfina", Ortiguero, Cabrales, Principado de Asturias. *Paragénesis*, 3-1:63-86.

Cristalización no clásica en Carbonatos de la Cueva de Nerja, España

Non-Classical Crystallization in Carbonates of the Nerja Cave, Spain

S. Bonilla-Correa[1], M. P. Asta[1], E. Ruiz-Agudo[1], C. Jiménez de Cisneros[2] y C. Liñán-Baena [3,4]

1 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Fuentenueva s/n, 18071 Granada.
sbonilla@ugr.es; encaruiz@ugr.es; mpasta@ugr.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Avda. de Las Palmeras 4, 18100 Armilla, Granada.
concepcion.cisneros@csic.es
3 Instituto de Investigación Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja, Carretera de Maro s/n, 29787 Nerja, Málaga.
cbaena@cuevadenerja.es
4 Departamento de Ecología y Geología, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga.

Palabras clave: AMC, dolomita, huntita, moonmilk.

Resumen

Investigaciones recientes han revelado que, en numerosos sistemas naturales, los carbonatos cristalinos se originan a partir de un precursor amorfo mediante un proceso de cristalización no clásica. En este trabajo hemos estudiado muestras de "moonmilk" recogidas en dos de las salas turísticas, Cascada y Cataclismo, de la Cueva de Nerja. Esta cueva se desarrolla en los mármoles dolomíticos triásicos de la Unidad de Almijara, en las Zonas Internas de la Cordillera Bética (SE, España). Las muestras fueron caracterizadas mediante diversas técnicas: difracción de rayos X de alta resolución en sincrotrón (HR-XRD), difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), termogravimetría (TG-DSC) y microscopía electrónica de transmisión (TEM). En los depósitos de "moonmilk" estudiados, y formados a relativamente bajas temperaturas (temperatura media anual de la cueva es de $18{,}1 \pm 0{,}1$ °C, se detectó la presencia de carbonato de calcio y magnesio amorfo (AMC), huntita ($CaMg_3(CO_3)_4$) y dolomita $CaMg(CO_3)_2$. Nuestros resultados sugieren que el AMC habría jugado un papel fundamental como precursor en la formación de carbonatos cristalinos de Ca-Mg.

Abstract

Recent investigations suggest that crystalline carbonate formation is in many natural environments preceded by the formation of amorphous through non-classical nucleation pathways. Here, we have studied moon-milk samples collected in the touristic sector of the cave, specifically in the Cascada and Cataclismo chambers of the Nerja Cave. This cave is developed within the middle Triassic dolomitic marbles of the Almijara Unit, in the Internal Zone of the Betic Cordillera (SE Spain). The samples were characterized using several techniques: synchrotron high-resolution X-ray diffraction (HR-XRD), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetry (TG-DSC), and transmission electron microscopy (TEM). In these "moonmilk" deposits, formed at relatively low temperatures (mean annual temperature in the cave is 18.1 ± 0.1 °C, amorphous calcium magnesium carbonate (AMC), huntite ($CaMg_3(CO_3)_4$), and dolomite $CaMg(CO_3)_2$ were detected. Our results suggest the important role of AMC in the formation of Ca-Mg crystalline carbonates.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero proporcionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto de investigación PID2021-125305NB-I00 y a la Junta de Andalucía a través del programa de investigación EMERGIA bajo el acuerdo de subvención EMERGIA20_38594.

Variaciones geoquímicas en cristales maclados de aragonito

Geochemical variations in twinned aragonite crystals

I. Cantarero[1], C. Fàbrega[2], M. Śliwiński[3], A. Travé[1] y D. Parcerisa[4]

1 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), 08028 Barcelona. i_cantarero@ub.edu, atrave@ub.edu
2 Independent researcher. España. carlesfal@yahoo.es
3 Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, WA, EE. UU. mgsliw@uw.edu3
4 Departament d'Enginyeria Minera, Industrial i Tic, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa (EPSEM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 08240 Manresa. david.parcerisa@upc.edu

Palabras clave: Aragonito, catodoluminiscencia, geoquímica, cristalografía, España

Resumen

Se han analizado 4 ejemplares de prismas pseudohexagonales maclados de aragonito provenientes de Molina de Aragón, Monterde, Minglanilla y Chiclana mediante microscopía de catodoluminiscencia (CL), revelando un patrón similar de zonas no luminiscentes y zonas rojas *dull* que generalmente tienen forma de reloj de arena. Las zonas no luminiscentes tienen valores de $\delta^{13}C$ ligeramente más pesados (entre -2 y -1,4 ‰VPDB) que las zonas rojas (entre -2,8 y -2,1 ‰VPDB) mientras que el $\delta^{18}O$ es similar en ambas zonas (-8 a -6,8 ‰VPDB). Los análisis por microsonda electrónica revelan que las zonas rojas presentan cantidades variables en Sr y valores de Na bajo el límite de detección. Por el contrario, las zonas no luminiscentes tienen una concentración media de Na de 500 ppm y valores de Sr más elevados y constantes. El contenido en Ca en ambas zonas es similar y Ba, Mg, Mn y Fe están bajo el límite de detección.

El aragonito comúnmente presenta una CL verde a verde amarillenta o bien no es luminiscente. El contenido en elementos traza de ambos dominios de CL será examinado mediante LA-ICP-MS para entender qué elemento(s) pueden ser los activadores de la CL roja *dull*. Las variaciones isotópicas y elementales entre cristales podrían ser debidas a diferencias en la orientación cristalográfica durante el crecimiento de la macla. Un mecanismo similar fue propuesto por Dickson (1991) para explicar diferencias isotópicas en calcitas.

Abstract

Four specimens of twinned pseudohexagonal prisms of aragonite from Molina de Aragón, Monterde, Minglanilla and Chiclana (Spain) were examined in cross-section by cathodoluminescence (CL) microscopy, revealing a similar pattern of non-luminescent and dull-red zones in each sample, the latter generally having hourglass shapes. C and O isotope composition shows somewhat heavier $\delta^{13}C$ values in non-luminescent zones (between -2 and -1,4 ‰VPDB) compared to the dull-red domains (between -2,8 and -2,1 ‰VPDB), whereas $\delta^{18}O$ values are similar in both (between -8 and -6,8 ‰VPDB). Electron probe microanalysis (EPMA) revealed a variable Sr content in the red-zones, with Na falling below the method detection limit. In contrast, the non-luminescent zones have an average Na concentration of 500 ppm and higher, more uniform Sr values. The Ca content is similar in both zones, whereas Ba, Mg, Mn and Fe are below the detection limit.

Aragonites commonly show a green to green-yellowish CL response or are non-luminescent. Trace element content of both CL-domains will be examined by LA-ICP-MS to better understand what element(s) may be activators for the dull-red luminescence. The isotopic and elemental variations between crystals might be due to differences in the crystallographic orientation during twinning growth. A similar mechanism was proposed by Dickson (1991) to explain isotopic differences in calcites.

Referencias

Dickson, J.A.D (1991). *Nature* 353, 842-844.

Deciphering the age of the hematite ores of the Iberian Range (Spain): A paleomagnetic approach

Descifrando la edad de las mineralizaciones de hematites de la Cordillera Ibérica (España): Una aproximación paleomagnética

P. Calvín[1], V. Suárez[2], I. Domper[3] y F.J. Pérez-Rivarés[2]

1 IGME (CSIC), Unidad de Zaragoza. Campus Aula Dei, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. calvinballester@gmail.es
2 Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, UZ, 50009 Zaragoza. vsuarezmonfort@gmail.com, perezrivares@gmail.com
3 Dpto. Plan de Atención Individual de Desarrollo Profesional (PAIDP), Academia de Logística ACLOG, Ejército de Tierra, 50300 Calatayud. domperines@gmail.com

Abstract: The Cordillera Ibérica hosts numerous hematite Fe mineralizations, primarily in veins and replacing the Lower Cambrian dolostones. Small veins can also be found in the Triassic. Different genesis and ages have been proposed for the mineralizations present in the Cambrian materials (Cambrian and Triassic), and currently, this issue remains unresolved. To determine the age of the hematite deposits, a paleomagnetic study was carried out in the abandoned hematite mines "La Potente" and "Petra III", in the provinces of Zaragoza and Soria, respectively. Both the hematite mineralization hosted in the Cambrian carbonates and the overlying discordant Triassic red layers have been sampled. The hematite bodies show stable paleomagnetic behavior, and a high temperature component carried by hematite can be isolated and is compatible with the expected Triassic directions. Furthermore, this component presents both normal and reverse polarity, indicating that the mineralization process did not take place in a single event, but rather occurred during at least two different polarities of the Earth's Magnetic Field.

Key words: Hematite ore, Fe mineralizations, Paleozoic, Triassic, paleomagnetic dating.

Resumen: *En la Cordillera Ibérica existen multitud de mineralizaciones de Fe constituidas por hematites. Las más importantes conforman cuerpos y filones que reemplazan y encajan en dolomías del Cámbrico Inferior, mientras que el resto lo hacen en las capas rojas del Triásico Inferior. En el caso de las mineralizaciones presentes en los materiales cámbricos, se han propuesto diferentes génesis y edades (Cámbrico y Triásico), y actualmente es un tema que no ha sido resuelto. Con la finalidad de determinar su edad, se ha realizado un estudio paleomagnético en las minas de hematites abandonadas "La Potente" y "Petra III", en las provincias de Zaragoza y Soria, respectivamente. Se han muestreado tanto la propia mineralización de hematites como las capas rojas triásicas discordantes suprayacentes. Los cuerpos de hematites muestran un comportamiento paleomagnético estable, pudiendo aislarse una componente de alta temperatura portada por hematites y que es compatible con las direcciones esperadas triásicas. Además, esta componente presenta tanto polaridad normal como inversa, indicando que el proceso de mineralización no tuvo lugar en un único evento, sino que se produjo durante, al menos, dos polaridades distintas del Campo Magnético Terrestre.*

Palabras clave: *Hematites, mineralizaciones de Fe, Paleozoico, Triásico, datación paleomagnética.*

INTRODUCCIÓN

Fe mineralizations are abundant in the Iberian Range, particularly in the Moncayo area and its surroundings. They have been significant to society since ancient times until the first half of the 20th century. The most important mines during the 20th century were 'Santa Rosa' (Tierga) and 'La Potente' (Mesones de Isuela) in the province of Zaragoza, and 'Petra III' (Ólvega) and 'Gandalia' (Borobia) in the province of Soria. The mineralizations mainly consist of massive hematite hosted in Lower Cambrian carbonates of the Ribota Formation. The deposits in the 'Petra III', 'Gandalia', and 'La Potente' mines are described in the literature as phylonian, while 'Santa Rosa' is traditionally defined as stratiform (IGME, 1975) with a probable SEDEX origin (López-Ciriano et al., 2011). In all of them, the Cambrian is unconformably overlain by Lower Triassic red beds (Fcs. Buntsandstein) in which numerous small Fe vein deposits can be recognized, as well as sulfide and barite mineralization of Triassic age (IGME, 1975).

On the other hand, the Cerro del Hierro regression occurred during the Upper Ovetian (Liñán and Gámez Vintaned, 1993). This event can be correlated with similar events recognized worldwide (Mayoral et al., 2021) and (apparently) associated with Fe deposits, such as Cerro del Hierro itself (Constantina, Sevilla), whose Fe mineralization is attributed to a substantial lateritic horizon, or the Flinders Disconformity (Australia), defined by Fe-rich microstromatolitic layers (Betts et al., 2017).

A paleomagnetic study is being carried out to determine the age of the Fe mineralization in the Cambrian carbonates of the Iberian Range in order to relate it to the Cerro del Hierro regression or to the Triassic vein mineralization. This work shows the preliminary paleomagnetic results obtained both for hematite bodies and for Lower Triassic red-beds in order to compare the obtained directions with those expected for the Cambrian and for the Triassic and therefore to shed light in the age of the ores as well their genesis.

SAMPLING AND LABORATORY PROCEDURES

The hematite ores under study are located in the northern sector of the Aragonese Brach (Iberian Range). The area is cored by Paleozoic rocks and forms a NW-SE inlier in which several hematite ores are located. This study focuses on two abandoned hematite mines, namely 'La Potente' mine (sites TR) and 'Petra III' (sites LV) (Table I). Samples of massive hematite were collected from the mining site itself in TR01 to TR03, while TR04 yielded decimetric hematite veins cutting through Cambrian dolostone, which is the host rock of the hematite ores. Similarly, LV01 and LV02 also correspond to massive hematite. LV01 refers to decimetric hematite veins that cut through Cambrian host rock. LV02 is a small hematite body, but its relationship with the Cambrian rocks is unclear due to poor outcrop conditions. Lower Triassic shales and sandstones (Fcs. Buntsandstein) were sampled from LV03 and LV04, which define an open anticline. LV03 is located approximately 0.1 km above LV01 and is almost horizontal (So: 305/10), while LV04 is 2.2 km to the SSE and dips towards the SW (So: 222/28).

Site	Latitude (ºN)	Longitude (ºW)
LV01	41°44'52"	1°57'52"
LV02	41°44'55"	1°57'43"
LV03	41°44'54"	1°57'56"
LV04	41°43'41"	1°57'32"
TR01	41°34'24"	1°35'05"
TR02	41°34'24"	1°35'05"
TR03	41°34'22"	1°35'05"
TR04	41°33'37"	1°35'50"

TABLE I. *Coordinates (WGS84) of the paleomagnetic sites.*

Seven to ten samples were collected from each site using a gasoline-powered machine and directly oriented with a magnetic orientation device. The Natural Remanent Magnetization (NRM) was stepwise thermally demagnetized using a TD48-DC (ASC Scientific), and magnetization was measured at each step with a 755 Superconducting Magnetometer (2G). Rock magnetic experiments were conducted using a variable field translation balance MMVFTB (Magnetic Measurements). All experiments were done at the Paleomagnetic Laboratory of the University of Burgos (Spain).

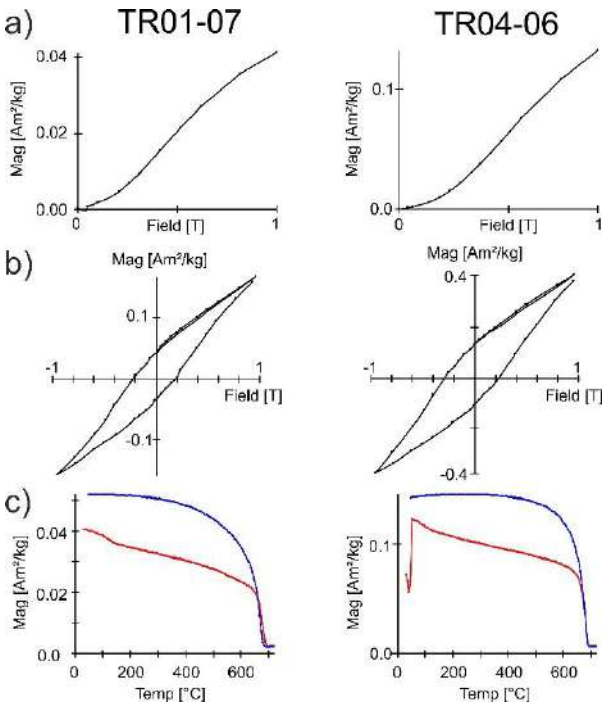


FIGURE 1. *a) IRM acquisition, b) hysteresis loops and c) induced magnetization vs. temperature curves of two representative samples of hematite ores.*

RESULTS: MAGNETIC MINERALOGY AND DEMAGNETIZATION OF THE NRM

Rock magnetic experiments (Fig. 1) reveal a pervasive high coercivity magnetic phase with Curie temperatures around 675 ºC, typical of hematite. Additionally, there is a variable contribution of another magnetic phase with a Curie temperature around 125 ºC that corresponds to goethite. The thermomagnetic curves are not reversible, and the cooling curves display higher intensities due to the neoformation of hematite during heating, while goethite is destroyed during heating.

The NRM intensities of the hematite samples are high, with a mean of 0.29 A/m and a maximum value of 2.06 A/m. However, LV02 and TR04 exhibit one order of magnitude less intensity than other sites, with values around 0.05 A/m. The demagnetization diagrams of the hematite ores (Fig. 2a) are similar (except for TR04), with only a single paleomagnetic component observed with unblocking temperatures between 650 and 680 ºC and sharp decays. In contrast, TR04 shows progressive demagnetization with unblocking temperatures between 350 and 580 ºC. As no differences can be observed in the rock magnetic results, these temperature differences could be due to differences in the grain size of the hematite carrying the remanence (smaller in TR04 than in the rest of the sites). The overlying red-beds (Fig. 2b) show a characteristic remanent magnetization (ChRM) between 650 to 680 ºC. This is the only component in LV03, but in LV02, a lower temperature component can be observed, which could be related to a viscous overprint.

ChRM directions in hematite ores (Fig. 3a) show antipodal normal (positive inclinations to the north) and

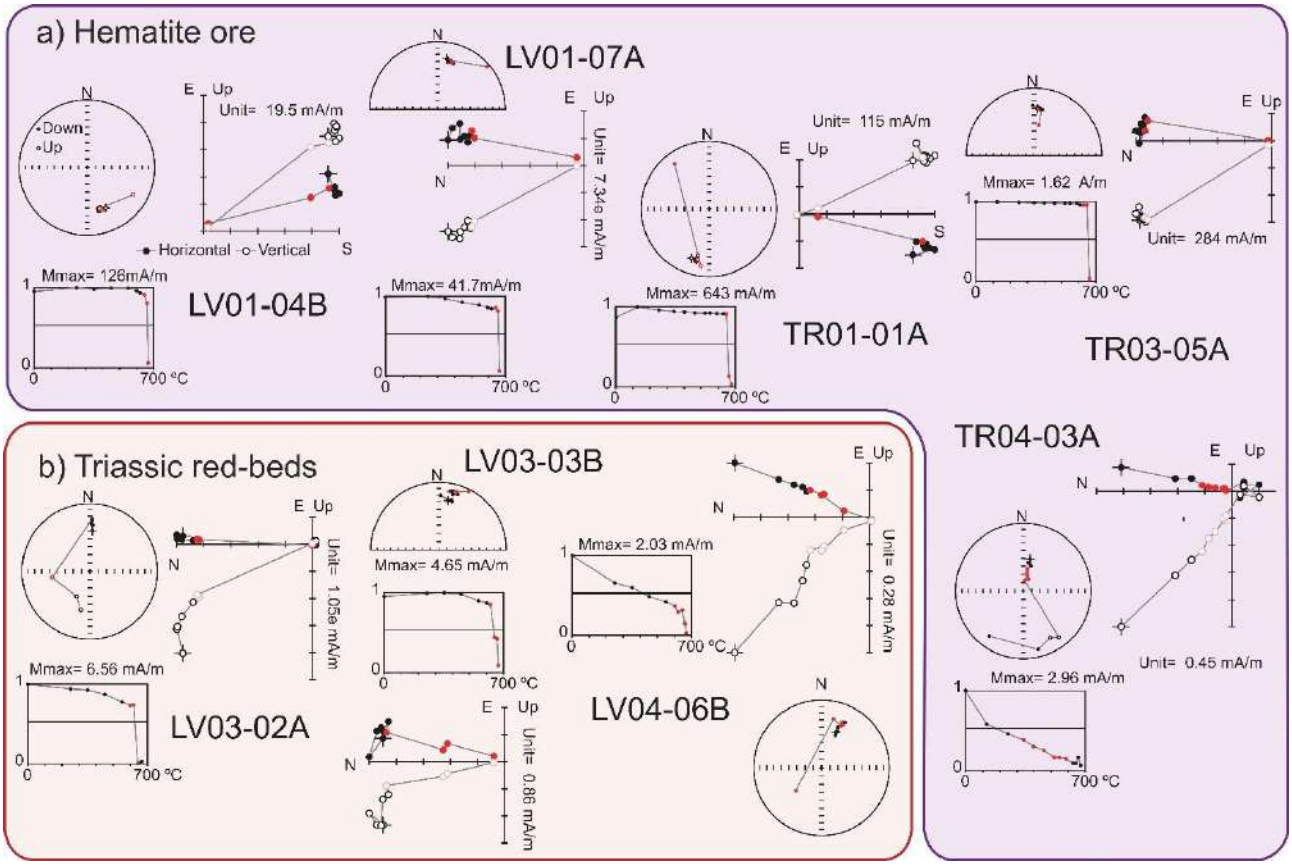


FIGURE. 2. *Thermal demagnetization diagrams of a) hematite ores and b) red beds in geographic coordinates.*

reverse (negative inclinations to the south) polarities. This dual polarity can be observed between sites or between samples from the same site, such as in LV01, where two-centimeter veins were sampled, each with different polarity. Considering the bedding attitude of the Cambrian units where the mineralizations are located, the mean paleomagnetic directions of TR hematite bodies are more clustered before than after bedding correction (BBC and ABC respectively, Fig. 3b). Finally, the Triassic red-beds show a normal polarity direction and cluster better BBC than ABC when the two sites are compared.

AGE OF THE HEMATITE ORE

Considering the two proposed ages for the hematite ores, Cambrian or Triassic, the expected paleomagnetic directions would be significantly different depending on which age is correct. During the Cambrian, the Iberia was located at high latitudes in the Southern Hemisphere (Stampfli et al., 2013), so high negative inclinations to the N are expected for normal polarity. Later, during the Carboniferous period, the pre-Permian rocks of the Iberian Range underwent a ~70º counterclockwise rotation as a result of the development of the Ibero-Armorican Arc (Pastor-Galán et al., 2018). As a result of this vertical axis rotation, Cambrian Paleomagnetic directions should exhibit negative steep inclinations to the WNW for normal polarity or positive to the ESE for reverse polarity. On the other hand, slight positive inclinations to the NW or negative to the SE could be expected for the Triassic (Fig. 4), when Iberia was already in the Northern Hemisphere. The obtained paleomagnetic directions provide clues to the possible age of the mineralization.

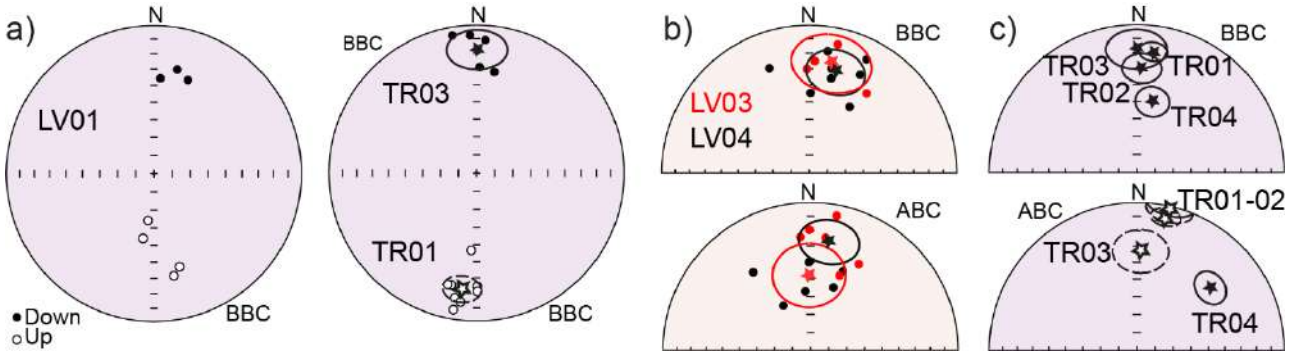


FIGURE 3. *Paleomagnetic directions of the ChRM in representative sites of a) hematite ores and b) Triassic red-beds paleomagnetic directions before and after bedding correction (BBC and AFC). c) Mean paleomagnetic directions before and after bedding correction of TR hematite sites (reverse polarity directions have been transposed to the lower hemisphere of the stereoplot and mean directions are plotted as stars).*

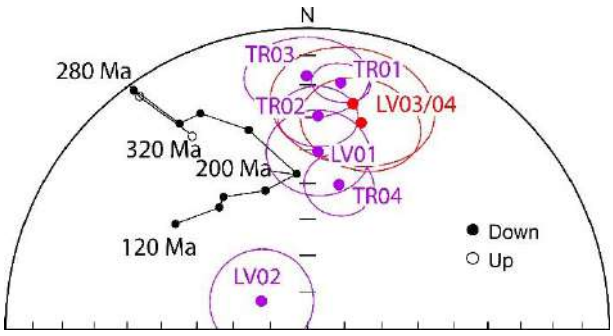


FIGURE 4. *Equal area projection (lower hemisphere) showing the expected paleomagnetic directions (Torsvik et al., 2012) in black vs. obtained ones from hematite sites (in pink) and Triassic red-beds (in red) in geographic coordinates.*

1) Paleomagnetic directions of hematite ores are consistent with a position of Iberia in the Northern Hemisphere. 2) Additionally, these directions are better clustered before than after to restore to the horizontal the bedding of the Cambrian units in which the mineralization is located. This suggests that the mineralization occurred after the folding of the Cambrian units during the Variscan orogeny. The dual polarity suggests as well that the mineralization occurred during at least two different polarities, indicating that it was not a result of a single event. The directions obtained from Triassic red-beds are comparable to those obtained from the hematite bodies. However, the former appears to have undergone remagnetization after folding, which means that the paleomagnetic signal is post-Triassic.

Based on the paleomagnetism of the hematite bodies, it is likely that the mineralization occurred during the Triassic period or at least after the Variscan orogeny. The differences in declination between the expected and obtained paleomagnetic directions (Fig. 4) could be due to a clockwise vertical axis rotation during the Alpine orogeny, as observed in other sectors of the Iberian Range (Pastor-Galán et al., 2018). Finally, the scatter in the N-S plane of the paleomagnetic directions could be due to uncontrolled tilting of the sampled units in the N-S plane, probably during the Cenozoic.

CONCLUSIONS

The paleomagnetic study carried out in the hematite bodies shows the presence of a stable dual polarity paleomagnetic component with unblocking temperatures between 650 and 680 ºC. The inclinations are low and positive to the North or negative to the South, indicating Northern Hemisphere paleomagnetic directions that are consistent with the expected Triassic directions. Additionally, mineralization occurred during at least two different polarities, indicating that a single mineralization event can be excluded.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by research project PID2022-1387680B-100.

REFERENCES

Betts, M.J., Paterson, J.R., Jago, J.B., Jacquet, S.M., Skovsted, C.B., Topper, T.P. and Brock, G.A. (2017): Global correlation of the early Cambrian of South Australia: Shelly fauna of the Dailyatia odyssei Zone. *Gondwana Research*, 46: 240-79.

IGME (1975): Programa Nacional de Investigación Minera. Programa sectorial del hierro. Ministerio de Industria, 223 p.

Liñán, E. and Gámez-Vintaned, J.A. (1993): Lower Cambrian palaeogeography of the Iberian Peninsula and its relations with some neighbouring European areas. *Bulletin de la Société géologique de France*, 164(6): 831-842.

López-Ciriano, A., Biel, C., Prada-Orgaz, F., Subías, I., Gent, M. and Torno-Lougedo, S. (2011): Santa Rosa mine, Tierga (NE of Spain): an approach to its geology and mineralogy. Let's Talk Ore Deposits: Proceedings of the Eleventh Biennial SGA Meeting.

Mayoral, E., Dies Álvarez, M.E., Gámez Vintaned, J.A., Gozalo, R., Linán, E. and Molina, J.M. (2021): Cerro del Hierro, Spain: the largest exposed early Cambrian palaeokarst. *Geological Magazine*, 85: 811-824.

Pastor-Galán, D., Pueyo, E. L., Diederen, M., García-Lasanta, C. and Langereis, C. G. (2018). Late Paleozoic Iberian Orocline(s) and the Missing Shortening in the Core of Pangea. Paleomagnetism From the Iberian Range. *Tectonics*, 37: 3877–3892.

Stampfli, G.M., Hochard, C., Vérard, C., Wilhem, C. and von Raumer, J. (2013): The formation of Pangea. *Tectonophysics*, 593: 1-19.

Torsvik, T.H., Van der Voo, R., Preeden, U., Niocaill, C.M., Steinberger, B., Doubrovine, P.V., van Hinsbergen, D.J.J.J., Domeier, M., Gaina, C., Tohver, E., Meert, J.G., McCausland, P.J.A.A. and Cocks, L.R.M. (2012): Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth Science Reviews*, 114: 325-368.

Maghemita, el mineral de mena olvidado de las lateritas niquelíferas.

Maghemite, the forgotten ore mineral in Ni laterite deposits.

D. Domínguez-Carretero[1], J.A. Proenza[1], C. Villanova-de-Benavent[1] y S. Galí[1]

1 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, carrer Martí i Franqués, s/n, 08028, Barcelona, España.
ddominguezcarretero@ub.edu

Palabras clave: maghemita, lateritas, níquel, cobalto, metalurgia.

Resumen

La maghemita es un óxido de hierro cuya fórmula es $(Fe^{3+}_{0.67}\square_{0.33})Fe^{3+}_2O_4$. La maghemita ha sido habitualmente ignorada en el estudio de lateritas de níquel, pues es difícil de diferenciar de manera convencional de la magnetita ($Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$), ya que ambas fases forman cristales euhédricos octaédricos, están compuestas principalmente por Fe y las técnicas analíticas convencionales no permiten diferenciar entre Fe^{2+} y Fe^{3+}. En el distrito laterítico de clase mundial de Bahía de Moa (Cuba oriental), la maghemita, identificada mediante DRX, espectroscopía micro-Raman y microscopía electrónica de transmisión de alta resolución, está presente en la zona oxidada de los depósitos lateríticos con abundancias modales promedio del 5 %, pudiendo alcanzar concentraciones de casi el 20 %. Las maghemitas estudiadas representan una mena importante, tanto de Ni como de Co, pudiendo alcanzar concentraciones de NiO y CoO de hasta 13,9 y 1,84 % en peso, respectivamente. En el ambiente tropical de pluviosidad elevada del oriente de Cuba, las maghemitas representan fases intermedias de la reacción de ferrihidrita a hematites (Barrón y Torrent, 2002; Torrent *et al.*, 2006). La cinética de la primera parte de la reacción (ferrihidrita → maghemita) es muy rápida, sin embargo, la segunda (maghemita → hematites) es muy lenta, pudiendo la maghemita estar presente de manera abundante en el perfil laterítico durante millones de años. La correcta identificación de la maghemita en perfiles lateríticos puede suponer una mejora en la extracción de Ni y Co de estos depósitos, incrementando su rentabilidad económica y reduciendo el material depositado en la balsa de lodos.

Abstract

Maghemite is an iron oxide whose formula is $(Fe^{3+}_{0.67}\square_{0.33})Fe^{3+}_2O_4$. Maghemite has usually been ignored in the study of Ni laterites due to the difficulty to differentiate maghemite from magnetite. Both minerals have euhedral octahedral morphologies, they are mainly composed of Fe, and conventional analytical techniques do not allow distinguishing between Fe^{2+} and Fe^{3+}. In the lateritic world-class district of Moa Bay (Eastern Cuba), maghemite, identified by means of XRD, micro-Raman spectroscopy and TEM, is an abundant mineral phase in the oxide zone of Ni laterite deposits with average modal proportions of 5 % and eventually reaching up to 20 %. The studied maghemite represents an important ore mineral for both Ni and Co, reaching NiO and CoO concentrations of 13.9 and 1.84 wt.%, respectively. In tropical areas with abundant rainfall, like in Eastern Cuba, maghemite is an intermediate phase in the ferrihydrite to hematite reaction (Barrón and Torrent, 2002; Torrent *et al*., 2006). The kinetics of the first part of the reaction (ferrihydrite → maghemite) is very fast, however, the kinetics of the second reaction (maghemite → hematite) is very slow. Thus, abundant maghemite may remain stable in the lateritic profiles for millions of years. The correct identification of maghemite in lateritic profiles would improve their Ni and Co recovery rates, increasing the economic revenue and reducing mine waste.

Referencias

Barrón, V. y Torrent, J. (2002). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 2801-2806.
Torrent, J., Barrón, V. y Liu, Q. (2006). *Geophysical Research Letters* 33, L02401.

Aplicación de las imágenes hiperespectrales en la testificación geológica.

Application of hyperspectral imaging in geological testification.

A. Espín de Gea[1], G. Frías[1], M. Reyes[1], A. Gil[1] y M.F. Carreño[1]

1 Unidad Tecnológica Geológico Minera. Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales, Ctra. De Murcia SN, 30430 Cehegín, Murcia. antonio.espin@ctmarmol.es, gonzalo.frias@ctmarmol.es, monica.reyes@ctmarmol.es, antonio.gil@ctmarmol.es, paqui.cf@ctmarmol.es

Palabras clave: hiperespectral, testificación, sondeos.

Resumen

La testificación geológica de los sondeos mineros proporciona información detallada sobre la composición y estructura del terreno en profundidad. Junto al análisis de imágenes basados en la microscopía electrónica de barrido con analizador de liberación de mineral (SEM-MLA) se obtienen mapas mineralógicos exhaustivos de alta resolución, pero en pequeñas áreas de los testigos. Por otro lado, los ensayos geoquímicos permiten cuantificar las concentraciones de las acumulaciones minerales importantes, pero requieren mucho tiempo, la destrucción total o parcial del testigo y se promedian largas porciones del testigo. Las imágenes hiperespectrales se están utilizando cada vez más en la industria minera, al captar una amplia gama de longitudes de onda que permite identificar de manera precisa las firmas espectrales de los minerales presentes en las muestras geológicas (p. ej. Tuşa *et al.*, 2020), combinando los análisis hiperespectral y SEM-MLA realiza un cartografiado rápido, exhaustivo y no destructivo de los testigos. El objetivo de este estudio consiste en desarrollar un protocolo destinado a optimizar el proceso de testificación geológica mediante la adquisición de imágenes hiperespectrales y su subsiguiente análisis, que será evaluado en el contexto de un sondeo llevado a cabo en un yacimiento de magnetita, utilizando la cámara hiperespectral HySpex Mjolnir VS-620 con sistema de toma de datos de laboratorio y validado con muestras analizadas en el SEM-EDX (detector dual de rayos-X Bruker Quantax 4000) del Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales.

Abstract

Geological testing of boreholes provides detailed information on the composition and structure of the ground at depth. Combined with scanning electron microscopy-based image analysis using a mineral liberation analyser (SEM-MLA), it provides comprehensive, high-resolution mineralogical maps, but only in small areas of the drill core. On the other hand, geochemical assays allow quantification of concentrations of significant mineral accumulations, but are time-consuming, require total or partial destruction of the core, and long portions of the core are usually averaged. Hyperspectral imaging capturing a wide range of wavelengths to accurately identify spectral signatures of minerals contained in geological samples, is increasingly used in the mining industry (e.g., Tuşa et al., 2020) combining hyperspectral analysis and SEM-MLA achieves fast, comprehensive, and non-destructive core mapping. The objective of this study is to develop a protocol to optimize the geological witnessing process by means of hyperspectral imaging and subsequent analysis, which will be evaluated in the context of a borehole in a magnetite deposit, using the HySpex Mjolnir VS-620 hyperspectral camera with laboratory data acquisition system and validated with samples analysed on the SEM-EDX (Bruker Quantax 4000 dual X-ray detector) of the Marble, Stone and Materials Technology Centre.

Referencias

Tuşa, L., Khodadadzadeh, M., Contreras, C., Rafiezadeh Shahi, K., Fuchs, M., Gloaguen, R., y Gutzmer, J. (2020). *Remote Sensing*, doi:10.3390/rs12071218.

El depósito de Fe-Mn-Pb-Cu (± Au) de Boumaadine: geología, alteración hidrotermal y hallazgos geoquímicos en Jbel Skindis, Alto Atlas oriental, Marruecos

Insights into the Boumaadine Fe–Mn–Pb–Cu (± Au) deposit: geological, hydrothermal alteration, and geochemical findings in Jbel Skindis, eastern High Atlas, Morocco

M. Essalhi[1], A. Tobi[1], L. Barbanson[2], A. Zouggarh[1] y L. Ben Aissi[1]

1 Moulay Ismail University of Meknes, Faculty of Sciences and Techniques, Applied Geology Laboratory, M.B. 509, Boutalamine, Errachidia, Morocco. m.essalhi@umi.ac.ma
2 Retired professor, University of Orléans, France.

Palabras clave: depósito polimetálico, mineralización oxidada, alteración hidrotermal, Jbel Skindis, Alto Atlas oriental.

Resumen

Se han llevado a cabo análisis petrográficos, estructurales y geoquímicos, así como la caracterización, mediante SEM y XRD, de las mineralizaciones de Fe–Mn–Pb–Cu (±Au) en Boumaadine, en Jbel Skindis, región oriental del Alto Atlas, Marruecos. Los resultados revelan un proceso de mineralización complejo, que genera cuerpos metálicos con características distintas y condiciones químicas variadas. La mineralización inicial fue reemplazada y llevó a la formación de cuerpos metálicos enriquecidos en Fe–Mn–Pb, diseminados, y formados bajo condiciones oxidantes, dando como resultado una asociación mineral que incluye coronadita, plumboferrita y calcita. Los eventos posteriores ocurrieron bajo condiciones reductoras, generando venas ricas en sulfuros, constituidas fundamentalmente por galena y pirita y calcopirita en menor cantidad. La mineralización se localiza principalmente en las dolomías del Lías inferior, y está estrechamente ligada a la evolución estructural del área. La falla de Boumaadine, actuando como conducto para los fluidos ascendentes, facilitó el transporte de los metales. Las asociaciones minerales ponen de manifiesto la existencia de distintas fases de alteración hidrotermal con condiciones fisicoquímicas diferentes. Se propone una salmuera oxidante para la formación de los minerales de Fe–Mn, mientras la interacción con un fluido meteórico reductor probablemente formó las mineralizaciones ricas en sulfuros.

Abstract

Petrographic, structural, and geochemical analyses, as well as SEM and XRD techniques, were conducted on the Boumaadine Fe–Mn–Pb–Cu (±Au) mineralization in Jbel Skindis, eastern High Atlas region, Morocco. Findings reveal a complex mineralization process, resulting in orebodies with distinct characteristics and varied chemical conditions. Initial mineralization led to replacement and disseminated Fe–Mn–Pb orebodies under oxidizing conditions, yielding a mineral assemblage including coronadite, plumboferrite, and calcite. Subsequent events occurred under reducing conditions, resulting in sulfide-rich veins predominantly filled with galena, with minor pyrite and chalcopyrite. Mineralization primarily occurs in Lower Liassic dolostones, intricately linked to the structural evolution of the area. The Boumaadine fault, acting as a conduit for ascending fluids, facilitated metal transportation. The mineralogical assemblage underscores multifaceted hydrothermal activity, with diverse physicochemical conditions. An oxidizing brine is proposed as the primary agent for Fe–Mn alteration, while interaction with meteoric reducing fluid likely formed sulfide-rich ores.

Recuperación medioambiental de zonas degradadas por la actividad extractiva de áridos mediante la implantación del cultivo de arándano rojo (*Vaccinium macrocarpon Ait.*)

Environmental recovery of degraded areas by quarrying activities through the implementation of cranberry (*Vaccinium macrocarpon Ait.*) cultivation

A. Fernández-Fernández[1], S. M. Timón-Sánchez[2] y M. C. Moro-Benito[1]

1 Dpto. de Geología, Universidad de Salamanca. Plaza de Los Caídos, s/n, 37008 Salamanca. aff@usal.es; cmoro@usal.es
2 Dpto. de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica, IGME-CSIC. Plaza de la Constitución, 1, 3º, 37001 Salamanca. s.timon@igme.es

Palabras clave: graveras, río Yeltes, recuperación medioambiental, arándano rojo

Resumen

En este trabajo se ha realizado un estudio edafológico y agroclimático de las zonas degradadas por la actividad extractiva de áridos en las terrazas y aluviales (Pleistoceno-Holoceno) del río Yeltes (Salamanca), para determinar las posibilidades de su recuperación mediante el cultivo de arándano rojo. La caracterización físico-química de estos suelos, con su análisis granulométrico, el contenido en materia orgánica (M. O.) y en macronutrientes (P, K, Ca y Mg) y el cálculo de la relación C/N, junto con su estudio mineralógico, indican que no existe ningún factor limitante para este cultivo. Esta investigación también ha permitido localizar las zonas más favorables para su implantación: suelos ligeros, arenosos, con buen drenaje y pH ácido. Igualmente, se han analizado las aguas del entorno de las graveras para determinar su uso como agua de riego, cuya conductividad y el RAS corregido indican que no existe riesgo de salinización del suelo ni peligrosidad por el Na en el agua, y junto con el índice de Scott permiten clasificarlas como aguas de buena calidad. Por último, las características agroclimáticas de la zona, con tres meses de temperaturas medias por debajo de 7ºC, una precipitación media anual de 605,7 mm, en forma de lluvia, y vientos moderados, ponen de manifiesto que son adecuadas para el cultivo del arándano rojo.

Abstract

The aim of this work was to carry out an edaphological and agroclimatic study in the degraded areas by quarrying activities on the terraces and alluvial fans (Pleistocene-Holocene) of the Yeltes river (Salamanca) and to determine the possibility of their recovery through the cultivation of cranberry. The physicochemical characterization of these soils, by granulometric analysis, the determination of organic matter (O. M.) and macronutrients contents (P, K, Ca and Mg) and the estimation of C/N ratio, as well as the mineralogical study of the samples, suggest that there are not limiting factors for cranberries cultivation. This research has also allowed us to locate the areas that are particularly suited to cranberries farming: light, sandy, well-drained and acidic soils. The quality of the water around the gravel pits has also been analysed in order to determine its use in irrigation. The electrical conductivity measurements and the corrected RAS indicate that there is no risk of soil salinization or Na hazard of irrigation water. This, together with the Scott's index enables us to classify it as good quality water. Finally, the analysis of agroclimatic parameters, with three months of average temperatures below 7ºC, an average annual precipitation of 605.7 mm falling as rain, and moderate winds, show that the conditions in the area are favourable for cranberry crops.

Agradecimientos

A Proyecto de Investigación VB99/463AC06 (USAL-Diputación Salamanca-Caja Rural) y GECOCSA.

El potencial de los Tecnosuelos como solución sostenible para la revegetación de áreas mineras.

The potential of Technosols for sustainable mine site revegetation.

S. Fernández-Landero[1], J.C. Fernández-Caliani[1], M.I. Giráldez[2], E. Morales[2] y P.J. Hidalgo[3]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071-Huelva. sandra.fernandez@dct.uhu.es, caliani@uhu.es
2 Dpto. Química, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071-Huelva. giraldez@uhu.es, albornoz@uhu.es
3 Dpto. Ciencias Integradas, Facultad de Ciencias Experimentales, RENSMA, Universidad de Huelva, 21071-Huelva. hidalgo@uhu.es

Palabras clave: restauración ambiental, suelos mineros, Faja Pirítica, economía circular, sostenibilidad.

Resumen

Los Tecnosuelos son mezclas sólidas de materiales residuales o subproductos, estratégicamente formuladas y estructuradas, que pueden ofrecer una alternativa sostenible y eficiente para la recuperación ambiental de ecosistemas degradados.

La aplicación de esta técnica de recuperación natural asistida a suelos mineros de Riotinto y Tharsis (Faja Pirítica Ibérica) ha mostrado unos resultados, a nivel de laboratorio, muy interesantes con respecto a la capacidad regenerativa del suelo afectado por los residuos y los drenajes ácidos de mina.

Los Tecnosuelos se formularon específicamente para abordar las necesidades y requerimientos específicos de estos suelos, tales como: la neutralización de la hiperacidez, la reducción de la movilidad, disponibilidad ambiental y toxicidad de aluminio y elementos traza, el aporte de nutrientes esenciales, así como la estabilización de carbono en suelo y biomasa. Los Tecnosuelos favorecieron la germinación y el crecimiento de *Brassica juncea* en macetas, lo que indica su potencial para la revegetación de áreas mineras degradadas.

En definitiva, la producción de Tecnosuelos podría transformar emplazamientos mineros contaminados en suelos funcionales, con unas condiciones edáficas y ambientales más naturales. Esta tecnología, una vez validada su utilidad y eficacia en ensayos piloto, ofrece una solución viable al sector empresarial interesado en la valorización de residuos y la regeneración de suelos mineros a costes de inversión relativamente bajos.

Abstract

Technosols are solid mixtures of residual materials or by-products that are strategically formulated and structured to offer a sustainable and efficient alternative for the environmental remediation of degraded ecosystems.

The application of this assisted natural remediation technique to mine soils in Riotinto and Tharsis (Iberian Pyrite Belt) has shown interesting results, at the laboratory level, on the regenerative capacity of soil affected by mining waste and acid mine drainage.

Technosols were specifically formulated to address the specific needs and requirements of these soils, such as: neutralizing hyperacidity, reducing the mobility, environmental availability, and toxicity of aluminium and trace elements, providing essential nutrients, stabilizing carbon in soil and biomass. Technosols promoted the germination and growth of *Brassica juncea* in pot-based trials, indicating their potential for the revegetation of degraded mining areas.

Ultimately, the production of Technosols could transform contaminated mining sites into functional soils with improved environmental conditions. This technology, once its usefulness and effectiveness have been validated in pilot tests, offers a viable solution to the business sector interested in the valorization of waste and the regeneration of mining soils at relatively low investment costs.

Mineralización hidrotermal de sulfuros de Co-Ni-Cu en metabasitas de la Cordillera Bética.

Hydrothermal Co-Ni-Cu sulfide mineralization in metabasites from the Betic Cordillera.

A. R. Ferreira[1], J. M. González-Jiménez[1], I. F. Blanco-Quintero[2], L. Yesares[3], R. Piña[3], L. Ortega[3], I. Fanlo[4], F. Gervilla[1,5]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT). CSIC-Universidad de Granada, Avda. de las Palmeras, 4, 18100. Armilla, Granada (España). amirarosa.ferreira.g@csic.es, jmgonzj@ugr.es
2 Dpto. de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690. Alicante (España). if.blanco@ua.es
3 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis, 2, 28040. Madrid (España). myesares@ucm.es, rpinagar@ucm.es, lortega@ucm.es
4 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, Calle Pedro Cerbuna, 12, 10009. Zaragoza (España). fanlo@unizar.es
5 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18002. Granada (España). gervilla@ugr.es

Palabras clave: Sierra de Orihuela, Sierra de Santomera, pirita, cinabrio, hematites.

Resumen

En las Sierras de Orihuela y Santomera afloran rocas básicas hipoabisales intruídas durante el Triásico-Jurásico. Estos cuerpos aflorantes en forma de stocks y diques están compuestos de plagioclasa y clinopiroxeno con textura ofítica y exhiben una red densa de fracturas y diaclasas, de tamaño métrico a milimétrico, rellenas por una mineralización hidrotermal de óxidos de Fe y sulfuros de Fe, Co, Cu, Ni y Hg. Se distinguen dos tipos de rellenos mineralizados: (V1) fracturas horizontales, sin evidencias de deformación, rellenas de epidota ± cuarzo con hematites acicular; y (V2) fallas inversas que cortan a las primeras, rellenas de hematites (± rutilo ± titanita) ± sulfuros de Fe-Ni-Cu-Co (pirita ± carrolita ± cattierita ± vaesita) ± cinabrio. Estos últimos rellenos muestran bordes de alteración formados por epidota ± albita ± clorita ± cuarzo ± carbonatos de Ca-Fe-Mg (calcita-ankerita-dolomita). Estudios geotermométricos sugieren un evento de alteración propilítica, durante el cual la sausuritización de plagioclasas dio lugar a la formación de epidota, y la hidratación de piroxenos a anfíboles. Esto tuvo lugar en condiciones de metamorfismo de esquistos verdes (250-350°C), probablemente en un contexto suboceánico. Se propone un modelo genético que implica la circulación de fluidos hidrotermales a lo largo de las fallas, promoviendo la precipitación de los minerales metálicos.

Abstract

In the Orihuela and Santomera Ranges outcrops of basic rocks, found as stocks and dikes, intruded during the Triassic-Jurassic period are recognized. These bodies are composed of plagioclase and clinopyroxene with an ophitic texture and exhibit a dense network of fractures and faults ranging in size from metric to millimetric, hosting a hydrothermal mineralization of Fe-oxides and sulfides of Fe, Co, Cu, Ni and Hg. Two types of mineralized infillings are identified: (V1) horizontal fractures without evidence of deformation, filled with epidote ± quartz with acicular hematite; and (V2) reverse faults displacing the former ones, infilled with hematite (± rutile ± titanite) ± Fe-Cu-Co-Ni sulfides (pyrite ± carrollite ± cattierite ± vaesite) ± cinnabar. These later infillings alteration walls made up of epidote ± albite ± chlorite ± quartz ± Ca-Fe-Mg carbonates (calcite-ankerite-dolomite). Geothermometric studies suggest an event of propylitic alteration involving saussuritization of plagioclase, leading to the formation of epidote, and hydration of pyroxenes into amphibole. It took place under conditions of greenschist facies metamorphism (250-350°C), probably in a suboceanic context. The proposed genetic model involves the circulation of hydrothermal fluids along faults, promoting the precipitation of metallic minerals.

Inferencias petrogenéticas sobre la pegmatita litinífera de Gonçalo (Portugal) basadas en la química del cuarzo.

Petrogenetic inferences on the lithium-rich pegmatite from Gonçalo (Portugal) based on quartz chemistry.

I. Garate-Olave[1], E. Roda-Robles[1], J. Errandonea-Martin[1], A. Lima[2,3] y A. Müller[4,5]

1 Departamento de Geología. Universidad del País Vasco, 48940 Leioa (España) idoia.garate@ehu.eus; encar.roda@ehu.eus; jon.errandonea@ehu.eus
2 Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território. Universidade do Porto, 4169-007 Porto (Portugal)
3 Institute of Earth Sciences (Porto Pole), Porto, Portugal; allima@fc.up.pt
4 Natural History Museum, University of Oslo, P.O. Box 1172 Blindern, 0318 Oslo (Norway); a.b.muller@nhm.uio.no
5 Natural History Museum, London SW7 5BD (UK)

Palabras clave: pegmatita, cuarzo, litio, Zona Centro Ibérica, elementos traza.

Resumen

Gracias a los avances tecnológicos en los métodos micro-analíticos, el estudio geoquímico del cuarzo, a pesar de contener valores muy bajos en elementos traza, se ha convertido en una herramienta muy útil para comprender la historia de cristalización de las pegmatitas Para el presente estudio se ha seleccionado un dique subhorizontal con una potencia de 2,5 m de Gonçalo (Guarda, Portugal) localizado en la Zona Centro Ibérica del Macizo Ibérico. Esta pegmatita intruye un granito Bt (± Ms) del batolito de Guarda, y está compuesta por cuarzo, feldespato-K, albita, moscovita, mica de Li, topacio, berilo, fosfatos de Al, y óxidos de Nb-Ta-Sn. El cuerpo presenta una alternancia de bandas ricas en lepidolita y otras ricas en albita, con algunos minerales mostrando texturas en peine. Con el objetivo de determinar el fraccionamiento interno durante la cristalización, se han muestreado distintos niveles dentro del dique. Los elementos traza que muestran mayores concentraciones en el cuarzo son el Al y Li, con una variación de 368–1275 ppm y 40–222 ppm, respectivamente. Por otro lado, el Ge y el Ti presentan contenidos menores, de entre 3–7 ppm y 3–30 ppm, respectivamente. La falta de un patrón de variación en estos elementos traza a lo largo del dique sugiere que durante el proceso de cristalización no se produjo un fraccionamiento interno. Esta ausencia de fraccionamiento pudo deberse a la rápida cristalización, probablemente relacionada con el fuerte subenfriamiento producido en el sistema por la exsolución de un fluido acuoso desde el fundido pegmatítico al inyectarse en las fracturas dentro del granito.

Abstract

Owing to technological advances of micro-analytical methods, the geochemical study of quartz, in spite of having very low trace element contents, has become a useful tool to better understand the fractionation and crystallization of pegmatite melts. For this study, the Gonçalo pegmatite, located in the Central Iberian Zone of the Iberian Massif in Guarda, Portugal, has been selected for quartz trace element investigations. The pegmatite forms a subhorizontal dyke with a thickness of about 2.5 m and emplaced into a Bt (± Ms) granite of the Guarda batholith. Minerals of the pegmatite are quartz, K-feldspar, albite, muscovite, Li-mica, topaz, beryl, Al-phosphates, and Nb-Ta-Sn oxides. The body shows alternating lepidolite-rich and albite-rich layers with some minerals exhibiting comb textures. In order to determine the internal fractionation during crystallization, quartz from different layers of the dyke was sampled. Aluminum and Li are the most abundant trace elements analyzed in quartz, ranging from 368 to 1275 ppm and 40 to 222 ppm, respectively. Conversely, Ge and Ti exhibit markedly lower contents of 3 to 7 ppm and 3 to 30 ppm, respectively. The absence of distinct element variations among the different pegmatite layers suggests that during crystallization no internal fractionation occurred. This absence of fractionation is may be due to rapid crystallization, probably caused by strong undercooling of the system. The latter might relate to the exsolution of aqueous fluids from the pegmatite melt during emplacement.

Monacita nodular (‘gris’) en placeres (Matamulas, Ciudad Real): edad y composición química.

Nodular (‘grey’) monazite in placers (Matamulas, Ciudad Real): age and chemical composition.

S. García de Madinabeitia[1], A. Beranoaguirre[2], P. Martínez Salas[3], E. Burkhalter Thiebaut[4] y J.I. Gil Ibarguchi[5]

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, 48940 Leioa. sonia.gdm@ehu.eus
2 Institute of Applied Geosciences, Karlsruhe Institut of Technology, 76131 Karlsruhe; Frankfurt Isotope and Element Research Center, Goethe-Universität, 60438 Frankfurt. aratz.beranoaguirre@ehu.eus
3 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, 48940 Leioa. pablomsalas2@gmail.com
4 Quantum Minería SL, Santander 3, 28003 Madrid. enrique.burkhalter@quantummineria.es
5 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, 48940 Leioa. josei.gil@ehu.eus

Palabras clave: monacita, Matamulas, edad U-Pb, ablación láser, placer, tierras raras.

Resumen

El depósito tipo placer de Matamulas (Ciudad Real) está formado por nódulos de monacitta lenticulares a subesféricos de 0,1 a 2 mm y coloración variada. Los nódulos poseen inclusiones de cuarzo, clorita, moscovita y opacos. Se asume que proceden de las pizarras negras ordovícicas de la zona. Se trata de un depósito con gran potencial económico (Vergara Espuelas, 2019 y referencias incluidas). Se han datado mediante ablación láser e ICP-MS tres nódulos de diferente coloración, obteniéndose edades U-Pb de 399 ± 2 Ma a 402 ± 2 Ma, lo que implica un origen relacionado con la diagénesis o metamorfismo de enterramiento de las pizarras negras y no con el metamorfismo regional varisco. Comparadas con las típicas monacitas (‘amarilllas’) ígneas, las monacitas nodulares estudiadas son más pobres en La, Th y U, pero más ricas en Pr, Nd y Sm, lo que explica la gran relevancia económica del yacimiento. Las REE presentan una distribución concéntrica con una marcada zonación. Pr, Nd y Sm se concentran en la parte central y disminuyen hacia los bordes, La y Ce aumentan hacia los bordes. Asumiendo escasas variaciones de P y T a lo largo del proceso de formación de los nódulos, esto sugiere cambios significativos en la concentración de tierras raras en la fase fluida durante dicho proceso, posiblemente relacionados con un descenso de aH_2O durante la destrucción de materia orgánica.

Abstract

The placer deposit of Matamulas (Ciudad Real) is made of monazite nodules 0.1 to 2 mm in size, lenticular to subspherical shape and variable colouring. The nodules contain inclusions of quartz, chlorite, muscovite and opaques. It is assumed that the nodules derive of nerby Ordovician black shales. This is a deposit of high economic potential (Vergara Espuelas, 2019 and references therein). Three nodules of different colour have been dated by means of laser ablation and ICP-MS that provided U-Pb ages of 399 ± 2 Ma to 402 ± 2 Ma. This implies an origin related to diagenesis or burial metamorphism of the black shales and not to the Variscan regional metamorphism. By comparison with typical (‘yellow’) igneous monazites, the nodular monazites are poorer in La, Th and U but richer in Pr, Nd and Sm, which stands out the great importance of the deposit. The REE contents present a concentric distribution with a marked zoning from core to rim. Pr, Nd and Sm concentrate in the central parts decreasing towards the rims, La and Ce vary inversely. Assuming no major changes in P and T through the process of nodule formation, this suggests important variations in the concentration of rare earth elements in the fluid phase during that process, possibly related to aH_2O decrease through destruction of organic matter.

Referencias

Vergara Espuelas, R. (2019) *Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía*, 14, 67-77.

Suelos con horizonte argílico desarrollados sobre materiales calizos en zonas interiores al norte de la provincia de Alicante

Soils with an argillic horizon developed on limestone materials in interior areas north of the Alicante province

L. García-España[1], V. Pons[2] y M.D. Soriano[3]

1 IES Bernat de Sarria. Departamento de Biología. C/ Fragata 5. Benidorm. 03503 Alicante. laugars2@alumni.upv.es.
2 Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Farmacia, Universitat de Valencia. Vicente Andrés Estelles s/n. Burjasot, Valencia. 46100. vicente.pons@uv..es.
3 Departamento de Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, Universitat Politécnica de Valencia. Camí de Vera s/n, Valencia. 46023. asoriano@prv.upv.es.

Resumen: Se estudian los suelos desarrollados sobre materiales calizos consolidados al norte de la provincia de Alicante, desarrollados sobre los macizos calcáreos y sierras cretácicas interiores que han sufrido repetidos incendios forestales de elevada intensidad, afectando a su estructura y contenido en materia orgánica.

Se trata de suelos arcillosos pertenecientes taxonómicamente al grupo de los Luvisoles. Se caracterizan por presentar una textura fina, en los horizontes Bt, alto contenido en materia orgánica, al tratarse de suelos forestales, y con valores elevados de la capacidad de intercambio catiónico.

Los Luvisoles cálcicos presentan además potentes horizontes Btk recarbonatados y con abundantes nódulos de carbonatos. La fracción arcilla estudiada por difracción de rayos X muestra altos contenidos de arcillas 1:1, como caolinita, y de arcillas 2:1, tales como la illita. Las diferencias mineralógicas de la fracción arcilla entre ambos tipos de Luvisoles descritos radica en la presencia de montmorillonita con distinta proporción de minerales de la fracción arcilla, como son la illita y caolinita, e interestratificados originados con arcillas expandibles en el caso de los Luvisoles cálcicos.

Palabras clave: horizontes argílicos, mineralogía, suelos.

Abstract: *The soils developed on consolidated limestone materials are studied in the north of the province of Alicante, which have suffered repeated high-intensity forest fires, affecting their structure and organic matter content.*

These are clay soils belonging to the Luvisols group. They are characterized by having a fine texture, with Bt horizons, high organic matter content, as they are forest soils, and high exchange capacity values.

Calcium Luvisols also present thick recarbonated Btk horizons and abundant carbonate nodules. The clay fraction studied by X-ray diffraction shows high contents of 1:1 clays, such as kaolinite, and 2:1 clays, such as illite. The mineralogical differences of the clay fraction between both types of Luvisols lie in the presence of montmorillonite with different proportions of minerals from the clay fraction such as illite and kaolinite, and interstratified structures with expandable clays in the case of calcium Luvisols.

Key words: clay horizons, mineralogy, soils.

INTRODUCCIÓN

Los suelos estudiados se localizan en las laderas formadas por materiales calizos de edad Cretácica, desarrollados en zonas con materiales carbonatados consolidados, entre los que se encuentran calizas brechoides de colores grises alteradas y dolomías blanco-pardas (sierra de L´Aixorta), donde se ha estudiado el perfil P1.

Los materiales consolidados del Jurásico lo componen calizas, pertenecientes al Malm que se desarrollan en la zona de Segaria (perfil P2).

El periodo Neocomiense se encuentra ampliamente representado en las proximidades de Jesús Pobre y en la ladera este del Mirabó, en la zona de Castell de Castells (perfil P3), en las proximidades de Orba y en la falda sur de la sierra de Segaria. Dentro del Aptense del Coll de Rates hay que destacar como materiales consolidados las calizas blancas compactas sin estratificaciones, calizas con rudistas y calizas blancas duras y sacaroideas con escasos fósiles (IGME, 1964) donde se encuentra el perfil representativo P4.

Hacia el sureste los materiales calizos se asocian con margas que se encuentran en bancos gruesos del Oligoceno. Mientras que las calizas careadas afloran en el suroeste de la Vall d´Ebo (perfil P5); y en la umbría de

la sierra del Ferrer, después del paso Dels Bandolers, junto al municipio de Tárbena (perfil P6).

La dedicación de estas áreas es eminentemente forestal con masas boscosas de *pinus halepensis*.

El tipo climático es semiárido en las zonas próximas a la costa, cambiando a clima subhúmedo en las zonas montañosas interiores que se elevan sobre los 1000 metros de altitud, por lo que en la zona se observa un importante gradiente climático desde la costa hasta la zona montañosa de interior.

Las unidades taxonómicas de suelos corresponden a suelos muy evolucionados del tipo Luvisol. Se encuentran Luvisoles crómicos y cálcicos. Los primeros se desarrollan sobre los materiales calizos consolidados compactos de calizas blancas duras y sacaroideas (P1, P2, P3). Mientras que los Luvisoles cálcicos se desarrollan sobre calizas pardas y calizas brechoides pardo claro con parte margosa del Eoceno (P4, P5, P6).

La mineralogía de la fracción arcilla identifica estos dos tipos diferentes de Luvisoles con minerales de arcilla dominados por la illita y caolinita con presencia de clorita y montmorillonita y abundancia de estratificados de estas asociaciones arcillosas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se describen los materiales geológicos IGME (1964), y los perfiles de suelo desarrollados sobre dichos materiales mencionados siguiendo la clasificación F.A.O. (1998), estudiando composición granulométrica y clase textural de los distintos horizontes, la estabilidad estructural, pH y conductividad eléctrica, textura (método de la pipeta de Robinson), capacidad de retención de agua, y capacidad de intercambio catiónico (MAPA, 1988). La mineralogía de la fracción arcilla se realizó por difracción de rayos-X. Se utilizó un difractómetro tipo Diano, XRD 8000. La estimación semicuantitativa relativa se realizó teniendo en cuenta los poderes reflectantes indicados por Martín-Pozas *et al.*, (1969).

RESULTADOS

En la zona se localizan pequeños valles rodeados de macizos calcáreos. En los primeros afloran materiales del cuaternario rodeados de rocas calizas, dolomías y calcarenitas de la serie prebética (IGME, 1964).

La superficie que cubren los Luvisoles en Europa alcanza la cifra aproximada de unos 610,000 km^2, es decir el 15% de la cobertura de suelos continental, siendo pues el segundo Grupo de Sueltos de Referencia de la F.A.O. (1998) que más abunda en el continente tras los Cambisoles (Ibáñez, 2020).

En el área de estudio se describen suelos tipo Luvisol crómico y Luvisol cálcico, en ambos casos se ha producido acumulación de arcilla cuyo origen son las *terras rosas* originadas por la caliza. En ambos la textura es arcillosa en los horizontes Bt, que se desarrollan directamente sobre la caliza en los Luvisoles crómicos (P1, P2 y P3) (Fig. 1) y se encuentran totalmente descarbonatados. Presentan abundancia de poros finos, estructura construida, bien desarrollada en estos. La topografía abrupta favorece la dedicación forestal de estas unidades con elevada altitud.

Los luvisoles cálcicos presentan mayor espesor y un proceso de carbonatación secundaria que origina capas endurecidas calcáreas con una menor porosidad, una elevada reacción al carbonato, con frecuentes elementos gruesos tamaño grava y menor actividad biológica. Los horizontes se endurecen en profundidad, disminuyendo la actividad biológica por el proceso de carbonatación. Los horizontes más profundos Btk muestran una textura fina con estructura fuerte, y con frecuentes nódulos de carbonatos debidos al movimiento de bicarbonato por grietas y posterior paso a carbonato cálcico y magnésico y su precipitación, así como una fuerte reacción calcárea, mientras que en los horizontes superficiales se origina acumulación de materia orgánica que da lugar a potentes horizontes Ah con elevada porosidad, estructura granular o grumosa y textura franco o franco-arcillosa.



FIGURA 1. *Perfil de Luvisol crómico en el área de estudio.*

Los Luvisoles crómicos están asociados a Leptosoles líticos sobre estos materiales consolidados que litológicamente se componen de calizas, calizas brechoides y dolomías pardas de edad jurásica y cretácica y originan suelos de textura fina, descarbonatados, con una composición mineralógica formada por arcillas 1.1 mayoritariamente. La mineralogía de la fracción arcilla presenta escasa abundancia de arcillas expandibles tipo montmorillonita, pero se encuentran interestratificados

de montmorillonita y clorita. Como minerales acompañantes se han encontrado la calcita, cuarzo y feldespatos.

Los Luvisoles cálcicos como unidades taxonómicas descritas se asocian a Regosoles y Calcisoles. Se localizan en numerosas sierras y macizos calcáreos, como en las sierras de Segaria, el macizo del Montgó y zonas adyacentes con utilización forestal, encontrándose también calizas arrecifales con bancos no cuajados y calizas con intercalaciones margosas que constituyen las dos series del Aptense inferior, aflorando en zonas como el Coll de Rates.

Los suelos aquí desarrollados presentan un perfil que consta de un horizonte mineral superficial Ah de dedicación forestal con abundante materia orgánica, y horizontes subsuperficiales donde se observan acumulaciones de arcilla recarbonatada que originan un horizonte Btk, causados por procesos de argiluviación y posterior carbonatación secundaria (P4, P5 y P6) (Fig 2).



FIGURA 2. *Perfil Luvisol cálcico en el área de estudio.*

Estos suelos también han sufrido repetidos incendios forestales que afectan a la estabilidad de los agregados en algunas zonas, donde las altas temperaturas del incendio modifican la estabilidad estructural (Soriano, 1984) (Fig. 3).



FIGURA 3. *Zonas incendiadas en el área de estudio.*

Tanto en Luvisoles crómicos como cálcicos la mineralogía se compone de arcillas illíticas y caoliníticas. Los horizontes Ah muestran estructuras favorables y un complejo de cambio saturado en bases, presentan una mayor dominancia de caolinita e illita en su fracción arcilla, con calcita y cuarzo como componentes acompañantes junto a ortoclasa y plagioclasas (Tabla I).

Perfil	**I**	**K**	**M**
Luvisol cálcico	+++	++	+
Luvisol crómico	+++	+	-

TABLA I. Composición mineralógica de la fracción arcilla de los perfiles tipo estudiados. I Illita, K Caolinita, M Montmorillonita

En los horizontes Bt los minerales de la arcilla mayoritarios son igualmente illita y caolinita, poseen escaso contenido en clorita y minerales acompañantes.

En los Luvisoles cálcicos disminuye la proporción de caolinita, pero aparecen trazas de montmorillonita observando *clay skins* y cutanes propios de este tipo de arcillas. También se observa abundancia de interestratificados formados por la combinación de minerales como illita y montmorillonita (Tabla I). En ellos es frecuente la presencia de calcita, típico mineral de génesis sedimentaria, que se forma bien de forma química, mediante evaporación de soluciones muy ricas en bicarbonato cálcico (caliza química), o bien por la actividad de los organismos marinos, que forman sus conchas de carbonato cálcico y que al morir sedimentan formando capas duras de este mineral.

CONCLUSIONES

En la zona de estudio, los materiales consolidados calizos originan los diferentes tipos de suelos, clasificados como Luvisoles crómicos y cálcicos. Los primeros presentan horizontes Bt no carbonatados, mientras que los horizontes Btk de Luvisoles cálcicos han sufrido una recarbonatación secundaria.

La diferencia mineralógica de los minerales de la arcilla radica en la presencia de montmorillonita con

distinta proporción de minerales de la fracción arcilla como illita y caolinita, e interestratificados originados con arcillas expandibles en el caso de los Luvisoles cálcicos.

REFERENCIAS

Estévez, A. y Soria, J. (1991): P*arque Natural del Montgó. Estudio Pluridisciplinar* València. Generalitat Valenciana. 376 pp.

F.A.O. (1998): *World Reference Base for Soil Resources.* World Soil Resources Report. 84. ISSS-AISS-IBG. ISRIC, 88 p.

Ibáñez, J. (2020): *Luvisoles, Luvisoles: geografía ambiente y paisaje, Luvisoles Uso y Manejo.* Luvisoles en Europa - Un Universo invisible bajo nuestros pies (madrimasd.org)

IGME (1964): *Geología de la hoja de Alicante.* Madrid. 123p.

MAPA (1988): *Métodos Oficiales de Análisis.* Vol. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 176.

Martín-Pozas, J.M., Martin-Vivaldi, J.L. y Rodriguez-Gallego, M. (1969): Análisis cuantitativo de los filosilicatos de la arcilla por difracción de rayos X. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química.* Serie B.L.V., 109-112.

Soriano, M.D. (1988): *Luvisoles desarrollados sobre materiales calizos en la provincia de Valencia.* Tesis Doctoral. Universitat de Valencia. 590 p.

Suelos desarrollados sobre sedimentos aluviales en la zona de Benisa (Alicante)

Soils developed on alluvial sediments in the Benisa area (Alicante)

L. García-España[1], V. Pons[2] y M.D. Soriano[3]

1 IES Bernat de Sarria. Departamento de Biología. C/ Fragata 5. Benidorm. 03503 Alicante. laugars2@alumni.upv.es.
2 Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Farmacia, Universitat de Valencia. Vicente Andrés Estellés s/n. Burjasot, Valencia. 46100. vicente.pons@uv.es
3 Departamento de Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, Universitat Politécnica de Valencia. Camí de Vera s/n, Valencia. 46023. asoriano@prv.upv.es.

Resumen: Se estudian las características físicas y químicas junto a la mineralogía de la fracción arcilla de perfiles de suelos desarrollados al norte de la provincia de Alicante, sobre materiales sedimentarios de origen aluvial formados sobre los márgenes de los cauces de agua más importantes que transcurren en la zona de Benisa. Los suelos se caracterizan por presentar una textura gruesa, con contenidos en sales moderados y valores bajos de la capacidad de intercambio catiónico. Los valores de materia orgánica son bajos, presentando también una deficiencia en nutrientes esenciales, a pesar de que su dedicación es eminentemente agrícola, lo cual se ve favorecido por la topografía llana, que hace que sean zonas aptas para los cultivos que se realizan en dicha zona. Los materiales calcáreos de la zona dan origen a suelos carbonatados con contenidos altos de este parámetro, siendo frecuentes las acumulaciones, concreciones y costras calcáreas. Los horizontes de los perfiles estudiados presentan una variación mineralógica diferenciada, reflejando las fluctuaciones causadas por su origen aluvial y sedimentario, producidos por los aportes ocasionados en las diferentes avenidas de los ríos, con variaciones en las arcillas dominantes como caolinita e illita.

Palabras clave: sedimentos aluviales, mineralogía, suelos.

Abstract: *The physical and chemical characteristics are studied along with the mineralogy of the clay fraction of soil profiles developed in the north of the province of Alicante, on sedimentary materials of alluvial origin formed on the margins of the most important water channels that run in the area of Benissa. The soils are characterized by having a coarse texture, with moderate salt content and low cation exchange capacity values. The organic matter values are low, also presenting a deficiency in essential nutrients despite the fact that their use is eminently agricultural, which is favored by the flat topography that makes them suitable areas for the crops grown in such area. The calcareous materials in the area give rise to carbonate soils with high contents of this parameter, with accumulations, concretions and calcareous crusts being frequent. The horizons of the studied profiles present differentiated mineralogical variation, reflecting the fluctuations caused by their alluvial and sedimentary origin, produced by the contributions caused by the different avenues of the rivers, with variations in the dominant clays such as kaolinite and illite.*

Key words: alluvial sediments, mineralogy, soils.

INTRODUCCIÓN

Los suelos objeto de estudio se localizan en la hoja topográfica 822, concretamente en los términos municipales de Gata de Gorgos (perfil 1), Benisa (perfil 2) y la Vall d´Ebo (perfil 3), en zonas próximas a los cauces de los ríos. Otros perfiles se sitúan en pequeños valles, como Els Plans (perfil 4) en las proximidades de Ondara, atravesado por el rio Girona; Rompulletes (perfil 5) junto a Jesús Pobre en la cara sur del Montgó; y el Pla de Feliu (perfil 6) junto al municipio de Teulada, en el lecho del rio Gorgos.

Los materiales Cuaternarios aflorantes están constituidos por sedimentos detríticos y tierras arcillosas sabulosas (Flügel, 2010). En conjunto el área corresponde a una alargada cubeta sinclinal con los extremos del eje mayor sudoeste – noreste, pinzado hacia el interior (IGME, 1964).

Las unidades taxonómicas de suelos corresponden a suelos poco evolucionados Fluvisoles y Regosoles asociados también a Calcisoles. Los primeros se desarrollan sobre las primeras terrazas fluviales o antiguos cauces, e identifican los suelos más fértiles del área (Fig. 1).

El tipo climático va de seco-subhúmedo a subhúmedo en las zonas interiores, con un tipo climático semiárido en las zonas próximas a la costa (Penyarroja, 1990).

Gran parte de la industria se basa en el cultivo de la vid y el procesado del vino, con otros cultivos como la almendra y el olivo y pequeñas extensiones de huerta.



FIGURA 1. *Paisaje del área de estudio.*

MATERIAL Y MÉTODOS

Se describen los materiales geológicos del Cuaternario (IGME, 1964), y los perfiles de suelo desarrollados siguiendo la clasificación F.A.O. (1998).

En los perfiles de suelos se estudia la estabilidad estructural, pH y conductividad eléctrica, contenido de sodio intercambiable, capacidad de intercambio catiónico, composición granulométrica y clase textural de los distintos horizontes (método de la pipeta de Robinson), así como la capacidad de retención de agua, siguiendo los métodos oficiales de análisis de suelos (MAPA, 1988). La composición mineralógica de la fracción arcilla (>2 µ) se determinó por difracción de rayos-X en muestras de polvo simple, tratadas con magnesio, o tratadas posteriormente a la temperatura de 550ºC, y otras saturadas con etilenglicol. Para su identificación se utilizaron como espaciamientos basales (001) los indicados por Brindley (1980) y Besoain (1985). La estimación semicuantitativa relativa se realiza teniendo en cuenta los poderes reflectantes indicados por Martín-Pozas *et al*., (1969). Se utilizó un difractómetro tipo Diano, XRD 8000.

RESULTADOS

En la zona de estudio afloran materiales del cuaternario junto a rocas calizas, dolomías y calcarenitas de la serie prebética (IGME, 1964). Sobre los materiales poco consolidados se originan suelos de textura gruesa con alternancia de gravas y con predominio de arcillas 1:1. La mineralogía de arcillas indica que no existen arcillas expandibles, salvo interestratificados de montmorillonita y clorita. Se observan minerales acompañantes como la calcita, cuarzo y feldespatos. Los suelos presentan un perfil que consta de un horizonte mineral superficial A, y horizontes subsuperficiales que muestran diferentes sequms de formación, con una secuencia típica Ah o Ap sobre horizontes B alternados con capas 2Ap y 2B inferiores (Fig. 2).

Las unidades taxonómicas descritas corresponden a Fluvisoles calcáreos diferenciados por su distinta profundidad. Se encuentran asociados a Regosoles y Calcisoles que se localizan en zonas amplias en las proximidades del municipio de Gata de Gorgos, en la cara sur del macizo del Montgó (Estévez y Soria, 1991; Fumanal, 1997), la primera unidad de suelos se encuentra atravesada por el rio Gorgos y litológicamente se compone de materiales detríticos del Cuaternario, margas del Cretácico y facies TAP. La dedicación agrícola de esta unidad se ve favorecida por una topografía llana a escasos 30 m de altitud (Fig. 1). La textura es franco-arenosa en los horizontes Ah y AC, que se transforma en franca en los horizontes más profundos 2C. En los horizontes superficiales es frecuente la presencia de poros y poseen una elevada reacción al clorhídrico, con elevado contenido en carbonatos, frecuentes elementos gruesos y elevada actividad biológica. Los horizontes se endurecen en profundidad disminuyendo la actividad biológica y con escasos elementos gruesos de tamaño grava, aunque son frecuentes las capas pedregosas que indican la deposición de materiales arrastrados por las aguas del rio. El horizonte más profundo 2C muestra una textura más fuerte y gruesa, con frecuentes nódulos de carbonato procedentes del arrastre de materiales causados por las avenidas del río, y una fuerte reacción calcárea. La capa pedregosa indica la evidencia de un aporte más antiguo que los horizontes superiores.



FIGURA 2. *Perfil y detalle de materiales en el área de estudio.*

Igualmente, se han descrito Fluvisoles eútricos con inclusiones de Luvisoles crómicos en los valles de zonas cercanas a las masas forestales. Se sitúan en las proximidades de los municipios de Denia, Ondara y Jalón. Se trata de zonas con intensa actividad agraria dedicadas mayoritariamente al cultivo de la vid. Litológicamente se componen por materiales del cuaternario indiferenciados, rañas y pie de monte con escasa pendiente, siendo frecuente una elevada pedregosidad superficial que limita el uso del suelo.

En este caso los suelos tienen un ligero color grisáceo con textura franco arcillosa en superficie que se transforma en franca en profundidad, para luego volver a ser franco-arcillosa.

La secuencia del perfil corresponde a Ah, 2C, 3C y 4C. Los horizontes son de naturaleza calcárea siendo frecuentes los poros de pequeño tamaño y pocos elementos gruesos de tamaño grava. Escasos nódulos de carbonato y frecuentes raíces finas en superficie que disminuyen en profundidad.

En las proximidades del municipio de la Vall d´Ebo los recientes incendios forestales muestran la fragilidad de los agregados del suelo sometidos a altas temperaturas durante el incendio. También se observan capas de acumulación de cenizas enterradas entre los distintos horizontes.

Mineralógicamente tanto los Fluvisoles calcáreos como los Fluvisoles eútricos se componen de arcillas 1:1 y 2:1. Los horizontes A y B muestran estructuras favorables y un complejo de cambio saturado en bases. Presentan una mayor dominancia de caolinita e illita en su fracción arcilla y abundante cuarzo. Como minerales heredados se encuentran principalmente: cuarzo, ortoclasa y plagioclasas, observándose un aumento de dichos minerales acompañantes en profundidad, paralelamente a la disminución de los minerales arcillosos dominantes (Tabla 1).

Los contenidos de los minerales mayoritarios illita y caolinita, oscilan con la profundidad denotando cambios secuenciales en su procedencia. Los Fluvisoles eútricos poseen menor contenido en clorita, y mayor abundancia de interestratificados que los Fluvisoles calcáreos, formados por la combinación de estos minerales con montmorillonita (Tabla I).

Perfil	**I**	**K**	**C**
Fluvisol calcáreo	++	+++	+
Fluvisol eútrico	+++	++	-

TABLA I. Composición mineralógica de la fracción arcilla de los perfiles tipo estudiados. I Illita, K Caolinita, C Clorita.

Las arcillas mayoritarias illita y caolinita se consideran heredadas de los materiales depositados en los diferentes aportes aluviales y que proceden de los materiales transportados de las áreas adyacentes originando suelos jóvenes.

CONCLUSIONES

En la zona de estudio, los materiales poco consolidados que rellenan los valles originan los diferentes tipos de suelos. Se desarrollan principalmente suelos carbonatados, procedentes del depósito de materiales con un potente espesor que dan lugar al desarrollo de horizontes 2BC y 2C. En estos casos los minerales de la arcilla dominantes son del tipo illita y caolinita, con la presencia de clorita e interestratificados originados con arcillas expandibles. Se aprecian oscilaciones de la fracción arcilla dominante y de los minerales mayoritarios, indicando la procedencia de horizontes originados por diferentes aportes aluviales.

REFERENCIAS

Besoaín, E. (1985): *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José, CR, IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos, Nº. 60, 1216 p.

Brindley, G.W. (1980): Quantitative X-ray mineral analysis of clays. En*: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification.* (G.W. Brindley, G. Brown, eds.). Mineralogical Society Monograph, vol. 5, London, 411-438.

Estévez, A. y Soria, J. (1991): *Parque Natural del Montgó. Estudio Pluridisciplinar* València. Generalitat Valenciana, 376 pp.

F.A.O. (1998). *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Report. 84. ISSS-AISS-IBG. ISRIC, 88 p.

Flügel, E. (2010): *Microfacies of Carbonate Rocks*, 2nd ed. Springer-Verlag Berlin, Germany. 976 p.

Fumanal, M.P. (1997): *Els paisatges Del Montgó i del seu entorn. Aspectes geomorfológics i evolució quaternària.* Aguaits, 13-14: 7-22.

IGME (1964): *Geología de la hoja de Alicante.* Madrid. 123 p.

MAPA (1988): *Métodos Oficiales de Análisis*. Vol. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 176 p.

Martín-Pozas, J.M., Martin-Vivaldi, J.L. y Rodriguez-Gallego, M. (1969): Análisis cuantitativo de los filosilicatos de la arcilla por difracción de rayos X. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química.* Serie B.L.V., 109-112.

Penyarroja, D. (1990): Precipitació a l'extrem oriental de les serres Bètiques. En: *Actes del III Congrés d'estudis de la Marina Alta.* 583-590.

Cartografía mineral de formas del relieve con imágenes AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*): un ejemplo en la cuenca del Tajo (Centro de España).

Mineral mapping of landforms with AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) images: an example in the Tagus basin (Central Spain).

E. García-Meléndez[1], M. Ferrer-Julià[1], J.A. Cruz[1], J. García-Rivas[2], M. Suárez[3], P. Valenzuela[1], E. García-Romero[2], E. Colmenero-Hidalgo[1] e I. Pereira[1]

1 Grupo de Investigación de Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León. Campus de Vegazana, s/n, 24071, León, España.
egarm@unileon.es, mferj@unileon.es, jcrum@unileon.es, pvalm@unileon.es, ecolh@unileon.es, iperr@unileon.es
2 Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Avda. José Antonio Novais, s/n, 28040- Madrid, España. javiga31@ucm.es, mromero@ucm.es
3 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37008-Salamanca.
msuarez@usal.es

Palabras clave: teledetección, carbonatos, sulfatos, filosilicatos, geomorfología.

Resumen

La evaluación de los datos de alta resolución espectral y espacial registrados por el espectrómetro de imágenes AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*) para cartografiar la composición mineral de formas del relieve, muestra cómo se puede obtener información útil para la exploración de recursos minerales y rocas industriales y su relación con la configuración geomorfológica. El área de estudio se localiza en la cuenca sedimentaria cenozoica del Tajo en unidades geológicas formadas por rocas arcillosas (esmectitas), evaporíticas (yeso, anhidrita), carbonatadas (calizas y dolomías) y sedimentos detríticos asociados a las unidades morfosedimentarias cuaternarias principalmente de origen fluvial. El estudio se basa en la respuesta espectral de minerales clave como carbonatos, sulfatos y filosilicatos, con el fin de cartografiar su presencia en las superficies planas y alomadas en la zona situada entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama. Se utilizan las técnicas de los cocientes de bandas y la clasificación SAM (*Spectral Angle Mapper*). Los resultados generales de este estudio muestran que las técnicas hiperespectrales son útiles para la localización detallada de zonas con minerales específicos que no aparecen en los mapas geológicos y geomorfológicos convencionales.

Abstract

High spatial resolution data recorded by the AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) imaging system is evaluated for mapping the mineral composition of low relief landforms. The study area is located in the Cenozoic Tagus sedimentary basin (Central Iberian Peninsula) in geological units made of clay (smectites), evaporitic (gypsum, anhydrite), carbonate rocks (limestones and dolostones) and clastic sediments related to Quaternary morpho-sedimentary units, mainly of fluvial origin. The study is based on the spectral response of key minerals such as calcite, gypsum and phyllosilicates in order to map their presence in the flat and gently sloping surfaces of the area located between the Tagus, Tajuña and Jarama rivers. Two mapping techniques were used: image band ratios to enhance diagnostic mineral absorption features and the SAM (Spectral Angle Mapper) algorithm. The general results show the good discrimination of specific mineral groups and their spatial distribution, improving the information provided by the conventional geological and geomorphological maps.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto ISGEOMIN (ESP2017-89045-R) del Ministerio de Ciencia e Innovación y por el Proyecto HYPOPROCKS (PDC2021-121352-100) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

Disorder in kaolinite: XRD-IR systematics.

Grado de desorden en caolinita: sistemática DRX-IR.

A. García-Vicente[1], E. Siranidi[2], E. García-Romero[3,4], M. Suárez[1], G.D. Chryssikos[2]

1 Department of Geology, University of Salamanca. Plaza de la Merced, s/n, 37008 Salamanca, Spain.andrea_gar@usal.es. msuarez@usal.es
2 Theoretical and Physical Chemistry Institute, National Hellenic Research Foundation. Vassileos Constantinou Ave., Athens 11635, Greece. gdchryss@eie.gr, esiranidi@eie.gr
3 Department of Petrology and Mineralogy, Complutense University of Madrid. C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid, Spain. mromero@geo.ucm.es
4 Institute of Geoscience (UCM-CSIC). C/ Doctor Severo Ochoa 7, 28040 Madrid.

Abstract: Recent studies have correlated kaolinite disorder parameters from X-ray measurements with infrared spectroscopic features. However, XRD-infrared correlations often involved tedious deconvolution procedures or the recording of very subtle changes in the 2nd derivative spectra. The objective was to evaluate more conveniently stacking disorder by understanding how it affects the vibrational modes of kaolinite. The present work revisits this issue by developing PLS chemometric methodologies based on a new set of 20 kaolinite samples. These samples were analysed using XRD and mid-, near-infrared and Visible-Near and Short-Wave spectroscopy (ATR, NIR and VNIR-SWIR). The evaluation of kaolinite structural disorder based on XRD patterns involved the use of Liétard (R2), and Hinckley (HI) crystallinity indices. PLS multivariate analysis of the spectra led to the prediction of crystallinity indices with R^2=0.91 and RMS error < 0.1, facilitating the fast and non-invasive prediction of kaolinite disorder in laboratory and field applications based on ATR, NIR and VNIR-SWIR spectral acquisition.

Keywords: kaolinite, disorder, infrared spectroscopy, chemometrics.

Resumen: *Estudios previos han relacionado parámetros de desorden de la caolinita mediante parámetros cuantitativos de difracción de rayos-X con características espectroscópicas infrarrojas. Sin embargo, estos estudios requerían procedimientos tediosos de deconvolución o la detección de cambios muy sutiles en las curvas de espectros de la segunda derivada de los espectros. El objetivo de este trabajo es evaluar el grado de desorden de la caolinita y su impacto en los modos vibracionales. Se utilizaron un total de 20 muestras de caolinita y se aplicó análisis multivariante. Las muestras se analizaron mediante difracción de rayos-X y espectroscopia infrarroja de distintas longitudes de onda. El desorden estructural de la caolinita se evaluó utilizando los índices de cristalinidad de Liétard (R2) y Hinckley (HI) en los difractogramas. El análisis multivariante PLS permitió predecir de manera rápida y no destructiva el desorden de la caolinita a partir de datos de espectroscopía. Esta metodología ha alcanzado una alta precisión, facilitando así el análisis del desorden de la caolinita en estudios de campo.*

Palabras clave: *caolinita, grado de desorden, espectroscopía infrarroja, análisis multivariante.*

INTRODUCTION

Kaolinite is a 1:1 dioctahedral phyllosilicate characterized by the stacking of 1:1 layers which are held together by hydrogen bonds (Fig. 1). Kaolinite represents one of the three planar polytypes within the group, differing in the position of octahedral vacancy. The positions labelled as B and C are interchangeable through a pseudo-mirror plane that is perpendicular to the b-axis (Bish and Von Dreele, 1989). Kaolinite is composed of stacks of C and less common B-type layers, arranged in a triclinic symmetry with a shift of -a/3 (Bish and Von Dreele, 1989). This creates an interlayer arrangement that promotes the development of long hydrogen bonds, as noted by Newnham (1961).

Layered minerals like kaolinite are prone to stacking defects, which occur frequently. As a result, several authors have proposed models of stacking disorder based on the X-ray diffraction patterns of kaolinite. These models include layer distortions (120˚), a pseudo-mirror plane passing through the octahedral B or C vacancy site, or alternating t_1 and t_2 layer displacements, which are considered as the main possible stacking faults (Sakharov et al., 2016).

Recent initiatives have focused on establishing correlations between the disorder parameters of kaolinite derived from X-ray diffraction measurements and the features observed in infrared spectroscopy (Drits et al., 2021; Pineau et al., 2022). These investigations aimed to develop more efficient than XRD methods for assessing stacking disorder by uncovering the impact of such disorder on the vibrational modes of kaolinite. Correlations between X-ray diffraction and infrared spectroscopy often involved tedious deconvolution

procedures or the recording of very subtle changes in the second or, even, third derivative.

The objective of the present work is to revisit this issue on the basis of a new set of kaolinite samples spanning a broad range of disorder. In addition to testing correlations based on individual proxies (positions, widths and relative intensities of infrared bands), Partial-Least-Square (PLS) chemometrics (for a review see Chryssikos and Gates, 2017) were applied because they provide a rigorous mathematical frame for the selection of meaningful correlation parameters (Gionis et al., 2007).

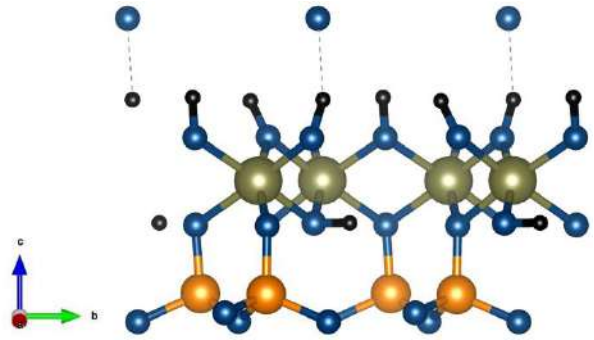


FIGURE 1. *Projection of the kaolinite structure along (100) plane. Modified from Rietveld refinement of Bish (1993) using VESTA software.*

MATERIALS AND METHODS

For this purpose, 20 kaolinite natural samples in random powder form have been evaluated by X-ray diffraction (XRD), Attenuated Total Reflectance (ATR) in the mid-infrared, diffuse reflectance Fourier Transform Near-infrared (FT-NIR) and Visible-Near and Short-Wave spectroscopy (VNIR-SWIR).

X-ray diffraction patterns were obtained using a X'Pert PRO MPD PANalytical diffractometer with a theta-2theta configuration and Mo $K\alpha_{1,2}$ radiation (λ=0.709 Å). This equipment, employing strictly monochromatic radiation, enables high-resolution measurements. The crystallinity of kaolinite has been studied in detail by analysing and modelling X-ray diffraction patterns. For this research, two commonly used indices - the Hinckley index (HI) and the Liétard index (R2) - were chosen to qualitatively assess the crystallinity of kaolinite (Fig. 2). The Hinckley index (HI) is calculated as the ratio of the sum of A and B parameters, corresponding to the intensity of the $(1\bar{1}0)$ and (110, $1\bar{1}1$) X-ray diffraction peaks, respectively (Fig. 2a). These measurements are taken from a background traced between the (020/$1\bar{1}0$) inter-peak base and the (110, $1\bar{1}1$)/(111) base peak. The Liétard index is computed as the ratio between half of the sum of the K2 and K1 parameters, corresponding to the intensity of the ($20\bar{2}$, $1\bar{3}1$) and (131) diffraction peaks, respectively. This is subtracted from the intensity of the inter-peak between these two reflections, denoted as the parameter K, over the general XRD background. The denominator consists of the third of the sum of the K, K2 ($20\bar{2}$, $1\bar{3}1$), and K1 parameters (refer to Fig. 2b).

The sample set employed includes both ordered and disordered kaolinite samples with HI and Liétard ranging between 0.5-1.5 and 0.2-1.2, respectively.

Attenuated total reflectance (ATR) measurements in the mid-infrared region were obtained (3800-600 cm^{-1}) on the Bruker Tensor II Fourier transform spectrometer, equipped with a single-reflection diamond ATR accessory (PIKE) and DLATGS detector. Each spectrum represents the average of 200 scans recorded with a resolution of 2 cm^{-1}. The FT-NIR spectra (200 scans) were measured on a Vector 22N Bruker spectrometer in the 4000-8000 cm^{-1} range, with 4 cm^{-1} resolution.

VNIR-SWIR spectroscopy was conducted over the 350-2400 nm wavelength range utilizing an ASD FieldSpec Standard 4 spectrometer with a spectral resolution of 1 nm. This setup enables the versatile application of portable equipment for fieldwork as well as laboratory acquisition.

The post-processing of the spectra involved the utilization of BRUKER OPUS software subroutines. These subroutines include QUANT2 PLS modelling, derivation, Savitzky-Golay smoothing vector normalization etc. Partial-Least-Square (PLS) multivariate analysis was validated by the leave-one-out method.

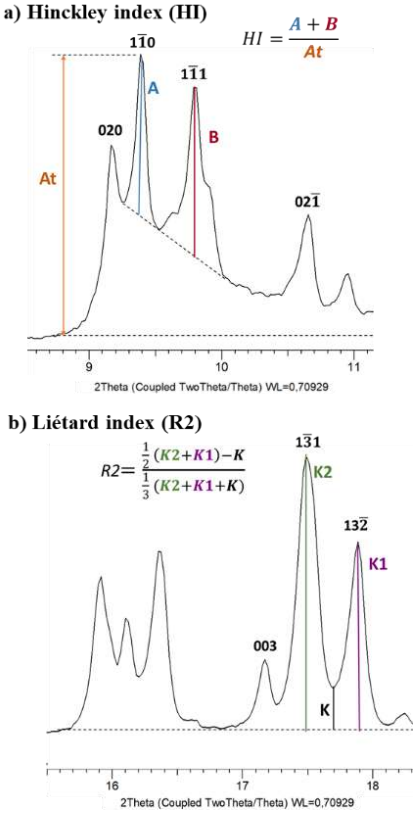


FIGURE 2. *a) Hinckley index measurements based on the sum of A and B parameters, corresponding to the intensity of the $(1\bar{1}0)$ and (110, $1\bar{1}1$) reflections divided by the total height of these reflections (At). b) Liétard index measurements in 16-18° 2θ.*

RESULTS AND DISCUSSION

It is well known that the OH-stretching region of kaolinite reveals four distinct bands at 3686-, 3669-, 3650- and 3619 cm^{-1} (Fig. 3). The bands observed at 3686- and 3619 cm^{-1} are consistently sharper and intense, but with variable relative intensities (Farmer, 1974). In less ordered kaolinites, the typical four bands are either poorly developed or, in some cases with increased disorder, only a single band is observed at 3652 cm^{-1}. The band positions in disordered kaolinite samples exhibit only slight changes compared to high-ordered kaolinite. The OH-stretching band at the lowest frequency (3619 cm^{-1}) corresponds to the vibrational mode of the inner OH group, while the highest frequencies (3686 cm^{-1}, 3668 cm^{-1} and 3652 cm^{-1}) are related to the in-phase motion of the three inner-surface hydroxyl groups (Farmer, 1974).

At lower frequencies, the bands at 1114 cm^{-1} and 1025 cm^{-1} are assigned to Si-O bonds. Additionally, the band centered at 915 cm^{-1} have been identified as the inner hydroxyl bending mode, whereas the 936 cm^{-1} band corresponds to the bending vibrational mode of inner-surface hydroxyl groups (Farmer, 1974).

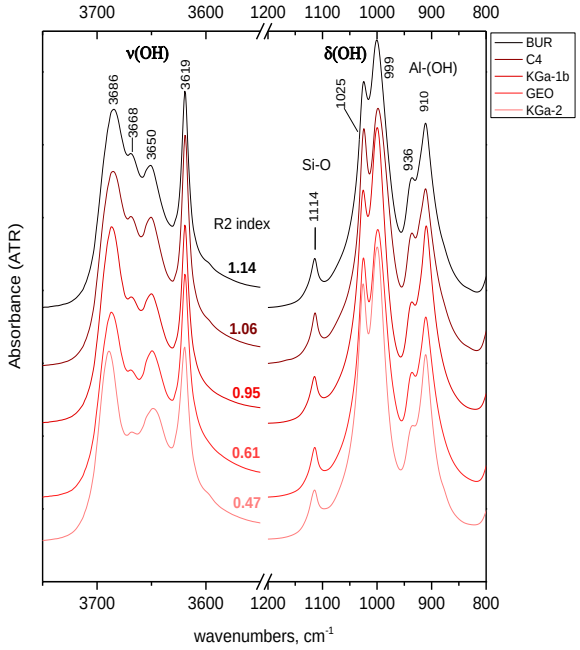


FIGURE 3. *Mid-infrared spectra of OH-stretching region (left) and Si-O stretching and OH-bending vibrational modes (right) of five kaolinite samples as a function of R2 index.*

In the near-infrared (not shown), the first overtone 2ν(O-H) of the inner AlAl-OH stretching fundamental is characterized by a strong band at 7065 cm^{-1}. Two weaker higher frequency bands at 7115- and 7168 cm^{-1} are attributed to the 2ν(O-H) overtone of the inner-surface OH groups (Balan et al., 2001).

In order to check for a quantitative link between IR kaolinite spectra and crystallinity based on HI and R2 indices, it is worth comparing the calculated XRD parameters with the spectral contribution of kaolinite samples. Indeed, Partial-Least-Square (PLS) chemometrics methodology was applied using cross-validation by leave-one-out method on the basis of ATR, NIR and VNIR-SWIR kaolinite spectra. Several mathematical pretreatments and frequency ranges were evaluated systematically. The best performing algorithms were over 3800-600 cm^{-1} (ATR) or 8000-4000 cm^{-1} (NIR, SWIR) based on 1st derivatives (Savitzky-Golay, 9pt smoothing) and vector-normalization. The models were found to converge at three ranks for Hinckley (HI) and Liétard (R2) indices, leading to predictions with R^2= 0.91 for both ATR and NIR and R^2=0.85 for SWIR. The RMS error of cross-validation was 0.06 (ATR and NIR), and 0.08 (SWIR). Figure 4 depicts an example of PLS true-fit modelling of the Liétard index based on the ATR spectra.

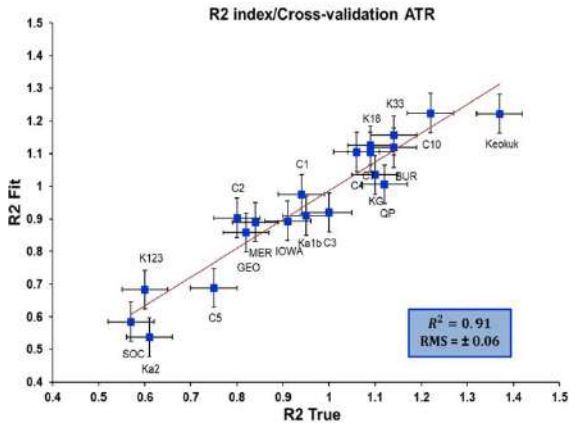


FIGURE 4. *PLS chemometrics based on the ATR spectra of 20 kaolinite samples leading to an R^2=0.91 and RMS error of cross-validation better than 0.1.*

NIR is insensitive to most accessory phases, because anhydrous minerals do not have spectral response and smectites have very broad bands that get filtered out by the derivative procedure. This means that NIR (and SWIR with little less accuracy) can be used to predict the degree of disorder of low-purity kaolinite, which is rather difficult to measure by XRD or MIR due to interferences from impurities, such as quartz and feldspar. PLS works by calculating a vectorial basis for extracting the spectral information that correlates with the desired property (here, crystallinity). The resulting regression coefficient vector has non-zero amplitude in regions of high information content for the prediction of this property. A calibration based on the 1st derivative, vector-normalised NIR spectra (which produced results essentially identical to those of the ATR method in Fig. 4) displays strong correlation at the inner-surface overtone and combination frequencies, and not over the narrow range of the strongest inner OH modes (Fig. 5). The same observation can be made in the data of Drits et al. (2021), as well as in the NIR spectra of Pineau et al. (2022). The corollary of this finding is that shifts in the position of the sharp inner OH modes should not be attributed to stacking disorder.

CONCLUSIONS

PLS chemometrics methodologies compare favourably to the current state-of-the-art and could facilitate the fast and non-invasive prediction of kaolinite disorder based on ATR and NIR spectroscopies.

The methods were extended to the SWIR spectral set with remarkably little loss of accuracy offering the added advantage of field application.

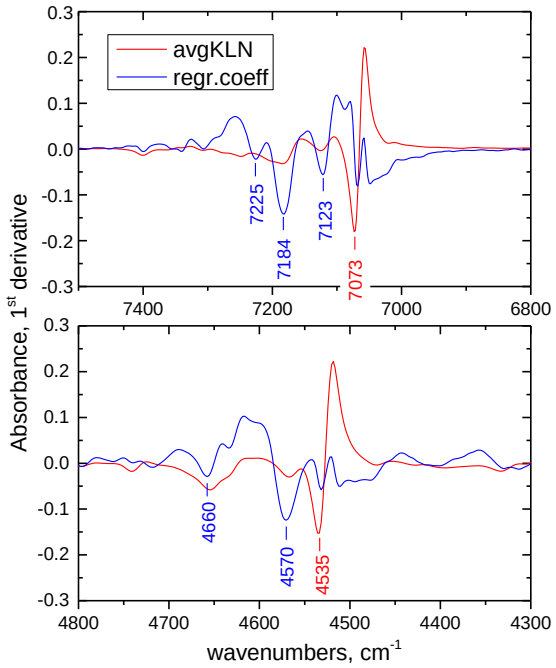


FIGURE 5. *Regression coefficient (blue) of the PLS chemometric model for the prediction of Liétard index, in comparison to the average 1st derivative spectrum kaolinite employed for calibration (red). Spectra over the OH overtone (upper) and combination (lower) ranges demonstrate that the information-rich parts are related to inner-surface O-H modes.*

REFERENCES

Balan, E., Saitta, A. M., Mauri, F. and Calas, G. (2001): First-principles modeling of the infrared spectrum of kaolinite. *American Mineralogist*, 86: 1321-1330.

Bish, D. L. (1993): Rietveld refinement of the kaolinite structure at 1.5 K. *Clays and Clay Minerals*, 41: 738-744.

Bish, D. L. and Von Dreele, R. B. (1989): Rietveld refinement of non-hydrogen atomic positions in kaolinite. *Clays and Clay Minerals*, *37*: 289-296.

Chryssikos, G. D. and Gates, W. P. (2017): Spectral manipulation and introduction to multivariate analysis. *Developments in Clay Science*, *8*: 64-106.

Drits, V. A., Zviagina, B. B., Sakharov, B. A., Dorzhieva, O. V. and Savichev, A. T. (2021): New insight into the relationships between structural and FTIR spectroscopic features of kaolinites. *Clays and Clay Minerals*, *69*: 366-388.

Farmer, V. C. (1974): The Infrared Spectra of Minerals. *Mineralogical society monograph*, *4*: 331-363.

Gionis, V., Kacandes, G. H., Kastritis, I. D. and Chryssikos, G. D. (2007): Combined near-infrared and X-ray diffraction investigation of the octahedral sheet composition of palygorskite. *Clays and Clay Minerals*, *55*: 543-553.

Newnham, R. E. (1961): A refinement of the dickite structure and some remarks on polymorphism in kaolin minerals. *Mineralogical magazine and journal of the Mineralogical Society*, 32: 683-704.

Pineau, M., Mathian, M., Baron, F., Rondeau, B., Deit, L. L., Allard, T. and Mangold, N. (2022): Estimating kaolinite crystallinity using near-infrared spectroscopy: Implications for its geology on Earth and Mars. *American Mineralogist*, *107*: 1453-1469.

Sakharov, B. A., Drits, V. A., McCarty, D. K. and Walker, G. M. (2016): Modeling powder X-ray diffraction patterns of the clay minerals society kaolinite standards: KGa-1, KGa-1b, and KGa-2. *Clays and Clay Minerals*, *64*: 314-33

Cristalización fraccionada de copiapita-halotriquita en un relave minero del norte de Chile

Fractional precipitation of copiapite-halotrichite of mine tailings in northern Chile

J. Gerding[1], J. Morales[2] y A. Novoloselov[1]

1 Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), Universidad de Concepción, Concepción, Chile. jgerding@udec.cl
anovoselov@udec.cl
2 Departamento de Geología, Área de Cristalografía y Mineralogía, Universidad de Salamanca, Salamanca, España.
juan.morales@usal.es

Palabras clave: mineralogía aplicada, cristalización fraccionada, espectroscopía VNIR-SWIR.

Resumen

La oxidación de la pirita en un relave minero afectado por un clima semiárido, promueve la disolución de minerales que después da lugar al desarrollo de costras salinas eflorescentes en la superficie de los mismos. Estas sales están compuestas principalmente de sulfatos de Fe, Al y Mg que pueden concentrar materias primas de alto valor (Dold y Fontboté 2001; Rodríguez-Pacheco *et al*., 2022).

Esta investigación tiene como objetivo describir la evolución de la precipitación salina desde la perspectiva económica y ambiental. Para ello, muestras de sales eflorescentes formadas durante la temporada de verano en un relave minero ubicado en el norte de Chile, fueron analizadas mediante difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y espectroscopía de reflectancia en el rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR). Los resultados apuntan a una precipitación de las sales de manera escalonada.

El proceso comienza con la precipitación de jarosita y yeso a partir de una solución ácida dominada por Fe^{3+}, que posteriormente son sustituidas por ferricopiapita. Mas adelante, la copiapita se vuelve más magnesiana y precipita junto a coquimbita y alunógeno. En una etapa más avanzada de evaporación, cristalizan halotriquita y pickeringita, que incorporan cationes de metales como Co, Cu, Mn, Ni y Zn en concentraciones que pueden resultar de interés económico.

Abstract

The oxidation of pyrite in mine tailings affected by a semi-arid climate promotes the dissolution of minerals, which then gives rise to the development of efflorescent salt crusts on the surface of the tailings. These salts are mainly composed of Fe, Al and Mg sulfates that can concentrate highly valuable raw materials (Dold and Fontboté 2001; Rodríguez-Pacheco *et al*., 2022).

This research aims to describe the evolution of saline precipitation from both an economic and environmental perspective. Aiming that, samples of efflorescent salts formed during the summer season in a mine tailing located in northern Chile were analyzed using X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and reflectance spectroscopy in the visible, near-infrared and short-wave infrared (VNIR-SWIR). The results point to a fractional precipitation of salts.

The process begins with the precipitation of jarosite and gypsum from acidic solutions dominated by Fe^{3+}, which are subsequently replaced by ferricopiapite. Later, the copiapite phase becomes more magnesian, making it possible the precipitation of coquimbite and alunogen. Finally, under advanced evaporation conditions, halotrichite and pickeringite crystallize, incorporating metal cations such as Co, Cu, Mn, Ni and Zn in concentrations that may be of economic interest.

Referencias

Dold, B. y Fontboté, L. (2001). *Journal of Geochemical Exploration* 74, 3-55.
Rodríguez-Pacheco, R., Brime, Á., Gascó, G., Pérez-Jodra, C., Martín-Martínez, A., García-García, C., Méndez, A. (2022). *Minerals Engineering* 185, 107673.

Nanometalogenia de metales críticos.

Nanometallogeny of critical metals.

J.M. González Jiménez[1], A.R. Ferreira[1], I. González-Pérez[2], E. Schettino[3], L. Yesares[4], C. Marchesi[1,3], F. Gervilla[1,3]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT), CSIC-UGR, Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla, Granada, Spain. jm.gonzalez.j@csic.es, amirarosa.ferreira.g@csic.es
2 Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18002 Granada, Spain. claudio@ugr.es, gervilla@ugr.es
3 Department of Earth Sciences, ETH, Clausiusstrasse 25, 8092 Zurich, Switzerland. eschettino@erdw.ethz.ch
4 Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais,12, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain. myesares@ucm.es

Palabras clave: Nanociencia, metales críticos, magmático, hidrotermal, supergénico.

Resumen

En el sistema métrico decimal, el prefijo nano (símbolo n) refiere a un billón (*i.e.*, factor de 10^{-9}), mientras que en la física y la ingeniería aplica a aquellas partículas que tienen una o más dimensiones, con tamaños que oscilan entre 1 y 100 nm (10^{-9} a 10^{-7} m). En el campo de la geología económica, los nanomateriales incluyen agrupaciones de átomos, nanopartículas minerales (NPs, cuando estas existen también a mayores tamaños), nanominerales (cuando solamente existen en este rango de tamaños nanométricos), nanofluidos y nanofundidos. En la última década, el advenimiento de una nueva generación de métodos analíticos nos ha permitido una caracterización más fina de la composición química y estructura de todos estos tipos de nanomateriales en depósitos minerales, cubriendo un vacío de conocimiento que existe en los estudios de metalogenia clásicos, focalizados canónicamente en la distribución y génesis de los depósitos minerales en las escalas regional y global. En esta contribución se revisan los avances más recientes en el floreciente campo de la nanometalogenia, mostrando el papel clave que éstos tienen en el transporte y deposición de metales críticos en sistemas minerales formadores de yacimientos en los ambientes magmáticos, hidrotermales y supergénicos. La nueva información e interpretaciones derivadas que se aportan se revisan en términos de: (1) una mejor compresión de cómo llegan a formarse depósitos minerales de interés económico, tanto en el manto superior como en la corteza, (2) una exploración y explotación más eficiente de los metales valiosos que estos contienen.

Abstract

The prefix nano- in the metric system (symbol n) denotes to one-billionth (*i.e.*, a factor of 10^{-9}), while in physics and engineering it applies to particles with one or more dimensions from 1 to 100 nm (10^{-9} to 10^{-7} m). In the field of economic geology, nanomaterials may include atomic clusters, mineral nanoparticles (NPs, when they also exist in larger micrometer-scale sizes), nanominerals (only existing within this size range), nanofluids and nanomelts. In the last decade, with the advent of new generation of analytical methods we are now able to finely characterize chemically and structurally all these types of nanomaterials in mineral deposits, filling knowledge gaps in classical metallogeny studies, canonically focused on the distribution and genesis of mineral deposits at regional-to-global scales. In this communication, we will summarize the most recent advances on the new blooming field of nanometallogeny, showing that these materials may play a key role in critical metal transport and deposition in ore-forming mineral systems within the magmatic, hydrothermal and supergene environment. The new information and interpretation reviewed is highlighted in terms of: (1) better understanding on how economically interesting mineral deposits form in the Earth's upper mantle and crust, (2) more efficient exploration and beneficiation of these valuable metals.

El litio como trazador de los procesos de contaminación cortical del manto litosférico subcontinental.

Lithium as tracer of crustal contamination of the subcontinental lithospheric mantle.

I. González-Pérez[1], J.M. González-Jiménez[2], S.A.S. Dare[3], E. Schettino[4], R. Piña[5], C. Marchesi[1,2], L. Yesares[5], F. Gervilla[1,2]

1 Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, UGR, Avda. Fuentenueva s/n, 18002 Granada, Spain igorgonzpe@ugr.es, gervilla@ugr.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT), CSIC-UGR, Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla, Granada, Spain jm.gonzalez.j@csic.es, claudio@ugr.es,
3 Département des Sciences Appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, QC G7H 2B1, Canada sdare@uqac.ca
4 Department of Earth Sciences, ETH, Clausiusstrasse 25, 8092 Zurich, Switzerland eschettino@ethz.ch
5 Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM, C/ Jose Antonio Novais,12, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain rpinagar@ucm.es, myesares@ucm.es

Palabras clave: peridotitas de Ronda, litio, cromititas, interacción manto-corteza.

Resumen

Los Macizos Ultramáficos de la Serranía de Ronda, Málaga, se interpretan como porciones del manto litosférico subcontinental (MLSC) emplazados en la corteza continental durante el Mioceno. Durante su ascenso cortical, experimentaron procesos de deformación y percolación de fundidos astenosféricos resultando en la formación de tres dominios tectono-metamórficos diferenciados con mineralizaciones asociadas (cromo-níquel (Cr-Ni), sulfuro-grafito (S-G), y depósitos de Cr). El análisis mediante ablación laser acoplada a un espectrómetro de masas con fuente de plasma acoplado inducidamente (LA-ICP-MS) muestra que los clinopiroxenos de las peridotitas afectadas por los procesos de infiltración están enriquecidos en Li (> 8 ppm) respecto a los valores medios del manto superior (~ 0,7 ppm), mientras que los ortopiroxenos, olivinos y espinelas están empobrecidos. La cromita, el ortopiroxeno y la cordierita que forman las mineralizaciones de Cr-Ni están aún más enriquecidos en Li (> 50 ppm en promedio). Se observa un enriquecimiento en Li en las mineralizaciones de Cr-Ni localizadas en las proximidades de la cobertera cortical, sugiriendo el aporte de Li por fluidos corticales. Esta tendencia también se observa en la composición de tierras raras ligeras, elementos móviles en fluidos (K, Rb, Ba) y en Sr de los ortopiroxenos de los depósitos de Cr-Ni, sugiriendo la mezcla de fundidos basálticos con fluidos corticales como el mecanismo de enriquecimiento en Li de las cromititas.

Abstract

The Ultramafic Massif of the Serranía de Ronda, Málaga, are interpreted as portions of subcontinental lithospheric mantle (SCLM) emplaced into the continental crust in the Miocene. During the emplacement, they experienced deformation and percolation of asthenospheric melts resulting in the formation of three distinct tectonometamorphic domains and associated mineralizations (chromium-nickel (Cr-Ni), sulphide-graphite (S-G), and Cr-ores). Analysis by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) show that clinopyroxenes from the peridotite portions affected by asthenospheric melts infiltration are enriched in Li (> 8 ppm) in respect with average upper mantle (~ 0.7 ppm), whereas orthopyroxene, olivine and spinel are depleted. Chromite, orthopyroxene and cordierite from the Cr-Ni ores are even more enriched in Li (> 50 ppm in average). A Li-enrichment is observed in those Cr-Ni ores located in the proximities of the crustal envelope, suggesting the contribution of Li from crustal fluids. The same trend has been noted in light rare earth elements, fluid-mobile elements (K, R, Ba) and Sr in orthopyroxenes. These observations indicate mixing of basaltic melts with crustal fluids as the main mechanism of Li enrichment in Cr-Ni ores.

Innovative magnetotelluric technology solutions for mine planning and risk mitigation and near mine exploration

Soluciones innovadoras del método magnetotelúrico para la planificación minera, la mitigación de riesgos y la exploración cercana a las minas en producción

R. L. Gordon[1] y L. Ramayo[1]

1 146 Sparks Avenue. Toronto, Ontario M2H 2S4. Canada. lramayo@quantecgeoscience.com

Abstract: Challenges faced by the mining industry now include greater attention and scrutiny for issues related to tailings safety and other mine planning issues such as condemnation and risk mitigation. Whereas in the past, test drilling sampling and some shallow geophysics has been sufficient for planning purposes, the industry is seeking new technologies and ideas to help meet the challenges and criteria for the next generation of mining development. Newer, deeper imaging electrical geophysical methods coupled with magnetotelluric surveys may prove invaluable at the mine planning stage. With the great advances in computing power, coupled by the ability to measure small signals in a background of noise, technology is available to address significant mine planning and life of mine issues. Deployment of these technologies at an early stage immediately after discovery at pre- or feasibility stage can help provide risk mitigation and enhance future exploration initiatives at the mine. Improved condemnation planning enhanced targeting and ultimately more efficient use of drilling budgets while working around the mine can be achieved. Examples clearly demonstrate effective investigations for mine planning. A brief discussion of the evolution of deep electrical imaging systems and survey results will be shown from a number of near mine environments, including epithermal, skarn, and a copper-porphyry system.

Key words: magnetotelluric, planning, exploration, mining, geophysics.

Resumen: *La industria minera actual afronta desafíos críticos, destacándose la atención especial a la seguridad en depósitos de relaves y otros aspectos de la planificación minera. A diferencia del pasado, donde la planificación se basaba principalmente en muestreos de perforación y estudios geofísicos superficiales, la industria moderna busca activamente nuevas tecnologías e ideas para abordar los criterios y desafíos en constante evolución relacionados con la próxima generación de desarrollos mineros. Enfoques innovadores, como la integración de métodos geofísicos eléctricos, electromagnéticos y magnetotelúricos, poseen el potencial de proporcionar información inestimable en la fase de planificación minera. Con avances significativos en capacidad de cómputo y la capacidad de medir señales pequeñas en entornos extremadamente ruidosos, como las minas en producción, la tecnología actual aborda problemas sustanciales en la planificación y vida útil de las minas. La implementación temprana de estas tecnologías, justo después del descubrimiento en las etapas de prefactibilidad o factibilidad, puede contribuir a la mitigación de riesgos y mejorar las futuras iniciativas de exploración en la mina. Este trabajo ofrece una breve discusión sobre la evolución de los sistemas geofísicos magnetotelúricos, presentando los resultados clave de estudios en diversos entornos de exploración, que incluyen sistemas epitermales, skarn y pórfidos de cobre.*

Palabras clave: *magnetotelúrica, planificación, exploración, minería, geofísica.*

INTRODUCTION

Geophysical exploration for mineral deposits has traditionally relied on detecting ore bodies through identification of their anomalous properties, such as density, resistivity, magnetic susceptibility, or chargeability. Many ore bodies are formed through processes occurring in convergent plate boundaries, such as subduction zones. The study of these processes can provide insights into the formation and distribution of deposits. The mineral systems approach broadens the scope of exploration by seeking to understand the entire system responsible for the formation of the ore body, including the regions where fluids originated, the flow pathways, and the structures that facilitated mineral deposition.

Recent initiatives in both governmental and university research are investigating the value of this approach and applying innovative 3-D exploration methods capable of imaging to crustal and upper mantle depths. These initiatives are not only enhancing our understanding of mineralization processes but also revolutionizing mine planning and risk mitigation strategies. By comprehensively mapping the geological structures and fluid flow pathways associated with

mineral deposits, these technologies are enabling more accurate prediction of ore body distribution and characteristics. This, in turn, is optimizing exploration efforts and improving resource estimation accuracy, leading to more efficient and sustainable mining practices.

MAGNETOTELLURICS

A range of electromagnetic methods can be used to image subsurface conductivity / resistivity. For depths exceeding a few kilometers, natural source techniques are the most effective methods. One of the most promising electromagnetic technologies for these deep investigations has been magnetotellurics (MT). This method measures natural magnetic and electric fields at the surface of the earth across a wide range of frequencies. The depth of investigation depends on the signal frequency, allowing the same instrument to measure resistivity from a few hundred metres to hundreds of kilometers. From MT measurements at several points a 3-D model of the subsurface resistivity can be obtained. The time-varying electromagnetic fields are generated by a variety of natural phenomena such as solar storms and lightning strikes. Broadband MT measures these fields over a very broad frequency spectrum, typically 1000 – 0.001 Hz, giving information to mid and lower crustal depths. Audiomagnetotellurics (AMT) only measures the audio frequencies, which image the upper 1-2 km only. CSAMT was developed to work when the natural source EM signals were too weak and a “Controlled Source” or generator is used to create the electromagnetic fields. This type of survey is typically used for resistivity mapping in the top few hundred meters.

The MT method was invented and introduced independently in Japan in the 1940’s (Hatakeyama and Hirayama, 1934; Rikitake, 1948) and later in Russia and France in the 1950’s.

Although the use of magnetotellurics in mineral exploration was limited throughout the 1990s, its application in deposit-scale exploration has seen a notable increase since the year 2000. However, until recently, widespread adoption across the mining industry remained limited. The emergence of the mineral systems concept has sparked significant interest in leveraging MT to delve even deeper and delineate the structures associated with deposit formation on a crustal and upper mantle scale. This trend has been propelled by several studies revealing major resistivity anomalies beneath various significant deposits, such as the discovery of a set of low resistivity fingers beneath the world-class IOCG deposit at Olympic Dam (Heinson et al., 2006).

This paper will showcase examples illustrating the versatility of MT across various depth scales. It will encompass regional-scale applications, exemplified by the Olympic Dam Deposit, multiparameter 3D surveys integrating deep induced polarization (IP) alongside MT, as demonstrated in the Kitumba IOCG Deposit, and mine-site scale surveys (Bolivar Mine). Notably, in the latter case, geophysical studies directly contributed to the discovery of a new porphyry system below the skarn deposit.

DEEP EARTH IMAGING

Exploration initiatives in Australia have undertaken extensive regional-scale Magnetotelluric (MT) programs aimed at imaging the resistivity structure of the entire Australian continent and comprehending the mechanisms governing ore emplacement on a crustal scale. MT data has been gathered at nearly 5000 stations across Australia through a national MT survey program, as well as regional MT surveys employing both profile and grid-based data collection methodologies.

Several studies, including investigations at Olympic Dam, have provided compelling evidence for a direct correlation between crustal-scale anomalies and ore deposits. These findings underscore the presence of deep conductive features, suggesting the past existence of conduits facilitating mineral emplacement through deep fluid flow. Resistivity imaging has delineated features extending from upper mantle depths, some of which approach or are directly connected to the surface (Fig. 1). This approach is also gaining traction in Canada, with initial studies being conducted through university research initiatives such as the Metal Earth initiative.

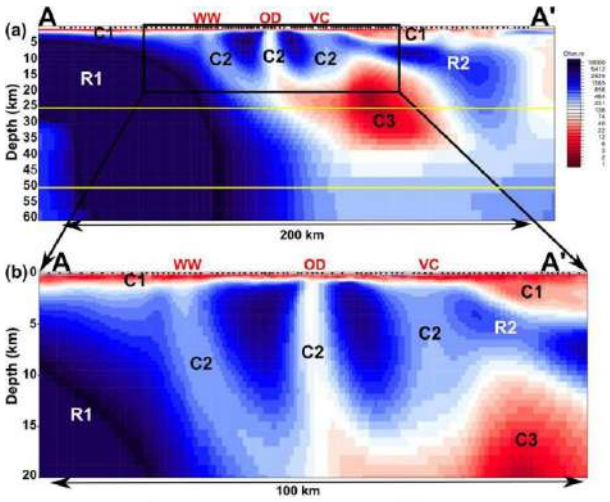


FIGURE 1. *MT resistivity sections show to 60 km highlighting deep conductive trends. Note C2 conductor lies directly below Olympic Dam, a giant IOCG deposit.*

APPLICATIONS OF MT RESISTIVITY MAPPING

In 2000 the first commercially available multi-parameter distributed array technologies were introduced to the industry. This capability was first derived from earlier studies by John Kingman for applications with induced polarization (IP) (Kingman, 1994). The increase in computer capability at the time allowed for the deployment of distributed computers along a survey line. The introduction of measuring tightly spaced magnetotellurics (100 m) along a standard profile of 2400 m was a novel new way to explore (White and Gordon, 2003). This new application provided explorers with very

deep, highly detailed resistivity images for the first time. The frequencies measured in these systems are higher than those required for deep imaging but still sufficiently low enough to provide to a depth of a few kilometres (Gordon, 2006). Recording time is typically in the order of 4-8 hours to obtain images to depths of 1500 m (Fig. 2).

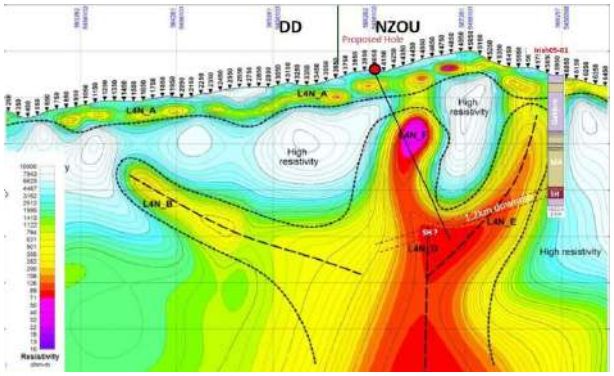


FIGURE 2. *2D array-based MT resistivity survey results from a distributed multiparameter acquisition array system (TITAN MT Data collected for Viscount Mining during 2022).*

The Kitumba IOCG Deposit, Zambia. An ORION 3D DC/IP-MT survey was conducted over Blackthorn Resources' Kitumba IOCG deposit in Zambia (Fig. 3). Data at Kitumba were collected using a layout consisting of 210 100 m dipoles. Two adjacent layouts were surveyed, resulting in approximately 160,000 data samples over a 6 km^2 survey area. Data were processed with Quantec's proprietary software, and the DCIP results were inverted using the UBC 3D inversion code (Li and Oldenburg, 2000).

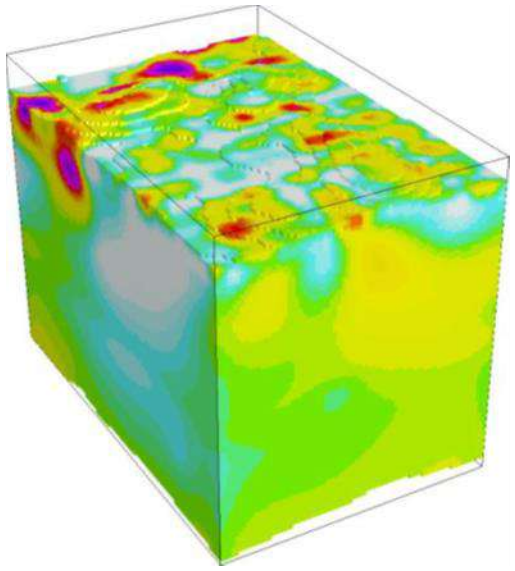


FIGURE 3. *3D MT Kitumba model.*

The high-resolution three-dimensional MT resistivity models obtained from the ORION 3D survey clarified the understanding of the Kitumba deposit. Integration of the ORION 3D DC resistivity data with previous geophysical results and existing geological information allowed Blackthorn Resources to understand the Kitumba deposit clearly in three dimensions and adjust their drilling program mid-season to focus their exploration efforts in the most prospective areas.

Bolivar Mine, Skarn Deposit, Mexico. The primary objectives of the survey were to map and detect resistive anomalies associated with skarn-type mineralization within the survey area for the purpose of drill targeting, delineation, and identification of structural controls. The Bolivar mine is situated within the Piedras Verdes Mining District, located within the major north-northwest trending Sierra Madre Precious Metals Belt, which extends across the states of Chihuahua, Durango, and Sonora in northwestern Mexico.

The survey comprised 12 DC/IP/MT spreads with a 100 m station interval. The survey lines were spaced at 200 m and oriented in a N450E direction. A total of 26.5 km of DC/IP survey lines and 26.5 km of MT survey lines were acquired.

The inversion models successfully identified approximately 50 significant anomalies along each survey line, presenting promising targets for drilling. These findings not only exhibit a favorable correlation with the geological setting and the source of mineralization but also suggest a northward extension of the mineralization. Additionally, the survey played a pivotal role in uncovering a new porphyry system beneath the skarn deposit (Fig. 4).

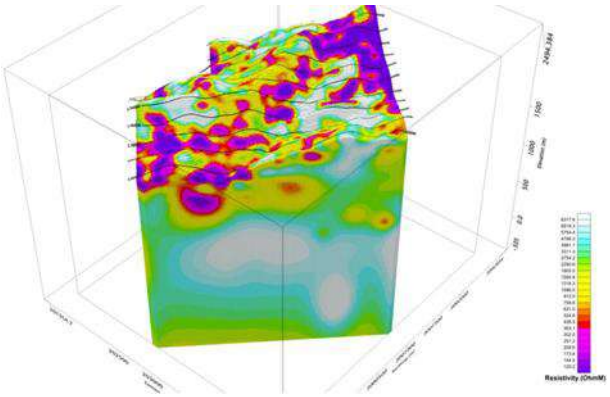


FIGURE 4. *3D MT Resistivity, shows a resistivity variation in Bolivar project.*

REFERENCES

Gordon, R. (2006): New technology approach needed for mining industry. *First Break*, 24: 63-69.

Hatakeyama, H. and Hirayama, M. (1934): On the phase difference between the pulsation of terrestrial magnetism and of earth current. *Journal of the meteorological Society of Japan*, 12: 449-459.

Heinson, G., Direen, N. and Gill, R. (2006): Magnetotelluric evidence for a deep-crustal mineralizing system beneath the Olympic Dam iron oxide copper-gold deposit, southern Australia. *Geology*, 34: 573576.

Kingman, J. (1994): Digital signal processing approaches to interpreting induced polarization data. In*: John S.*

Sumner memorial international workshop on IP in mining and the Environment, Tucson AZ

Li, Y. and Oldenburg, D. W. (2000): Incorporating geological dip information into geophysical inversions, *Geophysics*, 65: 148-157.

Rikitake, T. (1948): Note on the electromagnetic induction within the earth. *Bulletin of Earthquake Research Institute* Univ. Tokyo, 24: 1-9.

White, M., and Gordon, R. (2003): Deep imaging: New technology lowers cost of discovery. *Canadian Mining Journal*, 4: 27–28.

Evaluación de la aplicación de la tecnología Sustrato Alcalino Disperso para el tratamiento pasivo de lixiviados ácidos

Assessment of the application of Dispersed Alkaline Substrate technology for the passive treatment of acidic leachates

R. León[1], F. Macías[1], R. Millán-Becerro[1], C.R. Cánovas[1], J. Romero-Matos[1], L. Sánchez[1], R. Pérez-López[1] y J.M. Nieto[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y Centro de Investigación en Recursos Naturales Salud y Medioambiente (RENSMA), Universidad de Huelva, Campus "El Carmen", 21071, Huelva. Rafael.leon@dct.uhu.es, Francisco.macias@dgeo.uhu.es, Ricardo.millan@dct.uhu.es, Carlos.ruiz@dgeo.uhu.es, Jonatan.romero@dct.uhu.es, Laura.sanchez@dct.uhu.es, Rafael.perez@dgeo.uhu.es, Jmnieto@uhu.es.

Palabras clave: drenaje ácido de mina, AMD, carga metálica, neutralización, DAS.

Resumen

El drenaje ácido de mina (por sus siglas en inglés, AMD) se ha convertido en un problema de gran preocupación a nivel mundial por su impacto en los recursos hídricos a largo plazo, debido a la longevidad del proceso de generación. Estos lixiviados ácidos, generados por la interacción de sulfuros con agua bajo condiciones oxidantes, a menudo son tratados en zonas mineras abandonadas mediante sistemas de tratamiento pasivo. Sin embargo, cuando estos lixiviados presentan alta acidez y carga metálica, aparecen problemas de obstrucción o de pasivación del reactivo alcalino que limitan la efectividad de los sistemas pasivos convencionales. En este sentido, en los últimos años se ha desarrollado la tecnología pasiva Sustrato Alcalino Disperso (por sus siglas en inglés, DAS), que solventa estos problemas y que demuestra una alta eficacia en el tratamiento de AMD altamente cargado en acidez y metales (Orden et al., 2021).

Esta comunicación ofrece una revisión exhaustiva de la aplicación del DAS en el tratamiento de AMD a nivel mundial, a través del metaanálisis de su utilización en columnas de laboratorio, escala piloto y plantas a escala real. Se evalúa y sintetiza la evolución de esta tecnología y de su eficacia para la neutralización de la acidez y la retención de metales en diversas situaciones hidroclimáticas, esencial para mitigar la problemática por contaminación de lixiviados ácidos a nivel mundial.

Abstract

Acid mine drainage (AMD) has become a problem of great concern worldwide due to its long-term impact on water resources, due to the longevity of the generation process. These acid leachates are generated by the interaction of sulfides with water under oxidizing conditions. Passive treatment systems have traditionally been used to tackle them in abandoned mine sites. However, high acidity and metallic load in leachates derives in clogging or passivation of the alkaline reagent, limiting the effectiveness of conventional passive systems. In recent years, a passive treatment technology called Dispersed Alkaline Substrate (DAS) has been developed to solve these issues. DAS has been proven to be highly effective in treating AMD with high acidity and metal content (Order et al., 2021).

This communication provides a thorough analysis of the use of DAS in treating acid leachates globally. The evolution of this technology and its effectiveness in neutralizing acidity and retaining metals is examined and synthesize, through the meta-analysis of column tests, pilot plants, and full-scale tests in different hydroclimatic conditions. These are essential steps in mitigating the problem of acid leachates pollution worldwide.

Referencias

Orden, S., Macías, F., Cánovas, C. R., Nieto, J. M., Pérez-López, R., y Ayora, C. (2021). *Journal of Environmental Management.* doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111699

Determinación geoquímica de niveles de fondo y concentraciones de metales pesados en el paraje de la Peña del Seo (Corullón, León)

Geochemical determination of background and concentration of heavy metals in the Peña del Seo region (Corullón, León)

A. López Mederos[1], J. Fernández Lozano[2], A. Hurtado Benzos[1], S. Eguilior Díaz[1], I. González Pérez[2] y J.R. Rodríguez Pérez[2]

1 Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Avenida. Complutense 40, Edificio 20, 28040 Madrid. alicia.lopez@ciemat.es; antonio.hurtado@ciemat.es; sonsoles.eguilior@ciemat.es
2 GEOINCA, Departamento. Tecnología Minera, Topografía y de Estructuras, Universidad de León 24007 León. jferl@unileon.es; igonp@unileon.es; jr.rodriguez@unileon.es

Palabras clave: Peña del Seo, niveles de fondo, metales pesados, wólfram.

Resumen

El objetivo principal de este estudio es analizar el fondo geoquímico y las concentraciones de metales pesados en el entorno de la histórica mina de wólfram de la Peña del Seo (Corullón, León), con el fin de identificar posibles anomalías. El trabajo se centró especialmente en la cuenca hidrográfica del río San Vicente, afluente del Selmo. La Peña del Seo se encuentra dentro de la Zona Asturoccidental-Leonesa, caracterizada por rocas siliciclásticas, principalmente pizarras y areniscas que albergan filones de wolframio con una paragénesis de estaño, oro, molibdeno y sulfuros masivos que aparecen asociadas a venas hidrotermales y salbandas enriquecidas en biotita y moscovita.

Se recolectaron 140 muestras de suelo y 19 de sedimento de corriente para estudiar la presencia de anomalías relacionadas con metales pesados. El trabajo se completó con medidas de otros parámetros como pH, la temperatura del agua y suelo (a dos profundidades), y conductividad de los arroyos. Se analizaron las concentraciones de Sb, Cu, As, Zn, Cd, Fe, Hg y S, identificándose altas concentraciones de As en las proximidades de la mina y Zn en áreas distantes. La detección de altas concentraciones de As y las anomalías de pH, en suelos y sedimentos de corriente pone de manifiesto la importancia de establecer los niveles de referencia para evaluar posibles anomalías vinculadas a la actividad minera.

Abstract

The main objective of this study is to analyze the geochemical background and concentration of heavy metals in the vicinity of the historic wolfram mine in Peña del Seo (Corullón, León), in order to identify potential anomalies. In particular, we are focusing on the San Vicente River basin, a tributary of the Selmo River. Peña del Seo is located in the Asturoccidental-Leonesa Zone, characterized by siliciclastic rocks, mainly shales and sandstones, hosting wolfram veins with the variety of minerals such as tin, gold, molybdenum and massive sulfides, associated with hydrothermal veins and enriched bands of biotite and muscovite.

A total of 140 soil samples and 19 stream sediment samples were collected to test for the presence of heavy metal anomalies. In addition, measurements of parameters such as pH, water and soil temperature (at different depths), and stream conductivity were made. Concentrations of Sb, Cu, As, Zn, Cd, Fe, Hg and S were analyzed, and high concentrations of As were identified in the vicinity of the mine and Zn in distant areas. The detection of high As concentrations and ph anomalies in soils and stream sediments highlights the importance of establishing reference values to assess potential anomalies associated with mining activities.

Variaciones composicionales de elementos mayores debidas al proceso de caolinización en el granito de metales raros de Golpejas (España).

Compositional variations in major elements due to the kaolinization process in the rare metal granite from Golpejas (Spain).

F.J. López-Moro[1], A. Díez-Montes[1], S.M. Timón-Sánchez[1], T. Llorens González[1] y T. Sánchez-García[2]

1 IGME-CSIC, Oficina de Salamanca, Plaza de la Constitución 1, 37001, Salamanca (Spain). fj.lopez@igme.es; al.diez@igme.es; s.timon@igme.es; t.llorens@igme.es

2 IGME-CSIC, Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid, Spain. t.sanchez@igme.es

Palabras clave: elementos inmóviles, composición modal, índice A/CNK, caolinita.

Resumen

Se evalúa la impronta del proceso de caolinización en la mineralogía y geoquímica de elementos mayores en el granito de metales raros (GMR) de Golpejas. Para ello, se compara la composición modal y geoquímica de granitos frescos con respecto a muestras caolinizadas. También se cuantifica la transferencia de masas en el proceso de caolinización. La comparación modal revela una buena correlación negativa entre el contenido en caolinita y plagioclasa, que evidencia que la caolinización afectó fundamentalmente a la plagioclasa. Geoquímicamente, los granitos caolinizados tienen contenidos bajos en Na y del índice MALI (Na_2O+K_2O-CaO, en % en peso), así como valores muy altos de la alcalinidad (Al_2O_3/Na_2O+K_2O en moles) y peraluminismo ($Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$, en moles; valores de hasta 7), y del parámetro A (Al-(K+Na+2Ca) en milicationes). La modelización por transferencia de masas nos da las claves para entender estos valores anómalos. En la caolinización, la roca pierde hasta un 21% de masa, perdiendo álcalis y Si, siendo el Al inmóvil. En este escenario, la concentración de Al aumenta, no por la entrada de Al, sino por su inmovilidad y la pérdida de masa de la roca, mientras que las concentraciones de los álcalis bajan, al ser fuertemente lixiviados. Por tanto, los parámetros clasificatorios que involucran Al y los álcalis están modificados en GMR caolinizados y no se recomiendan para su clasificación.

Abstract

The effect of the kaolinization process on the mineralogy and geochemistry of major elements in the rare metal granite (RMG) from Golpejas is assessed. For this purpose, the modal and geochemical composition of fresh granites is compared respect to kaolinized samples. The mass transfer during the kaolinization process is also quantified. The modal comparison shows a good negative correlation between kaolinite and plagioclase content, indicating that kaolinization mainly affected plagioclase. Geochemically, kaolinization causes a decrease in Na and the MALI index (Na_2O+K_2O-CaO, in wt. %), an increase in alkalinity (Al_2O_3/Na_2O+K_2O, in moles) and peraluminism ($Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$, in moles; values up to 7), and an increase in the A parameter (Al-(K+Na+2Ca) in millications). Mass transfer modeling gives us the key to understanding these anomalous values. During kaolinization, the rock loses up to 21% of its mass, losing alkalis and Si, while the Al is immobile. In this scenario, the Al concentration increases, not due to Al input, but due to its immobility and mass loss, while the alkali concentrations decrease due to their strong leaching. Therefore, the classification parameters involving Al and alkalis are modified in kaolinized RMG and are not recommended for their classification.

Los recursos de Tierras Raras en Fuerteventura: evaluación geoquímica y mineralógica.

Rare Earth resources on Fuerteventura: geochemical and mineralogical evaluation.

J. Mangas[1], M. Campeny[2], I. Menéndez[1], L. Quevedo[1,3], J. Yepes[1], R. Casillas[4], A. Ahijado[4], J. Méndez-Ramos[3]

1 Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. jose.mangas@ulpgc.es, inmaculada.menendez@ulpgc.es, jorge.yepes@ulpgc.es.

2 Dpto. de Mineralogia, Museu de Ciències Naturals de Barcelona, Passeig Picasso s/n, 08003 Barcelona. mcampenyc@bcn.cat

3 Instituto de Materiales y Nanotecnología, Departamento de Física Universidad de La Laguna, apartado correos 456, 38200 La Laguna, Tenerife. jmendezr@ull.es, lquevedo@ull.edu.es

4 Dpto. de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, apartado correos 456, 38200 La Laguna, Tenerife. rcasilla@ull.edu.es, aahijado@ull.edu.es

Palabras clave: tierras raras, Fuerteventura, carbonatitas, mineralogía, recursos minerales.

Resumen

La evaluación del contenido de elementos de tierras raras (TR) se ha realizado mediante un estudio mineralógico y geoquímico de las rocas ígneas alcalinas y carbonatitas localizadas en el complejo basal de Fuerteventura (CBF). Esta evaluación también se ha llevado a cabo en los productos de alteración asociados a dichas litologías. Entre las rocas magmáticas, las carbonatitas representan la única litología que ha demostrado un potencial real para albergar recursos minerales de TR, con concentraciones de hasta 10.302 ppm. Los productos de alteración desarrollados sobre estas rocas magmáticas no muestran un enriquecimiento supergénico significativo de TR. En las carbonatitas, las TR se encuentran principalmente asociadas a pirocloro, britolita y monacita, mientras que los carbonatos magmáticos presentan contenidos despreciables de estos elementos. Las complejas características estructurales de los afloramientos estudiados del CBF hacen esencial llevar a cabo trabajos de exploración más detallados para determinar las verdaderas posibilidades económicas de las carbonatitas como un recurso real de TR (Mangas *et al.*, 1994).

Abstract

An evaluation of rare earth element (REE) content was conducted through a mineralogical and geochemical study of alkaline and carbonatitic igneous rocks in the Fuerteventura basal complex (FBC), along with associated weathering products. Among the magmatic rocks, carbonatites are the sole lithology demonstrating a real potential to host REE mineral resources, with concentrations reaching 10,302 ppm. The weathering products developed on these magmatic rocks do not exhibit significant REE supergene enrichment. Within carbonatites, REEs are primarily hosted in pyrochlore, britholite, and monazite, while magmatic carbonates present negligible contents. The complex structural features of the studied FBC outcrops make it essential to conduct more detailed exploration works to determine the genuine economic possibilities of this lithology as a real REE resource (Mangas *et al.*, 1994).

Referencias

Mangas, J., Pérez-Torrado, F.J., Reguillón, R.M. y Martín-Izard, A. (1994). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía* 17, 212-213.

Exploración geoquímica en Ossa Morena occidental (Huelva y Sevilla).

Geochemical exploration in the western Ossa-Morena Zone (Huelva and Sevilla).

I. Martín-Méndez[1]y R. Andrés-Bercianos[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Grupo de Investigación de Geología Económica de los Recursos Minerales – GECOMIN. c/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España. i.martin@igme.es, r.andres@igme.es

Resumen: La exploración geoquímica multielemental llevada a cabo mediante el uso de medios de muestreo complementarios, como son los sedimentos de corriente y los concentrados de minerales pesados, ha permitido definir 47 áreas anómalas en la Zona de Ossa Morena occidental. Dichas áreas anómalas se han clasificado por su coherencia interna y por asociaciones geoquímicas anómalas en tres grados de interés prospectivo, destacando varias de Pb-Zn-Ag, de Au, de elementos de tierras raras (REE) y de otros elementos metálicos. La naturaleza y dimensiones de estas áreas son variables, pudiendo tratarse de pequeñas cuencas anómalas en posible relación con mineralizaciones o de áreas más amplias y menos definidas, pero con una confluencia de rasgos favorables. Por ello, se pone de manifiesto la importancia de realizar en la zona futuros estudios geoquímicos con una mayor densidad de muestreo, combinados con otro tipo de estudios geológicos y metalogenéticos, de manera que contribuyan a la mejora de la definición y delimitación de las áreas anómalas prospectivas identificadas.

Palabras clave: exploración geoquímica, sedimentos de corriente, concentrados de minerales pesados, análisis factorial, Ossa Morena.

Abstract: *The multi-elemental geochemical exploration carried out through the use of complementary sampling means, such as stream sediments and heavy mineral concentrates, has allowed the definition of 47 anomalous areas in the western Ossa Morena Zone. These anomalous areas have been classified by their internal coherence and by anomalous geochemical associations in three grades of prospective interest, highlighting several of Pb-Zn-Ag, Au, rare earths elements and also other metallic elements. The nature and dimensions of these areas are variable, being able to be small anomalous basins in possible relation with mineralizations or larger and less defined areas, but with a confluence of favorable features. Therefore, it is important to carry out future geochemical studies in the area with a higher sampling density, combined with other types of geological and metalogenetic studies, in order to contribute to the improvement of the definition and delimitation of the prospective anomalous areas identified.*

Key words: *geochemical exploration, stream sediments, heavy mineral concentrates, factor analysis, Ossa Morena.*

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

Los estudios geoquímicos constituyen una importante fuente de contribución a la economía, a la conservación del medio ambiente y al bienestar de la sociedad por sus diversas aplicaciones, tales como prospección minera, cartografía geológica regional, agricultura, restauración de hábitats o la gestión del uso del suelo (Grunsky y Caritat, 2019). En este caso, se ha desarrollado una campaña geoquímica aplicada a la exploración minera sobre una superficie aproximada de 6500 km^2 que geológicamente ocupa, en su mayoría, materiales de la Zona de Ossa Morena (ZOM), así como algunas unidades de la Zona Sudportuguesa (ZSP) del Macizo Ibérico. Los objetivos fundamentales fueron: i) realizar una exploración multielemental de esa zona para definir posibles áreas de interés y ii) elaborar una infraestructura básica de los materiales superficiales para profundizar en el conocimiento geológico y geoquímico.

METODOLOGÍA

Este trabajo se ha desarrollado siguiendo los protocolos establecidos para los proyectos de cartografía geoquímica definidos en Batista et al. (2022) y Demetriades et al. (2022). Para el desarrollo de la campaña de exploración geoquímica se han tomado dos tipos de muestras durante los años 2019-2021: i) 1630 muestras de sedimentos de corriente con una densidad aproximada de 1 muestra/ 4 km^2 y ii) 243 muestras de concentrados de minerales pesados con una densidad aproximada de 1 muestra/ 25 km^2.

Estas muestras se han procesado y preparado en los laboratorios del Instituto Geológico y Minero de España en Tres Cantos (Madrid), siguiendo los protocolos descritos en el Atlas Geoquímico de España (Locutura et al., 2012) para los sedimentos de corriente y los concentrados de minerales pesados.

Los análisis multi-elementales de muestras se han efectuado en los laboratorios ACTLABS (Ontario, Canadá), determinándose en cada una de ellas 64 elementos químicos para los sedimentos de corriente y 36 para las muestras de concentrados de minerales pesados, que incluyen a grupos de elementos de interés metalogénico, de interés geológico y de interés medioambiental. Los análisis han sido realizados mediante las técnicas de ICP-AES e ICP-MS, tras digestión ácida por disolución tetra-ácida, y por la técnica de INAA. Las determinaciones son de contenidos totales o casi totales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha generado una base de datos completa con todos los resultados analíticos, datos de las campañas de campo y otras características destacadas para realizar el cálculo estadístico, realizándose análisis estadísticos univariantes. Tras la preparación del fichero informático de trabajo se efectúa el tratamiento de la información, cuyos fundamentos básicos se hallan en Reimann *et al.* (2008), y que, a grandes rasgos, es el siguiente:

Tratamiento estadístico univariante, que incluye un análisis estadístico descriptivo de los 64 elementos químicos determinados, expresándose en forma de tabla los principales parámetros estadísticos de las distribuciones, como media aritmética y geométrica, desviación típica, máximo y mínimo, coeficiente de variación y percentiles.

Tratamiento gráfico univariante. Por una parte, se presentan los principales tipos de gráficos estadísticos correspondientes a las diferentes distribuciones, como histogramas, diagramas de cajas o "boxplots", que permiten visualizar rasgos de interés de dichas distribuciones, como carácter normal o lognormal, unimodalidad o polimodalidad, etc. Por otra, se presentan los mapas de distribución espacial de los elementos, sobre el fondo geológico y con expresión de la localización de mineralizaciones. Estos mapas de distribución espacial se efectúan con representaciones por círculos de color, atribuibles a diferentes tramos de concentraciones, aunque los más descriptivos resultan ser los mapas de contornos tras la preparación de mallas por el método del inverso de la distancia al cuadrado (ID^2), que facilitan la comprensión de las tendencias de distribución de los elementos y de su relación con unidades geológicas o con las mineralizaciones.

Tratamiento estadístico multivariante, que permite conocer mejor la estructura interna de los datos, las relaciones entre variables y definir las principales asociaciones geoquímicas que explican la variabilidad de los datos para fundamentalmente reducir la dimensionalidad del gran volumen de información.

Se ha utilizado dentro de la técnica de análisis factorial el análisis de componentes principales (ACP), por ser el más seguro y productivo desde el punto de vista de resultados (Reimann et al., 2002). Dicho método ya ha sido utilizado en estudios de mayor escala realizados a nivel nacional (Locutura et al., 2012). En este caso se ha trabajado con los resultados de los sedimentos de corriente, donde se han definido 5 factores que explican casi el 70% de la variabilidad geoquímica total (Tabla I).

Factor	Elementos	Variabilidad explicada
1	Nd, Pr, Ce, La, Sm, Gd, Eu, Th, Tb, U (P, Dy, Be, Rb, K, Cs, Ba, Tl)	15,85%
2	Er, Yb, Y, Ho, Tm, Lu, Dy, Tb (Gd, Sc, Na, Al, Ca)	15,01%
3	Co, Cr, Fe, Sc, Ni, Mg, Mn (V, Al, Zn, Eu, Cu, Li, Sr, P, Ga) opuesto a (Th, U)	11,51%
4	Tl, Rb, Be, Cs, K, Li, Bi, U, Al, As (Th, Ga, Ba, Sb, Pb, Ce, La, Pr, Nd, Ni) opuesto a Ca, Na (Mg,Sr)	14,84%
5	Ag, Cd, S, Pb, Cu, Sb, Zn (P, Ba, As, Bi, Sn, V, Au, Nb) opuesto a (Ga)	8,44 %

TABLA I. *Factores obtenidos mediante ACP y la proporción que explican de la variabilidad. Entre paréntesis, elementos que presentan una afinidad más baja por ese factor.*

Tratamiento gráfico multivariante. Se han representado los mapas de distribución siguiendo los mismos parámetros que en la representación gráfica univariante, de los "factor scores*"* obtenidos en el análisis factorial para cada uno de los factores sobre el fondo geológico y las mineralizaciones. Como ejemplo, se presenta el factor 1 (Fig. 1). Los diferentes factores se estudiaron e interpretaron en función de su hipotético origen (natural, antropogénico o mixto), gracias a su representación gráfica y a las asociaciones geoquímicas.

El factor 1 es un factor litológico, que está constituido por elementos del grupo de las tierras raras, más concretamente, de las tierras raras ligeras y otros afines, como el Th y U, junto con otros elementos granitófilos, como K, Be o Y. Tiene una gran coherencia desde el punto de vista litológico y puede ser posiblemente explicado por su asociación a plutonismo ácido, a intermedio o a determinadas litologías sedimentarias con participación de materiales de origen ígneo o litologías muy especializadas geoquímicamente. El factor 2 es un factor litológico que está constituido por elementos de las tierras raras —más concretamente de las pesadas— y algunos otros elementos con afinidad, como el Y y el Na. El factor 3 es también un factor litológico, estando formada esta asociación por elementos ferromagnesianos, muy similar a los que caracterizan, en general, a las rocas ígneas básicas. Todos los elementos implicados son petrogenéticamente afines. El factor 4 incluye elementos mayores (K, Al), elementos granitófilos (Rb, Li, Cs, Be, U, Th), elementos del grupo de las tierras raras y otros asociados a rocas ígneas ácidas (As, Tl) y tiene muy probablemente un sentido litológico, relacionado con rocas intrusivas ácidas. Y, por último, el factor 5 es un factor mixto, puesto que la estructura de este factor está constituida por una mayoría de elementos de mineralización (Ag, Cd, S, Pb, Sb, Zn, As, Ba, Bi, Sn, Au), siendo especialmente relevantes en la zona los indicios de Pb-Zn-Ag que aparecen entre los elementos con más peso en este factor, con una gran influencia también por los residuos mineros originados por la explotación de estos metales (Tabla I).

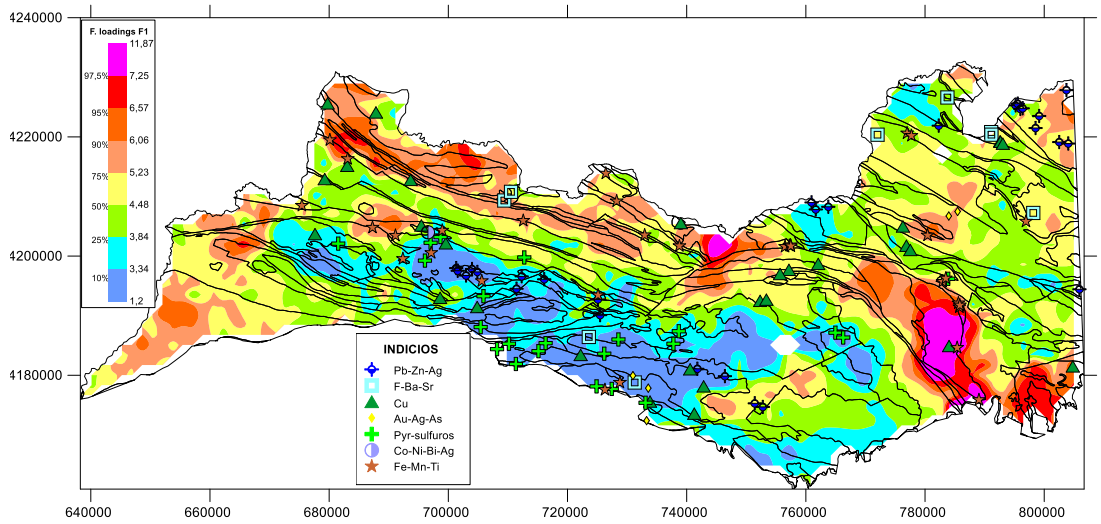


FIGURA 1. *Mapa de isovalores del factor 1: Nd, Pr, Ce, La, Sm, Gd, Eu, Th, Tb, U (P, Dy, Be, Rb, K, Cs, Ba, Tl) del ACP.*

Posteriormente, para establecer y definir los umbrales de anomalías geoquímicas que van a conducir a la delineación de áreas anómalas prospectivas, no es válida la clasificación puramente litológica a partir del mapa geológico. En estas situaciones parece más lógico proceder a una clasificación de la población muestral basada en las características geoquímicas de las muestras, definiendo clases geoquímicas homogéneas que tengan el mayor significado geológico posible y, a su vez, estableciendo en ellas umbrales de anomalía elemento a elemento, tanto para los sedimentos de corriente como para los concentrados de minerales pesados.

La clasificación se ha efectuado siguiendo la técnica multivariante de análisis de conglomerados ("cluster analysis"). Se ha realizado por un proceso no jerárquico, con el objeto de hacer una única partición del grupo en k grupos, por la variante de reasignación. El algoritmo empleado es el denominado método de "K-means" o método del centroide. Se han definido 5 clases a partir de los factores que tenían un sentido litológico, es decir F1, F2, F3 y F4. Gracias a estos se han podido definir umbrales de anomalía elemento a elemento para cada una de las clases.

La determinación de los umbrales de anomalía se ha efectuado de dos maneras en función de tipos de elementos. En aquellos que muestran fondos y dispersiones muy diferentes según las clases geoquímicas, los umbrales se han determinado específicamente para cada grupo. En aquellos elementos que no muestran diferencias significativas según las clases o bien, cuyos contenidos están generalmente por debajo del límite de detección, se han definido unos umbrales de anomalías únicos para toda la población.

En este trabajo, los criterios de elección de umbrales descansan sobre el mismo concepto de diagrama de cajas. Se han tomado como umbrales los valores correspondientes al "upper hinge" o límite de aparición de "outliers", al paso de "outliers" a valores "extremos" y, a veces, dentro de éstos se ha introducido otro umbral en función de las discontinuidades, por un lado, para los sedimentos de corriente y, por otro, para los concentrados de minerales pesados directamente sobre los mapas unielementales.

CONCLUSIONES

La interpretación de los datos extraídos de la cartografía geoquímica, que aporta información sobre las relaciones geoquímica-geología, de los mapas de anomalías elementales y de los mapas mineralométricos, teniendo en cuenta el medio geológico y metalogenético del área, ha permitido definir 47 áreas anómalas prospectivas (Fig. 2). La naturaleza y dimensiones de estas áreas son variables. Puede tratarse de pequeñas cuencas anómalas en posible relación con mineralizaciones o de áreas más amplias y menos definidas, pero con una confluencia de rasgos favorables que las hacen merecedoras de un estudio más detallado. Estas áreas anómalas se han clasificado por su coherencia interna y por asociaciones geoquímicas anómalas en tres grados de interés prospectivo, destacando varias de Pb-Zn-Ag, de Au, de otros elementos metálicos y también de REE. Seis de ellas han sido definidas como de interés prospectivo alto (Tabla II).

Nº anomalía	Elementos anómalos en muestras de sedimentos de corriente	Elementos anómalos en muestras de concentrados de minerales pesados
1	Ag-Au-Cd-Cu-Li-Mn-Pb-Sb-U-Zn-La-Ce-Eu-Sm-Nd	Na-Rb-Ta-Tb-Yb-Lu
2	Ag-Ba-Cd-Pb-Sb-Zn-La-Ce-Eu-Sm-Nd	-
3	Ag-As-Au-Ba-Bi-Cu-Mn-Sb-Sn-U	Ba-Na
5	Ag-As-Ba-Cd-Cu-Fe-Hg-Mn-Ni-P-Pb-Sn-Ta-Zn.	Co-Mo-Zn-Tb-Yb-Lu
26	Cr-Mg-Li-Ni-Ta-U-La-Ce-Eu-Sm-Nd	Cr-Hf-Th-U-La-Ce-Sm-Yb
42	Ag-As-Au-Bi-Cd-Hg-Mn-Sb-Sn-U-W-Zn-La-Ce-Eu-Sm-Nd-Yb	Au-Co-Hg-Sm-Eu-Tb

TABLA II. *Anomalías más destacadas con los elementos que las definen, tanto en muestras de sedimentos de corriente como en muestras de concentrados de minerales pesados.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Convenio Específico entre la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades de la Junta de Andalucía y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC).

REFERENCIAS

Batista, M.J., Prieto-Rincón, G., Turel, A., Martín-Méndez, I. y Pérez, A. (Editores) (2022): *Manual de metodologías geoquímicas de países iberoamericanos*. Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos, 223 p.

Demetriades, A., Johnson, C.C., Smith, D.B., Ladenberger, A., Adánez Sanjuan, P., Argyraki, A., Stouraiti, C., Caritat, P. de, Knights, K.V., Prieto Rincón, G. y Simubali, G.N. (Editores) (2022): *International Union of Geological Sciences Manual of Standard Methods for Establishing the Global Geochemical Reference Network*. IUGS Commission on Global Geochemical Baselines, Atenas, Special Publication, 2, 515 p.

García-Cortés, A. (Ed. Ppal.) (2011): Cartografía de recursos minerales de Andalucía. IGME, Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía, Madrid, 608 p.

Grunsky, E. C. y Caritat, P. (2019): State-of-the-art analysis of geochemical data for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20: 217-232.

Locutura, J., Bel-Lan, A., García-Cortés, A. y Martínez-Romero, S., (2012): *Atlas Geoquímico de España*. IGME, Madrid, 608 p.

Matas-González, J., Martín-Parra, L.M., Rubio Pascual, F.J., Roldán, F.J., Martín-Serrano, A. y Alonso-Chaves, F. (2015A): *Mapa Geológico de España 1:200.000, hojas nº 74 y 75 (Puebla de Guzmán / Sevilla)*. IGME, Madrid.

Matas-González, J., Martín-Parra, L.M., Roldán, F.J. y Martín-Serrano, A. (2015B): *Mapa Geológico de España 1:200.000, hoja nº 76 (Córdoba)*. IGME, Madrid.

Reimann, C., Filzmoser, P., y Garrett, R. G. (2002): Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied geochemistry*, 17, 185-206.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G. y Dutter, R. (2008): *Statistical data analysis explained. Applied Environmental Statistics with R*. Wiley, Chichester, 343 p.

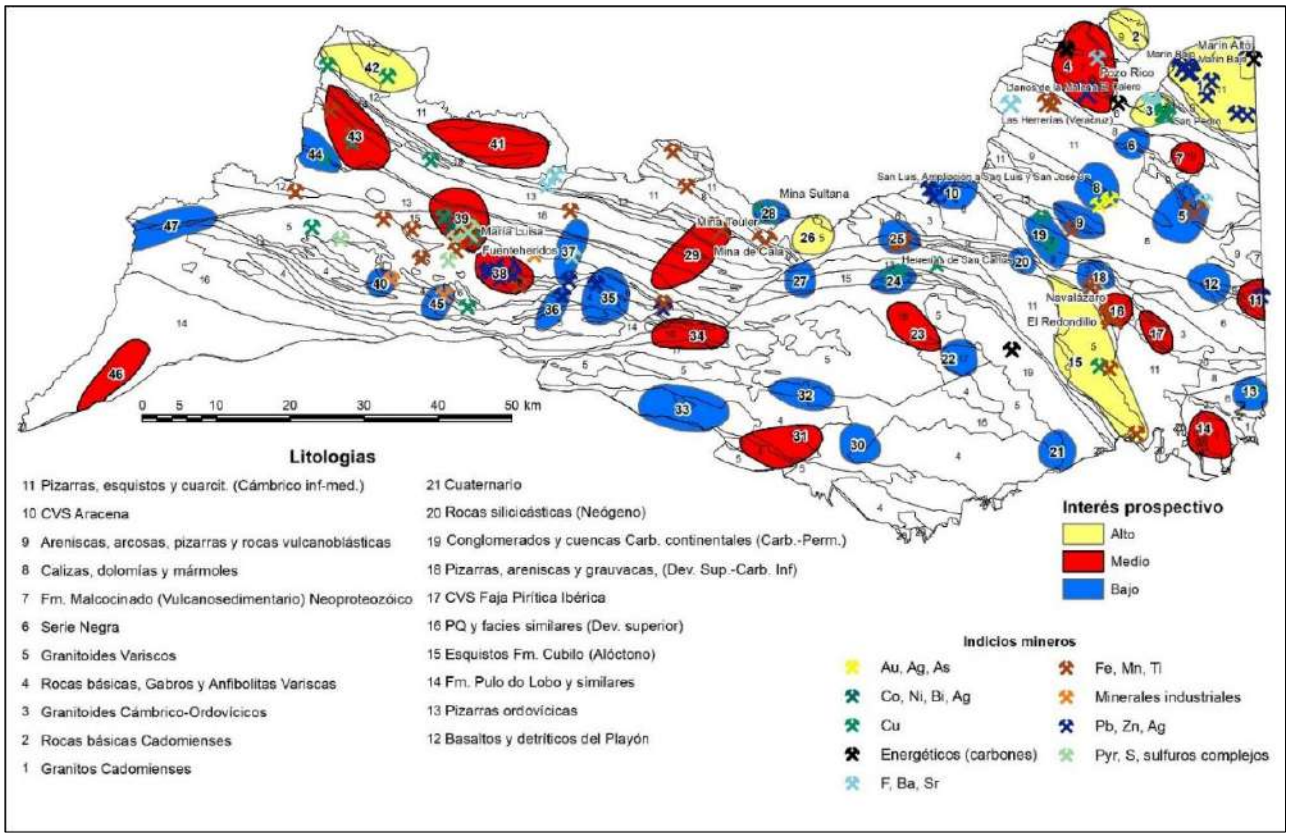


FIGURA 2. *Mapa de síntesis de las áreas anómalas. Indicios mineros de la zona tomados de García-Cortes (2011).*

Mineralogía Automatizada: mirando hacia el futuro en un mundo de minerales críticos y una economía verde.

Automated Mineralogy: Looking to the future in a world of critical minerals and a green economy.

A. H. Menzies[1], R. Tagle[1] y N. M. Kelly[2]

1 Bruker Nano Analytics GmbH, Am Studio 2D, Berlin 12489, Germany. andrew.menzies@bruker.com, roald.tagle@bruker.com
2 Bruker Nano Analytics Division, 5465 E. Cheryl Parkway, Madison, WI 53711, U.S.A. nigel.kelly@bruker.com

Palabras clave: micro-XRF, mineralogía automatizada, AMICS, minería, exploración.

Resumen

La transición a energías sustentables y el desarrollo de nuevas tecnologías asociadas a ellas, requerirán la extracción futura de recursos minerales a mayores volúmenes. Consecuentemente, la identificación de nuevos depósitos es tanto económica, como estratégicamente importante, lo cual está generando un auge en la exploración mineral, que va acompañado de la necesidad de menores impactos ambientales a través de un eficiente beneficio mineral. Para esto, es crucial entender la mineralogía y la textura a diferentes escalas de observación, para así incrementar el conocimiento en cada etapa del ciclo de beneficio, desde la exploración y producción, hasta el manejo de los desechos. La mineralogía automatizada, tradicionalmente relacionada a plataformas analíticas asociadas a SEM, ha formado parte integral de la mineralogía de procesos por más de dos décadas y es una herramienta clave en este proceso. Sin embargo, los avances en la microfluorescencia de rayos X (micro-XRF) permiten que la mineralogía automatizada pueda ser implementada en un rango más amplio de escalas de análisis. En la práctica, el mismo procedimiento de trabajo puede aplicarse a testigos de gran tamaño (requiriendo una preparación de muestras mínima), a secciones pulidas o a briquetas de varios tipos de muestras (p. ej. fragmentos de roca o muestras de planta). A mayor nivel de detalle, la información obtenida puede consistir en la clasificación de minerales a escala submicrométrica, o incluso la zonación dentro de un grano individual. Se darán a conocer aplicaciones de casos reales que destacan los beneficios del análisis a diferentes escalas utilizando la plataforma AMICS, e integrando la información recopilada con las técnicas anteriormente mencionadas, para varios tipos de depósitos y muestras.

Abstract

The transition towards cleaner energy and the manufacturing of associated new technologies will require extraction of mineral resources at volumes much greater than at present. Consequently, identification of new deposits is both economically and strategically important, driving a boom in mineral exploration coupled with a need to lower the environmental impact through more efficient mining capabilities. To achieve this, an understanding of mineralogy and texture across scales is crucial, thus improving knowledge at each stage of the mining cycle, from exploration through to production and ultimately to waste handling. A key tool in this understanding is Automated Mineralogy, which has been integral to process mineralogy for more than two decades, traditionally using a SEM analytical platform. However, the advancement of scanning micro-XRF instruments allows Automated Mineralogy to be implemented across broader spatial scales. In practice, the same workflow can be applied, from large drill-core samples (with minimal preparation), through to polished thin sections or block mounts of various sample types (*e.g.* rock fragments or crushed plant material). At the most detailed level, the information obtained can be at the sub-micrometre scale of mineral classification, or even zonation withing single grains. Applications in the real world will be shown that highlight the benefits of analysis across scales using the AMICS platform, integrating information collected on the aforementioned analytical techniques for a variety of deposit and sample types.

La roca estéril del yacimiento de cobre de Touro en Galicia, España: retos para su caracterización ambiental

The waste rock of the Touro copper deposit in Galicia, Spain: challenges for its environmental characterization

T. Meuzelaar[1], P. Núñez-Fernández[2], A. Martín-Izard[3], D. Arias-Prieto[3] y F. Díaz-Riopa[2]

[1] Life Cycle Geo, LLC.; 729 Main Street, Longmont, Colorado 80501, US. tom@lifecyclegeo.com
[2] Cobre San Rafael, S.L., Avenida de Santiago nº42. O Pino, 15823 A Coruña. pablo.nunez@atalayamining.com fernando.diaz@atalayamining.com
[3] Dpto. Geología, Universidad de Oviedo, C/Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo. amizard@uniovi.es darias@geol.uniovi.es

Palabras clave: drenaje ácido de roca, material estéril, ensayos estáticos, ensayos cinéticos, sulfuros.

Resumen

La caracterización de las rocas metamórficas para evaluar el potencial de drenaje ácido de roca de los estériles es especialmente difícil, ya que los métodos de laboratorio utilizados habitualmente pueden dar lugar a una subestimación significativa del potencial de *ARD*. Se realizaron pruebas estáticas para más de 300 muestras del proyecto de cobre Touro e indican que los métodos basados en el carbono sobrestiman con frecuencia el potencial de neutralización ácida debido a la presencia de carbonatos de grafito y de manganeso-hierro. El método Sobek modificado tiene en cuenta con mayor precisión la capacidad amortiguadora de los carbonatos y no tiene en cuenta el grafito, aunque la cinética de disolución de los aluminosilicatos debe evaluarse en el contexto de las tasas de oxidación de los sulfuros. Los ensayos históricos de azufre para el proyecto se basaron en métodos insuficientes para digerir completamente los sulfuros metamorfizados y requirieron corrección.

Por lo tanto, las métricas de pruebas estáticas, como el Potencial de Neutralización Neto o la Relación de Potencial de Neutralización, pueden dar resultados engañosos cuando se emplean métodos de caracterización incorrectos. Estos análisis deben ser usados con precaución y complementados con cuidadosas pruebas cinéticas de campo y laboratorio. Los ensayos preliminares de celdas húmedas de cinco muestras de Touro sugieren que los valores de pH terminal de las celdas que se han vuelto ácidas coinciden estrechamente con los valores de pH NAG predichos.

El ensayo pH NAG evita algunos de los desafíos asociados con las predicciones de azufre y carbono en rocas metamórficas

Abstract

Characterization of metamorphic rocks to evaluate waste material acid rock drainage potential is particularly challenging as commonly used laboratory methods can result in significant under-prediction of ARD potential. Static tests were conducted for over 300 samples from the Touro copper project and indicate that carbon-based methods frequently overestimate acid neutralization potential due to the presence of both graphite and manganese-iron carbonates. The Modified Sobek method more accurately accounts for the buffering capacity of carbonates and does not account for graphite, although aluminosilicate dissolution kinetics need to be evaluated in the context of sulfide oxidation rates. Historic sulfur assays for the project relied on methods insufficient to fully digest metamorphosed sulfides and required correction.

Static test metrics such as the Net Neutralization Potential or Neutralization Potential Ratio, therefore, can give misleading results when incorrect characterization methods are employed. Such metrics should be considered as screening level, used with caution, and complemented with careful field and laboratory kinetic tests. Preliminary humidity cell testing of five Touro samples suggests that terminal pH values for cells that have become acidic closely match predicted NAG pH values. The NAG pH test avoids some of the challenges associated with sulfur and carbon predictions in metamorphic rocks.

Remediación de aguas ricas en elementos de las tierras raras (REEs) mediante estrategias de precipitación de fases minerales.

Remediation of rare earth elements (REEs)-rich waters using mineral phases precipitation strategies.

R. Millán-Becerro [1], E. Ruiz-Agudo[2] y M.P. Asta[2]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y Centro de Investigación en Recursos Naturales Salud y Medioambiente (RENSMA), Universidad de Huelva, Campus "El Carmen", Huelva. ricardo.millan@dct.uhu.es
2 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Fuentenueva s/n, Granada. encaruiz@ugr.es; mpasta@ugr.es

Palabras clave: tierras raras, mecanismos de sorción, fases neoformadas, experimentos de precipitación.

Resumen

El estuario de Huelva está contaminado por efluentes procedentes de la actividad minera e industrial, los cuales contienen altas cantidades de metal(oid)es, incluyendo materias primas críticas como los elementos de las tierras raras (REEs). Sin embargo, altas concentraciones disueltas de REEs podrían tener efectos adversos sobre la vida acuática (Oral *et al*., 2010). Este trabajo evalúa la remediación de soluciones acuosas ricas en REEs, mediante la precipitación de minerales sulfatados y fosfatados (*i.e.*, yeso y brushita), donde los REEs podrían ser concentrados para su potencial recuperación. Los objetivos de este estudio fueron determinar: (1) los mecanismos de retención de los REEs, y (2) las potenciales diferencias en las capacidades de sorción de REEs de las fases estudiadas. El contenido de REEs en estas fases aumentó progresivamente a medida que se utilizaron soluciones con mayores concentraciones de los elementos estudiados. Sin embargo, las tasas de eliminación de REEs logradas con la precipitación del yeso (< 65%) fueron significativamente menores que las obtenidas durante la precipitación de la brushita (≈ 100%). Esto podría ser debido a que la brushita tiene mayor capacidad de adsorción que el yeso, ya que ambos minerales tienen estructuras cristalinas similares y por tanto los procesos de co-precipitación de REEs deberían ser similares. Estos resultados muestran que la precipitación de brushita podría ser una estrategia viable para la concentración de REEs y la consiguiente remediación de las aguas contaminadas.

Abstract

The estuary of Huelva is polluted by effluents from mining and industrial activities, which contain high amounts of metal(oid)s, including critical raw materials like rare earth elements (REEs). However, high dissolved concentrations of REEs could have adverse effects on aquatic life (Oral *et al.*, 2010). This work evaluates the remediation of aqueous solutions rich in REEs through the precipitation of sulfate and phosphate minerals (*i.e.*, gypsum and brushite), where REEs could be concentrated for potential recovery. The aims of this study were to determine: (1) the removal mechanisms of dissolved REEs, and (2) potential differences in the REEs sorption capacities of the studied phases. The content of REEs in these phases increased progressively as solutions with higher concentrations of the target elements were used. However, the REEs removal rates by gypsum (< 65%) were significantly lower than those by brushite precipitation (≈ 100%). This could be because brushite has a greater adsorption capacity than gypsum, as both minerals have similar crystalline structures and therefore the co-precipitation processes of REEs should be similar. These results show that brushite precipitation could be a viable strategy for the concentration of REEs and consequent remediation of polluted waters.

Referencias

Oral, R., Bustamante, P., Warnau, M., D'Ambra, A., Guida, M. y Pagano, G. (2010). *Chemosphere*, doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.06.057.

Li-rich claystone in the Central Depression of Northern Chile: a new lithium source

Arcillas ricas en Li en la Depresión Central del Norte de Chile: una nueva fuente de litio

D. Morata[1], S. Maza[1], I. Abad[2], A. Harwood[3], M. Vergara[3], M. Cerda[4], R. Mardel[4]

1 Department of Geology and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA). Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile. dmorata@ing.uchile.cl, santiagomaz@gmail.com
2 Departamento de Geología y CEACTEMA, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071 Jaén, Spain. miabad@ujaen.es
3 Montero Mining and Exploration Ltd. tharwood@monteromining.com, mvergaramontero@gmail.com
4 Zander Invest Ltd. martincerdan94@gmail.com, rodrigo.mardelh@gmail.com

Abstract: Li-rich clays (hectorite) have been identified in several Miocene lacustrine claystone deposits in the Central Depression of Northern Chile. These claystones are interbedded with evaporitic sequence where sulphates, nitrates and salts dominate. XRD, HR-TEM and whole-rock geochemical analysis of the claystone confirm the presence of Li content up to 931 ppm. Our mineralogical study suggest that Li is incorporate in the smectite structure (hectorite) as substitution of Mg, opening a new Li-resource in the Chilean (and Andean) Li industry. The origin of these Li-rich claystone is proposed to be in relation with pyroclastic volcanism, hydrothermal alteration of volcanic products and final deposition in endorheic evaporitic basins (salars and paleosalars) during the Miocene, favoured by the arid and hyperarid conditions present in the area for at least the last 10 Ma.

Key words: Central Depression, salars, hectorite, lithium, hydrothermalism, diagenesis.

Resumen: *En depósitos lacustres del Mioceno en la Depresión Central del Norte de Chile se han identificado esmectitas ricas en Li (hectorita). La hectorita se concentra en niveles ricos en arcillas que aparecen interestratificados con evaporitas, donde predominan sulfatos, nitratos y haluros. Los estudios de DRX, HR-TEM y análisis de roca total confirman la presencia de estos niveles arcillosos ricos en Li, con contenidos en Li que alcanzan los 931 ppm. Nuestros estudios sugieren que el Li se incorpora en la estructura de la esmectita (hectorita) sustituyendo al Mg, conformándose estos tipos de depósitos en un nuevo recurso de Li para la industria minera de Chile (y otros países andinos). Se propone que el origen de estos depósitos de arcillas ricas en Li está asociado con la actividad volcánica explosiva, la alteración hidrotermal de los productos volcánicos expulsados y el depósito de estos sedimentos en cuencas evaporíticas endorreicas (salares y caliches) durante el Mioceno. La formación de las evaporitas y la preservación de estos depósitos se vio favorecida por las condiciones áridas a hiperáridas imperantes en la zona al menos en los últimos 10 millones de años.*

Palabras clave: *Depresión Central, salares, hectorita, litio, hidrotermalismo, diagénesis.*

INTRODUCTION

Lithium, one of the most important metals in modern society, is classified as an energy-critical element due to the increasing global demand for Li-ion batteries. Moreover, Li is considered as a key element in the transition energy policy aimed to reduce the dependence of fossil fuels. The current Li market is dominated by Li extraction from brines and pegmatites (Bowell *et al.*, 2020 and references therein). A third, non-conventional Li-rich source, are the claystone deposits such as volcanic clay deposits, lacustrine clays, and evaporite sequences, that are enriched in Li and mostly related with old volcanic calderas. In these Li-deposits Li is mostly concentrated in hectorite, smectite and other clay minerals, and these are currently the subject of intense worldwide research (e.g., Benson et al., 2017, Castor et al., 2020).

The combination of the following processes is proposed for the lithium rich clays formation (Warren, 2017 and references therein): (1) hydrothermal alteration of volcanic ash or glass; (2) precipitation of authigenic phases from saline lacustrine pore waters; and/or (3) lithium incorporation into detrital smectite during diagenesis. In the Andean Cordillera and in the Central Depression of Northern Chile these three key factors have been prevalent for at least the last 10-12 Ma. The massive silicic volcanism (the Altiplano Puna Volcanic Complex –APVC–) with the consequent formation of calderas, together with arid to hyper-arid climatic conditions and widespread hydrothermalism are the perfect confluence of factors for the formation of Li-rich brines that become concentrated in present day and past endorheic evaporitic basins (salars). Moreover, the presence of paleo-endorheic basins in the Central Depression of the Northern Andean Cordillera opens a new window for the presence of Li-rich claystones

related with lacustrine deposits or paleosalars. This work analyzes some paleosalars deposits in the Central Depression of Northern Chile where Li-rich claystones have been identified. Using geology and mineralogical studies we propose a genetic model for this non-conventional Li-rich deposits that could potentially provide a new Li resource in Chile.

GEOLOGICAL SETTING

The Central Depression in Northern Chile is located in one of the most arid to hyperarid regions in the world, where several non-marine intramassif fore-arc basins were formed from Tertiary time (e.g., Pueyo et al., 2001; Hartley and Evenstar, 2010). Some Upper Miocene-Pliocene paleo-lacustrine and paleosalars in the Central Depression region of the Atacama Desert evidence a strong volcanic influence on the formation of these paleo-lacustrine deposits and an indirect input of elements such as Li through thermal springs (e.g., Pueyo et al., 2001). These authors present a detailed lithofacies description of the ancient lacustrine sedimentary sequences, where volcanic components (mostly ignimbrites) are mixed with evaporates. Following the work of Pueyo et al. (2001), high rates of volatile emission through volcanism could explain the evaporite mineral accumulations observed in these salars, which experienced persistent volcanism and arid and endorheic conditions during the Neogene. Moreover, these arid to hyperarid conditions, for at least the last 10 Ma, has been proposed by Reich and Bao (2018) as a first order in the preservation of massive nitrate deposits (the "caliche" belt) and the Li-clay rich horizons that have been observed interlayered in the evaporite sequences. The Miocene to Pliocene lacustrine sediments consist of evaporites, evaporitic sands, sandstones, siltstones, and gravel sequences, where Li-rich levels are also frequently observed (see Pueyo et al., 2010 for a complete summary of the stratigraphy of some of these Central Depression basins).

METHODOLOGY

X-ray diffraction (XRD) analyses were obtained from whole unoriented powdered samples and also from oriented aggregates prepared by sedimentation on glass slides from the < 2 μm fraction. Clay fraction analyses were performed after washing with distilled water to remove salts. X-ray diffractograms were obtained using a Bruker D2 Phaser diffractometer. Mineral identification was performed using the Diffrac.EVA v5.2 software and the mineral quantification was obtained using the TOPAS-6 software with the Crystallography Open Database.

Chemical analyses of whole-rock were also performed at the CEGA geochemical laboratories. Trace elements (Li, Sr and Ba) for the clay-rich layers were analyzed in a Thermo Scientific iCAP Q quadrupole mass spectrometer (Q-ICP-MS). Anions (chlorine, sulphate, nitrate, bromide, phosphates and fluorine) were analysed by ionic chromatography (IC) using a Metrohm 861 Advanced Compact IC.

After XRD analyses, selected samples were analyzed by high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM) at the Centro de Instrumentación Científica (CIC) of the Universidad de Granada using a HAADF Thermo Fisher Scientific TALOS F200X microscope, operating at 200 kV and with a point-to-point resolution of 0.12 nm in the TEM mode and 0.19 nm in the STEM mode. The quantitative micro- to nano-chemical analyses, in the STEM mode, were obtained by means of the AEM-EDX (energy dispersive X-ray microscopy), using the Super-X system.

RESULTS AND DISCUSSION

Whole-rock XRD analysis identified anhydrite, halite, gypsum and bassanite as major phases, coupled with glauberite, nitratine and strontianite as accessory evaporitic minerals. Detritic, authigenic and diagenetic minerals are dominated by quartz, feldspars, clay minerals and zeolites.

Clay fraction whole-rock geochemistry confirm the presence of Li-bearing phases. In this sense, ICP-MS analysis of these quote Li content from 130 to 931 ppm. High chlorine, sulphate, nitrate, and bromide content confirm the presence of several evaporitic phases even in the clay fraction samples.

Clay-fraction XRD analysis of those Li-rich claystone layers highlight the presence of hectorite and illite/smectite (I/S) as the probable Li-hosted minerals. After ethylene-glycol treatment observed the characteristic ~11.5-12.5 to 16.1-16.9 Å hectorite shifting coupled with a R0 I/S with illite proportion <50%. Illite and chlorite were also identified in minor amounts.

Finally, EDX-HR-TEM microanalyses in Mg-rich tri-octahedral smectite reflect charge deficiency in the octahedral site that could be interpreted as indirect evidence of Li in the smectite (hectorite) structure (Fig. 1).

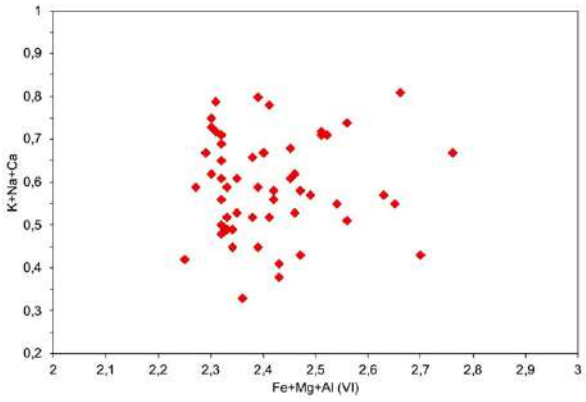


FIGURE 1. *Chemical composition diagram of smectites analyzed in the studied samples by EDX-HR-TEM, showing >80% of the analyses a sum of octahedral cations (Fe+Mg+Al) between 2.2 and 2.5 atoms per formula unit.*

The origin of these Li-rich clay deposits is considered to be controlled by volcanism during the explosive

APVC events with leaching of Li from ignimbritic deposits during weathering and hydrothermal activity. Caldera collapse and ash-flow deposits would favour Li-rich hydrothermal fluids that mix with meteoric water in closed, topographically low caldera basin, generating a hybrid diagenetic fluid. Fluid-rock interactions, enhanced by the high geothermal gradient in the APVC, will increase these Li leaching processes. Such fluids would be mobile and flow west to the Central Depression where under arid climatic conditions, evaporation will be strongly favoured in closed isolated lacustrine environments, and Li could be concentrated in Li-rich saline brines in surface waters and sub-surface brines. Some of this Li will be incorporated in neoformed smectite by surface sorption mechanisms together with the precipitation of evaporitic minerals. Finally, diagenetic, solid-state mineralogical transformations (enhanced by high geothermal gradient) in these saline basin sedimentary units would favour the released of Li from brines to be mostly incorporated in hectorite and the zeolitization of acid volcanic fragments.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is a contribution to the Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA). Authors also thank Zander Invest Ltd. for providing samples for this study.

REFERENCES

Benson, T.R., Coble, M.A., Rytuba, J.J. and Mohood, G.A. (2017): Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*, 8: 270. https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y

Bowell, R.J., Lagos, L., de los Hoyos, C. and Declercq, J. (2020): Classification and characteristics of natural lithium resources. *Elements,* 16: 259-264. DOI: 10.2138/gselements.16.4.259

Castor, S. B. and Henry, C. D. (2020): Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: Geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin. *Minerals*, 10: 68. https://doi.org/10.3390/min10010068

Hartley, A.J., Evanstar, L. (2010): Cenozoic stratigraphic development in the north Chilean forearc: Implications for basin development and uplift history of the Central Andean margin. *Tectonophysics,* 495: 67–77. doi:10.1016/j.tecto.2009.05.013

Pueyo, J.J., Chong, G. and Jensen, A. (2001): Neogene evaporates in desert volcanic environments: Atacama Desert, northern Chile. *Sedimentology,* 48: 1411-1431.

Reich, M. and Bao, H. (2018); Nitrate Deposits of the Atacama Desert: A Marker of Long-Term Hyperaridity. *Elements*, 14: 251-256. DOI: 10.2138/gselements.14.4.251

Warren, J. (2017): *Lithium in saline geosystems: lake brines and clays. Salty Matters*, 14 p. https://www.saltworkconsultants.com/downloads/29.%20Lithium_saline.pdf

Investigaciones de placeres marinos ricos en materias primas críticas en España

Investigations of marine placers rich in critical raw materials in Spain

W. Ng-Cutipa[1,2], A. Lobato[1], F. J. González[1], E. Marino[1], B. Rincón-Tomás[1], E. Santofimia[1], T. Medialdea[1], L. Somoza[1], E. Boixereu[2], R. Piña[3] y R. Lunar[3]

1 GI-Geología Aplicada a los Recursos Marinos y de Medios Extremos, Dpto. Geología y Subsuelo, C. Ríos Rosas 23, Instituto Geológico y Minero de España 28003 Madrid. wl.ngcutipa@igme.es, ab.lobato@igme.es, fj.gonzalez@igme.es, e.marino@igme.es, b.rincon@igme.es, e.santofimia@igme.es, t.medialdea@igme.es, l.somoza@igme.es

2 GI-Geología Económica de los Recursos Minerales, Dpto. Recursos Geológicos para la Transición Ecológica, C. Ríos Rosas 23, Instituto Geológico y Minero de España 28003 Madrid. e.boixereu@igme.es

3 Procesos metalogénicos en sistemas magmáticos e hidrotermales, Dpto. de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, C. de José Antonio Novais 12, Universidad Complutense de Madrid 28040 Madrid. rpinagar@ucm.es, lunar@ucm.es

Resumen: Los minerales pesados ricos en materias primas críticas (CRM por sus siglas en inglés), pueden acumularse en arenas de playa y de fondo marino somero, constituyendo indicios de depósitos de placer. El objetivo de este trabajo, es realizar un estudio de síntesis de placeres marinos ricos en CRM en el territorio español. Los diversos estudios del área marino-costera se pueden agrupar en: investigaciones regionales del programa FOMAR (Mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes), investigaciones locales de placeres, y bases de datos armonizadas junto a nuevas investigaciones. Los resultados muestran que Galicia es la Comunidad Autónoma más explorada. En cuanto a indicios, existen múltiples zonas de ilmenita (Ti), rutilo (Ti), magnetita (Fe), circón (Zr), monacita (REE), granate, casiterita (Sn), wolframita (W) y oro (Au), entre otros, distribuidos en el territorio español, tanto en playas como en plataforma continental somera. La acumulación de minerales pesados y la formación de placeres, están influenciadas a escala regional y local por una compleja combinación de factores condicionantes como son el contexto geológico (con distintas rocas fuente metamórficas, intrusivas, sedimentarias y, en menor medida, volcánicas), la cuenca de drenaje, la mineralización, las corrientes y el oleaje. Finalmente, se están integrando herramientas de última generación de observación de la Tierra en la exploración de placeres, usualmente realizada con estudios geológicos tradicionales.

Palabras clave: CRM, minerales pesados, playa, ambiente marino somero, placeres marinos.

Abstract: *Heavy minerals rich in critical raw materials (CRM) can accumulate in beach and shallow water sands, constituting occurrences of placer deposits. The aim of this work is to carry out a synthesis study of CRM-rich marine placers in Spain. The different studies of the marine-coastal area can be grouped into: regional investigations of the FOMAR programme (geological map of the continental margin and adjacent areas), local placer investigations, and harmonised databases and new investigations. The results show that Galicia is the most explored Autonomous Community. In terms of occurrences, there are multiple zones of ilmenite (Ti), rutile (Ti), magnetite (Fe), zircon (Zr), monazite (Rare Earth Elements-REE), garnet, cassiterite (Sn), wolframite (W) and gold (Au), among others, distributed throughout the Spanish territory, both on beaches and on the shallow continental shelf. The accumulation of heavy minerals and the formation of placers is influenced regionally and locally by a complex combination of factors such as the geological context (with a variety of metamorphic, intrusive, sedimentary and, to a lesser extent, volcanic source rocks), the drainage basin, the mineralisation, the currents and the waves. Finally, the latest tools of Earth observation are being integrated into placer exploration, usually carried out according to traditional geological surveys.*

Key words: *CRM, heavy minerals, beach, shallow waters, marine placers.*

INTRODUCCIÓN

En la Unión Europea (UE), la última lista de materias primas críticas (CRM) actualizada en 2023, muestra una creciente demanda en cantidad y variedad de estos recursos (European Commission, 2023). Los depósitos minerales de tipo placer acumulan algunos de ellos, siendo explotados a escala mundial. Al mismo tiempo, y desde hace varios años, la UE y sus países miembros impulsan nuevos estudios y re-análisis de indicios de recursos minerales para actualizar su conocimiento. En España, el IGME ha realizado la investigación de placeres en el área marino-costera en la década de los 70 y 80 del pasado siglo. Estos trabajos, realizados en el marco del proyecto "Investigación minera submarina", del programa FOMAR (Mapa geológico de la plataforma continental y zonas adyacentes), abarcan 4 sectores: Huelva-Cádiz, Gibraltar-Málaga, Rías Baixas y SE de Almería, en donde se han analizado minerales pesados en muestras de playa y aguas someras (Fig. 1). Otros

trabajos más puntuales, incluidas bases de datos armonizadas, se han desarrollado en las rías de Pontevedra, Vigo y Ortigueira, y en playas de A Coruña, Murcia y el Delta del Ebro. De este modo, el objetivo de este trabajo es sintetizar las investigaciones de placeres ricos en CRM, así como conocer su distribución en el territorio español.

INVESTIGACIONES REGIONALES DEL PROGRAMA FOMAR

En el sector Huelva-Cádiz, que abarca desde Ayamonte hasta Cádiz, la presencia de ilmenita es mayor en algunas zonas (por ejemplo, entre Isla Canela-Isla Cristina, Rompido-Nuevo Portil, Mazagón y Caserío Marzagón). Muy puntualmente existen indicios de circón y magnetita en dicho tramo, y picotita entre el río Guadalquivir y Cádiz. En el área marina, se ha reconocido la presencia de ilmenita principalmente frente a Nuevo Portil-Punta Umbría, Caserío Marzagón, monte Asperillo-río Guadalquivir (en forma de media luna) y en la bahía de Cádiz (esta última acumulación orientada O-E). Hacia el NE y N de estas costas predominan rocas metamórficas de las Zonas Sudportuguesa y Ossa-Morena del Macizo Ibérico, con secuencias sedimentarias detríticas más próximas a la costa, mientras que la bahía de Cádiz recibe aportes de la Cordillera Bética. En su conjunto constituyen una fuente mixta de minerales pesados transportados desde la parte alta de las cuencas de drenaje.

En la zona de Gibraltar-Málaga (bahía Línea Concepción-Málaga), la presencia de ilmenita, magnetita y picotita está un poco más extendida, encontrándose varios grupos de playas con dos o tres de estos minerales, predominando la ilmenita (IGME, 1975). En el fondo marino, la ilmenita se reparte más uniformemente frente al sector Línea Concepción-San Diego, más irregularmente entre San Diego-El Faro, y en 2 franjas (una muy pegada a la costa y otra más profunda) entre El Faro y Málaga. Las rocas fuente son los afloramientos metamórficos y sedimentarios de las Zonas Internas y del campo de Gibraltar de la Cordillera Bética.

En el área de Rías Baixas, existen playas con indicios de ilmenita, circón y granate en las rías de Pontevedra y Vigo, Islas Cíes y Ons, incluso se ha registrado xenotima en el interior de la Ría de Vigo, próximo a un afloramiento con el mismo mineral presente como accesorio, indicando la cercanía del área fuente. En el fondo marino se concentran principalmente estos minerales entre las islas Sálvora y Ons, y las islas Ons y Cíes (parte externa de la Ría de Pontevedra; Ng-Cutipa *et al*., 2023). En esta zona predominan las rocas intrusivas y metamórficas de Galicia-Trás-Os-Montes, siendo la fuente principal de minerales pesados.



FIGURA 1. *Ubicación de placeres marinos ricos en materias primas críticas en España. 1) Huelva Cádiz, 2) Gibraltar-Málaga, 3) Rías Baixas, 4) Cabo de Gata-mesa de Roldán, 5) Delta del Ebro, 6) Playa Balarés, 7) Costas de Galicia, 8) Ría Ortigueira, 9) Playa Montalvo, 10) Bahía Portman, 11) Playas en Golfo de Roses (Figueras) y desembocadura del río Ter, 12) Rías de Pontevedra y Vigo, 13) Ría de Vigo (proyecto S34i).*

Al SE de Almería (sector Cabo de Gata-La Mesa de Roldán), con estaciones más escasas en playa, se ha identificado un alto contenido de minerales pesados en dos playas (Las Negras y Del Plomo) con alrededor de 64% de ilmenita+magnetita. En la zona marina, las mayores concentraciones de minerales pesados están en la franja más próxima a la costa, siendo mayor en la zona de Gata que en Rodalquilar (una media de 6,61% y 2,78% de minerales pesados, respectivamente). La fuente de estas acumulaciones de minerales pesados, está relacionada con el vulcanismo neógeno del sector y mineralizaciones de tipo epitermal, y su transporte se caracteriza por escasos y cortos arroyos que discurren hacia la costa, denotando un gran componente local y una gran influencia del oleaje en el sector marino.

INVESTIGACIONES LOCALES DE PLACERES

En el Delta del Ebro se han encontrado arenas negras con contenidos de oro, monacita, circón, magnetita, rutilo e ilmenita a profundidades que alcanzan 1 m, estando controlados por la deriva y la dirección del delta (NE a SO; Bellaubí *et al*., 1999).

En la playa Balarés (Ponteceso-A Coruña; Ferreros, 2010), entre 1941 y 1952, se extrajeron 3.600 toneladas de ilmenita con sub-productos de granate, circón, rutilo, monacita y casiterita.

Manso (2001) realiza una exhaustiva investigación de placeres en playas de la costa de Galicia, separando 19 áreas que incluyen las provincias de Lugo, A Coruña y Pontevedra. Cada zona tiene sus particularidades, con contenidos variables de ilmenita, rutilo, circón, chorlo, cromita, magnetita, entre otros, estando el almandino presente en todas ellas. Más localmente, en aguas someras de la ensenada de Corrubedo, se emplearon métodos radiométricos para la detección de minerales pesados.

En la Ría de Ortigueira (A Coruña), Gent *et al*. (2005) exploró minerales pesados en relación con el último gran avance glaciar, registrando granates y espinela en aguas someras.

Pérez *et al*. (2005) reconoce una capa 2 (intermedia), de carácter continuo de minerales oscuros en la playa Montalvo (Pontevedra). Se observaron laminaciones negras que contienen de 40 a 100% de minerales pesados (principalmente andalucita, piropo, almandino y chorlo), que van de unos mm a dm de espesor.

Otro indicio de placer, originado por la actividad humana, son las arenas negras de la bahía de Portman (Murcia). Estas arenas se generaron por el vertido de material de relaves en medio subacuático (mar), que posteriormente fueron movilizados por la acción de las corrientes y el oleaje. Las arenas están compuestas principalmente de magnetita, hematites y siderita (Manteca *et al*., 2014.)

BASES DE DATOS ARMONIZADAS Y NUEVAS INVESTIGACIONES

La compilación más antigua a través de fichas, muestra placeres con casiterita y wolframita en paleocanales de las Rías de Pontevedra y Vigo (Lenoble *et al*., 1995).

En los últimos años, los proyectos europeos EMODNet-Geology, GeoERA-MINDeSEA y GSEU muestran información actualizada, estandarizada y armonizada y desarrollan estudios metalogenéticos sobre los depósitos de placeres marinos de España y otros países de Europa. Estos proyectos compilan 10 zonas de información en las que se encuentran minerales de placer en el área marino-costera, con presencia de oro (como en las playas del Golfo de Roses, Figueras, y en la desembocadura del río Ter), minerales de hierro, estaño y wolframio, además de sub-productos importantes como minerales de titanio, zirconio y REE.

Recientemente, el proyecto europeo S34i, está llevando a cabo la investigación de placeres en la conexión costera-marina de la Ría de Vigo, empleando técnicas tradicionales de estudios geológicos combinadas con otras de última generación de observación de la Tierra (como imágenes multiespectrales aéreas y submarinas). En muestras de playa (Figs. 2 y 3) se han reconocido ilmenita, circón, granate, monacita y casiterita (Ng-Cutipa *et al*., 2023).



FIGURA 2. *Laminaciones de granates y otros minerales pesados en la playa Santa Marta, Ría de Vigo (Ng-Cutipa et al., 2023).*

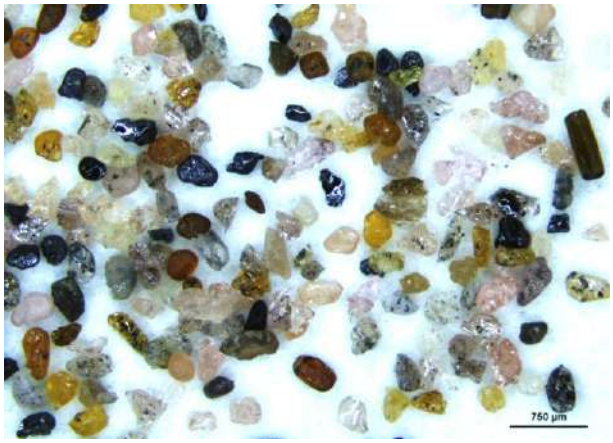


FIGURA 3. *Microfotografía de minerales pesados de la fracción <0,250 a >0,125 mm en lupa binocular. Muestra de placeres tomada en 2023 en la playa Vao (Vigo, Proyecto S34i).*

CONCLUSIONES

Las áreas evaluadas ponen de manifiesto que: 1) Galicia es la zona donde existen más investigaciones de placeres en áreas marino-costeras; 2) en los estudios regionales de exploración de placeres existen indicios de minerales de titanio, zirconio y REE en playas y plataforma continental en cuatro contextos geológicos distintos (Cordillera Bética, vulcanismo neógeno, Zonas Sudportuguesa y Ossa-Morena, y Zona Galicia-Trás-Os-Montes del Macizo Ibérico); 3) el control geológico y de la red de drenaje es distinto en cada zona explorada, tanto para investigaciones regionales como para locales; 4) la influencia del oleaje y las corrientes es determinante en el área marina somera para la acumulación preferente de minerales pesados, incluidas las CRM; y 5) es necesario realizar investigaciones más detalladas para conocer la formación de placeres y su conexión playa-aguas someras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos europeos S34i (HORIZON-CL4-2022-RESILIENCE-01, Grant Agreement nº 101091616); GSEU (HORIZON-CL5-2021-D3-02-14, Grant Agreement nº

101075609) y EMODnet-Geology (EASME-EMFF-2020-3_1_11-Lot2-SI2_853812).

REFERENCIAS

Bellaubí, F., Larriba, O.M. y Ongay, M. (1999): El oro y otros minerales en los depósitos tipo placer del Delta del Ebro. Provincia de Tarragona, España. En: *I Simposium Transfronterizo sobre el Patrimonio Natural*, 55-67.

European Commission (2023): *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report.* Publications Office of the European Union, Luxembourg, 158 p.

Ferreros, A. (2010): *Tittania, S.A. y la mina de ilmenita de Balarés (Ponteceso, A Coruña)*. IGME, Reporte interno, 24 p.

Gent, M.R., Menéndez, M., García, J.J. M. y Taraño, J. (2005): Offshore occurrences of heavy-mineral placers, Northwest Galicia, Spain. *Marine Georesources and Geotechnology*, 23(1-2), 39-59.

IGME (1975): *Investigación minera preliminar de la plataforma continental submarina Málaga-Gibraltar*. Informe interno, IGME, Madrid, 171 p.

Lenoble, J.P., Augris, C., Cambon, R. y Saget, P. (1995): *Marine mineral occurrences and deposits of the economic exclusive zones*. Marmin a database. Ifremer, 313 p.

Manso, F. (2001): *Exploración de placeres costeros de minerales pesados y su génesis en la costa de Galicia*. Tesis Doctoral, Univ. de Vigo, 265 p.

Manteca, J.I., López, J.Á., Oyarzun, R. y Carmona, C. (2014): The beach placer iron deposit of Portman Bay, Murcia, SE Spain: the result of 33 years of tailings disposal (1957–1990) to the Mediterranean seaside. *Mineralium Deposita*, 49, 777-783.

Ng-Cutipa, W., González, J., Lobato, A., Zananiri, I. y Teodoro, A. (2023): Titanium, Zirconium and Rare Earth Element placer deposits in coastal environments of Rías Baixas (Galicia, NW Spain). En: *51st Underwater Mineral Conference*, Rotterdam, Abstract Booklet, 80-83.

Pérez, I., Bernabeu, A., Rey, D. y Vilas, F. (2008): Formación del placer de la playa de Montalvo (Pontevedra). *Geogaceta*, 44, 231-234.

Mapas de potencialidad minera mediante SIG de depósitos de litio en la provincia de Cáceres (España)

Mineral potential mapping using GIS for lithium deposits in Cáceres province (Spain)

P. C. Ocaña-Cerdido[1], S. M. Timón-Sánchez[2], A. Díez-Montes[2], T. Llorens-González[2], I. Martín-Méndez[3], J. García-Crespo[3] y T. Sánchez-García[3]

1 IGME-CSIC. Residencia CSIC Campus Aula Dei. Avenida Montañana 1005, 50059 Zaragoza. pc.ocana@igme.es
2 IGME-CSIC. Plaza de la Constitución, 1, 3º, 37001 Salamanca. s.timon@igme.es al.diez@igme.es t.llorens@igme.es
3 IGME-CSIC. Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid. i.martin@igme.es garcia.crespo@igme.es t.sanchez@igme.es

Palabras clave: litio, cartografía del potencial minero, SIG, exploración geoquímica, Cáceres.

Resumen

El litio (Li) se considera un recurso mineral estratégico debido su alta y creciente demanda para la fabricación de baterías de ion-Li recargables. En los últimos años, para asegurar un suministro estable de Li, se ha producido un incremento de la exploración minera para identificar recursos potenciales de este elemento. En el oeste de la Península Ibérica existen importantes mineralizaciones de Li, asociadas a pegmatitas relacionadas con el magmatismo varisco, a cúpulas leucograníticas y a venas de cuarzo. Este trabajo se ha centrado en la elaboración de mapas prospectivos de Li en la provincia de Cáceres, Zona Centroibérica. Para ello, se ha llevado a cabo la integración de datos de geoquímica de suelos (Locutura *et al*., 2012), datos gravimétricos, la localización de los indicios mineros de Li conocidos y otros factores geológico-estructurales en un sistema de información geográfica (SIG). Los resultados indican que la distribución de las anomalías geoquímicas para el Li coincide con las anomalías residuales de Bouguer y estas muestran buena correlación con la geología. El mapa generado permite definir tres zonas favorables para la prospección de Li, asociadas a macizos graníticos: (1) Jálama; (2) Cabeza Araya y Albalá; y (3) Nissa-Alburquerque. Estos resultados son congruentes con los obtenidos por Campos *et al.* (2000).

Abstract

Lithium (Li) is considered a strategic mineral resource due to its high and growing demand for the manufacture of rechargeable Li-ion batteries. In recent years, in order to ensure a stable Li supply, there has been an increase in mining exploration to identify potential resources of this element. Important Li mineralisations occur in the western zone of the Iberian Peninsula, mainly associated with pegmatites related to variscan magmatism, but also in Li-enriched leucogranites and quartz veins. The aim of this work has been to elaborate prospectivity maps for Li in the province of Cáceres, CIZ. For this purpose, the integration of soil geochemistry data (Locutura *et al*., 2012), gravimetric data, location of the known Li occurrences and other geological-structural factors in a GIS has been carried out. Results indicate that the distribution of geochemical anomalies for Li correlate fit well with the residual Bouguer anomalies, which also correlate with the geology. The map generated by this method allows us to define three favourable areas for Li prospecting, associated with granitic massifs: (1) Jálama; (2) Cabeza Araya and Albalá; and (3) Nissa-Alburquerque. These results are in agreement with those obtained by Campos *et al.* (2000).

Agradecimientos

A la beca JAEINT_22_01957 y al proyecto MINCE financiado por MITERD (000X-730).

Referencias

Campos R., Gumiel, P., Tejero R. y Plata, J.L. (2000). *Geogaceta*, 27, 35-38.

Locutura, J., Bel-Lan, A., García-Cortés, A. y Martínez-Romero, S. (2012). *Atlas Geoquímico de España*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Desarrollo de geoestándares de carbonatos para análisis de isótopos estables ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) mediante SIMS

Development of carbonate geostandards for stable isotope SIMS analyses ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$)

D. Parcerisa[1], I. Cantarero[2], C. Fàbrega[3], M. G. Śliwiński[4], A. Hertwig[5], J. T. Śliwiński[6], A. Travé[2]

1 Dpt. Enginyeria Minera, Industrial i TIC, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa (EPSEM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 08240 Manresa. david.parcerisa@upc.edu
2 Dpt. Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), 08028 Barcelona. i_cantarero@ub.edu, atrave@ub.edu
3 Independent researcher, Spain. carlesfal@yahoo.es
4 Dpt. of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, WA, USA. mgsliw@uw.edu3
5 Heidelberg Ion Probe, Institute of Earth Sciences, Heidelberg University, Germany. Actualmente: John de Laeter Centre, Curtin University, Australia. andreas.hertwig@curtin.edu.au
6 Dpt. of Earth Sciences, ETH Zürich, Switzerland. jakub.sliwinski@erdw.ethz.ch

Palabras clave: Geoestándares, isótopos estables, carbonatos, elementos traza, SIMS

Resumen

El análisis de isótopos estables ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) mediante espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) se ha convertido en una técnica indispensable para la caracterización de rocas y minerales con microtexturas complejas, generando una creciente demanda de geoestándares con ajuste matricial por parte de la comunidad científica. En el caso de los carbonatos, cuya composición isotópica es un trazador clave en campos tan diversos como paleoclima, secuestro de CO_2, formación de depósitos minerales o diagénesis, se están desarrollando geoestándares de calcita, aragonito y dolomita-ankerita para su aplicación en SIMS.

Debido a la variabilidad en la concentración de elementos minoritarios y traza que pueden presentar la calcita y el aragonito, se está evaluando el impacto y los umbrales de sensibilidad que tienen estos elementos sobre el fraccionamiento instrumental (sesgo de masas) durante el análisis mediante SIMS de carbonatos. Para ello, se está desarrollando una serie de geoestándares de calcita y aragonito con concentraciones variables en elementos minoritarios y traza comunes, buscando cubrir un rango desde aproximadamente 0 a 12000 ppm. A su vez, se busca aplicar modelos estadísticos multivariantes de predicción, como la metodología de superficies de respuesta, para mejorar la corrección del sesgo de masas integrando la varianza de los parámetros composicionales e instrumentales monitoreados durante una sesión ordinaria de varios días de SIMS.

Abstract

Stable isotope analysis ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) by secondary ion mass spectrometry (SIMS) has become the state-of-the-art technique for characterizing rocks and minerals with complex microtextures, creating a growing demand in the scientific community for matrix-matched geostandards. In the case of carbonates, whose isotopic composition is a key tracer in fields as diverse as paleoclimate, CO_2 sequestration, ore deposits formation or diagenesis, geostandards of calcite, aragonite and dolomite-ankerite are being developed for their application at SIMS.

Due to the variability in concentration of minor and trace elements that calcite and aragonite can present, the impact and sensitivity thresholds of these elements on instrumental mass fractionation (mass bias) during SIMS analysis is being evaluated. A series of potential geostandards is being developed with variable concentrations of common minor and trace elements, seeking to cover a range from practically 0 to 12000 ppm. Concurrently, we are exploring how to adapt multivariate statistical prediction models, such as response surface methodology, to improve mass bias correction schemes by integrating variance in both sample composition and various instrumental parameters monitored during a typical multi-day SIMS analysis session.

Asociaciones mineralógicas en los depósitos de bentonita sódica de la Formación Allen (Cretácico Superior) en la Cuenca Neuquina (Argentina). Implicaciones genéticas.

Mineralogical assemblages in sodic bentonite deposits of Allen Formation (Upper Cretaceous), Neuquén Basin (Argentina). Genetic considerations.

G. Pettinari[1,2], T. Musso[1,2], M. Pozo[3] y A. Martínez[4]

1 Dpto. de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina. gisela.pettinari@probien.gob.ar; telma.musso@probien.gob.ar
2 Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Energías Alternativas, PROBIEN (CONICET-UNCo), Universidad Nacional Del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina
3 Dpto. de Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049, Madrid, España. manuel.pozo@uam.es
4 Tolsa Minerales La Patagonia S.A., Parque Industrial, Cinco Saltos 8303, Río Negro, Argentina. alexis.martinez@tolsa.com

Palabras clave: bentonita sódica, zeolitas, autigénesis, lagoon.

Resumen

Las bentonitas sódicas de los depósitos del Lago Pellegrini se presentan en la Formación Allen, de edad Cretácico superior, en la cuenca Neuquina (Argentina). Las bentonitas están asociadas a arcillitas, fangolitas, limolitas y facies heterolíticas. Las principales diferencias mineralógicas entre las cinco litofacies son el contenido en filosilicatos, el porcentaje en minerales detríticos y el contenido de zeolitas. Dentro de los filosilicatos predomina la esmectita alumínica (superior al 90% en las bentonitas) con un bajo contenido en illita-mica, concentrada principalmente en las facies heterolíticas y limolitas. Las zeolitas se concentran principalmente en las litofacies más detríticas (cuarzo y feldespatos) predominando la clinoptilolita-heulandita y en menor proporción mordenita. La asociación de minerales heredados está constituida por: cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita, moscovita, zircón, ilmenita, monazita y apatito. La asociación de minerales autigénicos está formada por: montmorillonita sódica, clinoptilolita-heulandita, mordenita, cristobalita, celestina, barita, pirita, hematites, yeso y halita. El análisis de litofacies indica condiciones de llanuras mareales mixtas arena-fango donde las capas de bentonita se habrían formado bajo condiciones reductoras y de baja energía en áreas encharcadas (lagoon). La montmorillonita sódica se formó durante la diagénesis temprana por alteración de vidrio volcánico.

Abstract

Sodic bentonites from Pellegrini Lake deposits occur in Upper Cretaceous Allen Formation in the Neuquén Basin (Argentina). The bentonites are associated with claystones, mudstones, siltstones and heterolithic facies. The main mineralogical differences between the five lithofacies are the phyllosilicate content, the percentage of detrital minerals and the zeolite content. Within the phyllosilicates, Al-smectite predominates (more than 90% in the bentonites) with a low illite-mica content, mostly concentrated in the heterolithic facies and siltstones. Zeolites are mainly concentrated in the more detrital lithofacies with a predominance of clinoptilolite-heulandite and, to a lesser extent, mordenite. The association of inherited minerals consists of: quartz, plagioclase, potassium feldspar, biotite, muscovite, zircon, ilmenite, monazite and apatite. The association of autigenic minerals is formed by: sodium montmorillonite, clinoptilolite-heulandite, mordenite, cristobalite, celestine, barite, pyrite, hematite, gypsum and halite. Lithofacies analysis indicates mixed mud-sand tidal flats conditions where the bentonite beds would have formed under reducing low-energy conditions in waterlogged areas (lagoon). The sodic montmorillonite was formed during early diagenesis mainly by alteration of volcanic glass.

Overview of the Santa Comba W-Sn rich zoned polyphase intrusion, Galicia NW Spain

Descripción general del complejo poli-intrusivo de Santa Comba (W-Sn), Galicia NO España

C. Pita[1,2], I. Borrajo[1], F. Tornos[1], y E. Crespo[2]

1 Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Calle del Dr. Severo Ochoa, 7, Moncloa - Aravaca, 28040 Madrid c.pita@csic.es, borrajomaza@hotmail.com, f.tornos@csic.es.
2 Dpto. Mineralogía y Petrología (UCM), Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis 2, 28040, Madrid. ecrespo@ucm.es.

Abstract: *The northwest region of the Iberian Peninsula is well-known for its peraluminous Variscan granitic rocks, which host W-Sn deposits often enriched with rare metals like Li, Nb, and Ta. This study delves into the geochemistry of Santa Comba's zoned polyphase intrusions and its mineralization. While Santa Comba is known for its vein mineralization, it also hosts a significant disseminated mineralization. This mineralization is found in the endogranite, which is the youngest porphyritic intrusion at the core of the zoned pluton. The endogranite's whole-rock geochemistry was analyzed and compared with that of its surrounding barren intrusions (exogranites) and others of similar age and context in the Iberian Massif. The geochemical signatures suggest that the Santa Comba units share a common parental magma with varying degrees of differentiation depending on their age. The endogranite exhibits a more pronounced peraluminous character and higher Rb, Ta, Nb, and Li content but a lower concentration of rare earth elements. While characterizing the disseminated mineralization, it was noted that scheelite ($CaWO_4$) dominates over wolframite ($FeMnWO_4$) at certain depths. We've also noted columbite exsolutions along the hubnerite-rich wolframite.*

Key words: *W-Sn, Santa Comba, Hesperian Massif, Granite, Fractional crystallization.*

Resumen: El noroeste de la Península Ibérica es conocido por sus rocas graníticas peralumínicas de edad Varisca, que albergan depósitos de W-Sn, a menudo enriquecidos en metales raros como Li, Nb y Ta. Este estudio se centra en la geoquímica del complejo ígneo poli-intrusivo de Santa Comba y su mineralización. Aunque conocido por su mineralización en filones, Santa Comba también presenta una importante mineralización diseminada en la intrusión porfídica más joven alojada en el núcleo de un plutón zonado, el endogranito. Se ha analizado la geoquímica de roca total del endogranito y comparado con la de las intrusiones estériles encajantes (exogranitos) y otras de edad y contexto similar en el Macizo Ibérico. La firma geoquímica sugiere que las unidades de Santa Comba tienen un magma parental común con diferentes grados de diferenciación dependiendo de la edad. El endogranito muestra un carácter peralumínico más pronunciado y mayor contenido de Rb, Ta, Nb y Li, pero menor concentración de tierras raras. Durante la caracterización de la mineralización diseminada, se ha observado la predominancia de scheelita ($CaWO_4$) sobre wolframita ($FeMnWO_4$) a partir de cierta profundidad. Además, se han identificado exsoluciones de columbita en la wolframita hubnerítica.

Palabras clave: W-Sn, Santa Comba, Macizo Hespérico, Granito, Cristalización fraccionada.

INTRODUCTION

The study is conducted in Galicia, Spain, precisely in the Santa Comba W-Sn mine (45km north of Santiago de Compostela). The mine is set in a polyphase intrusion that fits the Exogranite-*Stockscheider*-Endogranite model proposed by Nesen (1979). Rare metal-enriched granites, such as this one, are the most evolved acid magmatic systems on Earth and, due to the criticality of these metals, are subject to exhaustive investigation.

This deposit features two mineralization styles consisting of cassiterite (SnO_2), wolframite ($FeMnWO_4$), and scheelite ($CaWO_4$). The first is a high tonnage low-grade disseminated mineralization hosted in the youngest and innermost intrusion (endogranite). The second is a low tonnage high-grade mineralization hosted in a quartz vein system that crosscuts the whole complex. Scheelite and wolframite are the main tungsten ores in Santa Comba. Each has a different paragenesis depending on whether they are found in one mineralization or the other. The following research comprises the use of various

analytical techniques (EMPA, BSE, whole-rock geochemistry, EDX mapping and analysis) to make an accurate description of the Santa Comba polyphase igneous features.

GEOLOGY OF SANTA COMBA

The deposit is located within the Iberian Massif, in the westernmost section of the Variscan Orogen (Martínez Catalán, 1990). Here, a Neoproterozoic to Early Paleozoic Terrane (Central Iberian Zone) is overthrusted by rocks with oceanic affinities that belong to the Allochthonous Terrain of Galicia-Trás-os-Montes conformed of three Complexes (Ordenes, Cabo Ortegal, and Malpica-Tui). The Santa Comba pluton intrudes the Basal Units of the Ordenes Complex, precisely the Santiago Unit, which is mainly made up of paragneiss, and orthogneiss with local intercalations of eclogites, and schists.

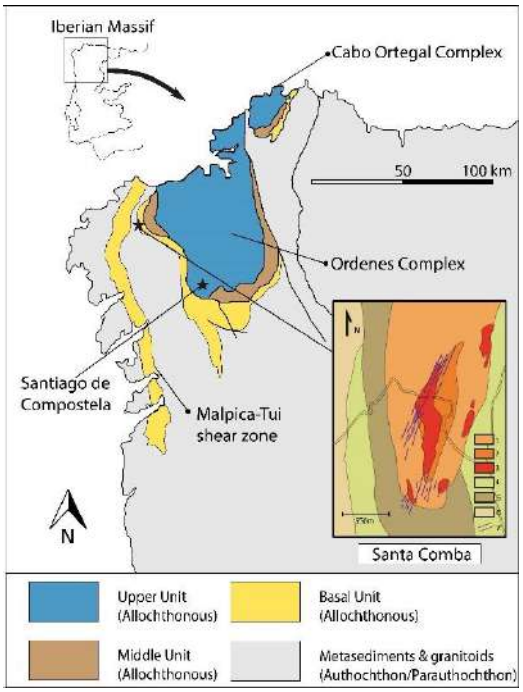


FIGURE 1. *Map showing the three Allochthonous Complexes mentioned and their location within the Iberian Massif. To the right: Geological map of Santa Comba (modified from Borrajo et al. 2022). 1-2: exogranite; 3: endogranite; 4: Ordenes Complex; 5: orthogneiss; 6: schists; 7: quartz veins with Sn-W.*

All the intrusive units show a penetrative N-S trending magmatic foliation suggesting the synchronous emplacement of the complex with the development of the regional dextral shear zone. The regional shear zone extends for 40 km in a north-south direction, separating the Malpica-Tui Complex from the Ordenes Complex (Fig. 1).

The overlapped U-Pb in zircon and Re-Os in molybdenite dates of 319.5 ± 6.7 Ma and 320.3 ± 2.2 Ma respectively at the Santa Comba endogranite (Borrajo, 2024) support a synchronous emplacement with other syn-tectonic Variscan granitoids in NW Iberia at around 330-305 Ma (e.g., Gutiérrez-Alonso et al., 2011).

Santa Comba is comprised of two barren units (exogranites), one mineralized intrusive unit (endogranite), and a quartz vein system that cuts through the whole complex and the host metamorphic units. From the two barren units, the outer intrusion is a two-mica porphyritic granite with abundant biotite whereas the inner unit is very similar, but with muscovite as the more prominent mica (Cuenin,1982). The youngest unit of the concentric complex is a leucocratic equigranular granite with pervasive hydrothermal alteration that hosts disseminated ore. This unit, denominated endogranite, exhibits a distinct type of pegmatite called "*stockscheider*", at its contact with the muscovite-rich exogranite (Nesen, 1979). It is a rock primarily composed of large plumose perthitic alkaline feldspar crystals and quartz that grow towards the endogranite. This rock is spatially related to alternating bands rich in tourmaline and albite. These features are consistent with the formation of a cooling carapace followed by a succession of hydrothermal assemblages product of the autometasomatic replacement of crystallized rocks by magmatic-hydrothermal fluids.

TUNGSTEN MINERALIZATION

Assuming that the disseminated mineralization is the oldest, we have differentiated between the scheelite and wolframite in veins (e.g. Wf II) and disseminated in the endogranite (e.g. Wf I).

The disseminated mineralization includes mm-sized, randomly located, anhedral to subhedral grains of wolframite (Wf I) often associated with tourmaline and muscovite-rich zones in the endogranite. These wolframite grains have a Hubnerite/Ferberite (H/F) ratio of ca. 52 and are usually found alongside disseminated low-Mo scheelite (Sch I). Sch I becomes the dominant phase at greater depths and is often surrounded by Mn-rich wolframite (Fig. 2).

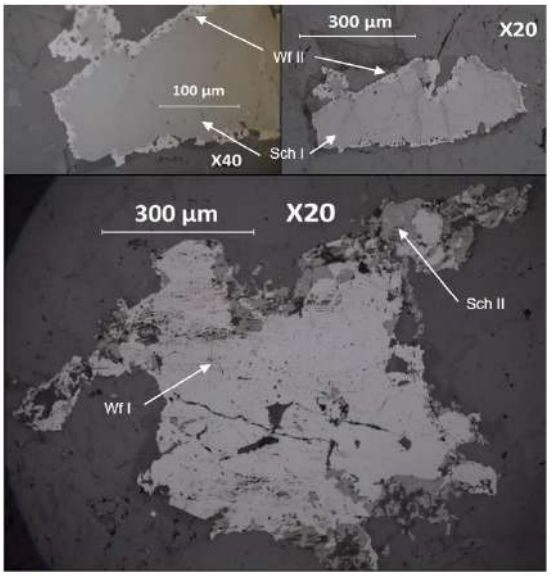


FIGURE 2. *Pictures of the two types of wolframite-scheelite grains under reflected light.*

The N-S trending vein swarm is comprised almost exclusively of quartz and coarse-grained wolframite (Wf II), with a modest, if any, muscovite selvage. The wolframite hosted by these veins has a more hubneritic composition, H/F= 63. Lastly, there are smaller veins consisting of sulfides, chlorite, and large scheelite grains (Sch II). This late scheelite can sometimes appear replacing Wf I and Wf II.

EPMA analysis shows that disseminated wolframite (Wf I) is specially enriched in Nb and Ta. BSE and EDX (analysis and mapping) confirm that aside from the wolframite being enriched in these elements there are columbite grains aligned to the wolframite's growth bands (Fig. 3 and Table I). So far they have been interpreted as exsolutions and they show a strong preference for the Mn-rich zones of the wolframite (Fig. 4).

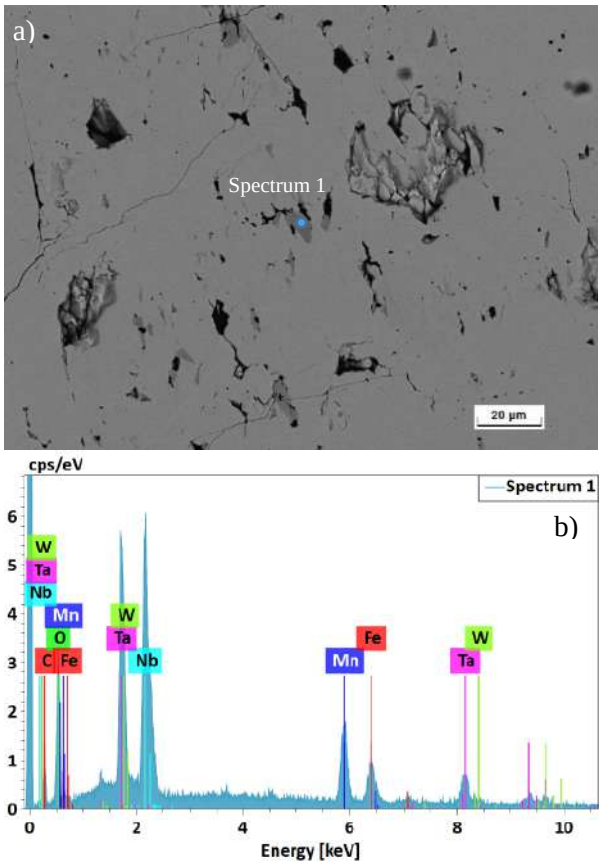


FIGURE 3 *a) BSE image of the inclusions analyzed in a wolframite crystal. Localized spot of the inclusions EDX analysis. b) EDX spectra of a columbite grain (Spectrum 1).*

Spectrum 1

Element	At. No.	Net	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Comp.	Sto. [%]	Sto. Norm. [%]	rel. error [%] (1 σ)
C	6	484	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
O	8	1769	4,96	6,11	27,93		0,00	0,00	2,64
Mn	25	2376	11,12	13,69	18,23	MnO	14,35	17,68	5,83
Fe	26	1160	6,01	7,40	9,70	FeO	7,73	9,52	6,71
Nb	41	7643	31,25	38,49	30,31		31,25	38,49	5,84
Ta	73	1840	23,85	29,37	11,87		23,85	29,37	6,82
W	74	284	4,01	4,94	1,97		4,01	4,94	14,19
		Sum	81,20	100,00	100,00		81,20	100,00	

TABLE I. *EDX semi-quantification of the Spectrum 1 composition, disregarding the C values since they are produced by the carbon coating.*

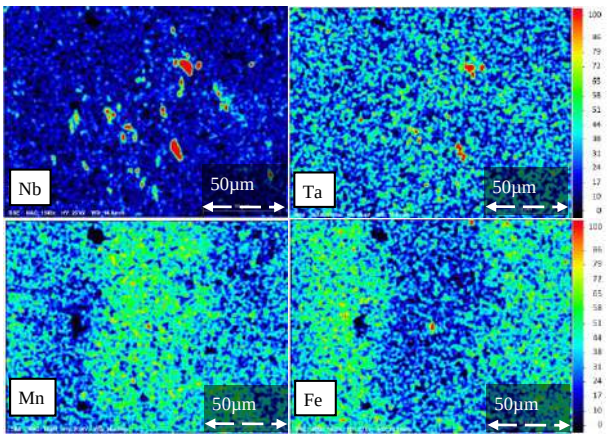


FIGURE 4. *EDX mapping of the same area in Fig. 3. The mapping shows the columbite aligned along with the more hubneritic wolframite.*

WHOLE-ROCK GEOCHEMISTRY

Seven whole-rock geochemical analyses were carried out to study the chemical characteristics of the pluton. Regarding the major element signature, the endogranite has a higher content in SiO_2, MnO, and P_2O_5 (wt%) but lower Al_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, and TiO_2 when compared to the exogranite. Although all the intrusions fall into the peraluminous category, the endogranite has a more pronounced nature (A/CNK=1.86). According to trace element analysis, Santa Comba granitoids have significant enrichment in incompatible elements such as Li (≥140 ppm), Rb (≥400 ppm), Cs (≥27 ppm), U (≥26 ppm), and Th (≥11 ppm); however, they are strongly depleted in Ba and Sr.

Rb and Cs increase with SiO_2 content, while Sr and Ba decrease across all the units. This could be indicative of a pattern consistent with plagioclase fractional crystallization (Clarke, 1992) meaning there is stronger fractionation in the endogranite. However, it could also be remobilization caused by the pervasive hydrothermal alteration observed in the endogranite. The endogranite exhibits half the Zr and Th content compared to the exogranite, while the U content remains relatively constant. These results line up with petrographic observations where the zircons in the endogranite appear to be strongly altered and sometimes partly eroded.

REEs were normalized to chondrite (Sun & McDonough, 1989), and although all the units are similar in terms of their birdwing shape (Fig. 5a) the units can be identified by the variability in their negative Eu anomalies and the overall lower REE values of the endogranite. It isn't uncommon for more differentiated intrusions to have lower REE concentrations. It suggests that REE fractionated at depth in the form of zircon and monazite. Although this REE depletion could also be enhanced by the high-temperature hydrothermal alteration that affects the endogranite.

In this study niobium and tantalum have been used as fractionation criteria. They are regarded as incompatible lithophile elements, and typically, do not undergo fractionation during most geological processes.

There is a noticeable decreasing trend in Nb/Ta values from exogranite to endogranite as shown in Fig. 5b, suggesting fractionation from the exogranite to the endogranite. The endogranite displays the lowest Nb/Ta but the highest Nb and Ta contents. (weighted mean; Nb/Ta: Exogranite = 2.9; Endogranite = 1.8). Conversely, Zr and Hf concentrations both decrease with an increasing degree of fractionation, congruent with the moderately compatible nature of these elements. The Zr/Hf value, similar to the Nb/Ta value, decreases with the degree of fractionation (weighted mean; Zr/Hf: Exogranite = 28; Endogranite = 17).

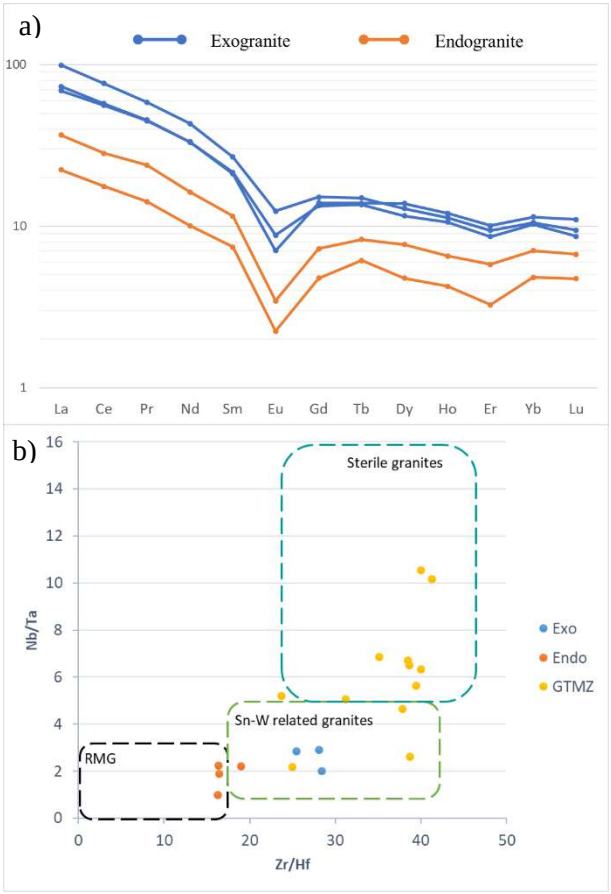


FIGURE 5. *a) Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) REE values of endogranite and exogranite. b) A Nb/Ta versus Zr/Hf diagram after Ballouard et al. (2015) comparing exogranite and endogranite samples with typical geochemical domains of rare-metals related granites (Ta-Cs-Li-Nb-Be-Sn-W), Sn-W-(U) related granites, and barren granites. Exo: exogranite, Endo: endogranite, GTMZ: granitoid data from Gutiérrez-Alonso et al. (2018).*

The chemical characteristics previously mentioned suggest that the Santa Comba granitoids have a common parental magma, that shows various degrees of fractionation from the eldest to the youngest intrusion, ranging from the least fractionated biotite-rich exogranite to the highly fractionated leucocratic endogranite.

Even though W and Sn act more compatible when compared to Ta, their concentration increases with the degree of fractionation and reaches high levels in the endogranite (mean out of 14 samples W = 1200 ppm; mean Sn = 150 ppm). Thus, making the endogranite a profitable W deposit with significant Nb, Ta and Sn enrichment that could add value to the deposit.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was conducted within the EIS (Exploration Information System) project of Horizon Europe (contract 101057357). We would like to thank Professor César Casquet and Lluís Boixet for their support and advice.

REFERENCES

Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., Branquet, Y., Tartèse, R. and Vigneresse, J.L. (2015) ¿Es el fraccionamiento Nb-Ta un marcador de interacción con fluidos en granitos peraluminosos? *15th Biennial SGA Conference, Abstract volume.*

Borrajo, I., Tornos, F., and Boixet, L. (2022): Porphyry-like magmatic-hydrothermal W-(Sn) mineralization: Fontao and Santa Comba deposits (northwestern Spain). *22nd Biennial SGA Conference, Abstract volume.*

Borrajo, I. (2024): *Geochronology and isotope geochemistry of W-Sn deposits in the Iberian Variscan Massif.* PhD thesis, Univ. Complutense de Madrid, 348 p.

Clarke, D.B. (1992): *Granitoid Rocks*. Chapman & Hall, London. 283 p.

Cuenin, O. (1982): Interpretation des lèvres geologiques dans la mine de Santa-Comba Galice Espagne. Disertation in: University of Nancy.

Gutiérrez-Alonso, G., Fernández-Suárez, J., Jeffries T.E., Johnston, S.T., Pastor-Galán D., Murphy, J.B. and Gonzalo, J.C. (2011): Diachronous. post-orogenic magmatism within a developing orocline in Iberia, European Variscides. *Tectonics*: 30:1-17.

Gutiérrez-Alonso, G., Fernández-Suárez, J., López-Carmona, A. and Gärtner, A. (2018): Exhuming a cold case: The early granodiorites of the northwest Iberian Variscan belt—A Visean magmatic flare-up? *Lithosphere*, 10: 194–216.

Martínez-Catalán, J.R. (1990): A non-cylindrical model for the northwest Iberian allochthonous terranes and their equivalents in the Hercynian belt of Western Europe. *Tectonophysics*, 179: 253-272.

Nesen, G. (1979): Les endogranites a stockscheider de Fontao et Santa Comba, Galice Espagne: un nouveau modele de gisement Sn-W en Galice. In: *VI Reunión sobre la geología del NW de la Península Ibérica*.

Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts. Implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London Special Publication*, 42(1): 313-345.

Caracterización mineralógica del skarn de scheelita de Monleón (Salamanca, NO España)

Mineralogical characterisation of the Monleón scheelite skarn (Salamanca, NW Spain)

J. Posado-De Castro[1], S.M. Timón-Sánchez[2] y A. Fernández-Fernández[1]

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Pza. de Los Caídos, s/n, 37008 Salamanca
javierposado@usal.es; aff@usal.es
2 Dpto. de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica. IGME-CSIC. Pza. de la Constitución, 1, 3º, 37001 Salamanca
s.timon@igme.es

Palabras clave: skarn, scheelita, mineralogía, Monleón.

Resumen

En este trabajo se ha realizado un estudio geológico, mineralógico y químico del skarn de Monleón. Está situado en la localidad de Monleón, a unos 50 km al sur de Salamanca, en la Zona Centroibérica (ZCI) del Macizo Ibérico. El depósito, cuyo afloramiento es de dimensiones reducidas, presenta una morfología controlada por fracturas de dirección NO-SE y las conjugadas, que permiten dividirlo el en tres sectores. En el sector este, el exoskarn prograd se desarrolla sobre niveles carbonatados y calcosilicatados y está constituido por hedenbergita (Hd_{82-83}), grosularia (Gr_{68-90}) y scheelita (I). El endoskarn se ha originado sobre un leucogranito de grano fino y está formado por plagioclasa, clinopiroxeno y grosularia (Gr_{63-67}). Las asociaciones minerales que se formaron durante el enfriamiento del sistema son complejas y están constituidas por granate subcálcico, otros silicatos hidratados (anfíbol, minerales el grupo de la epidota, clorita, mica blanca y zeolita), scheelita (II) y sulfuros de Fe y Cu.

El skarn de scheelita de Monleón presenta características mineralógicas y químicas comunes con otros skarns de wolframio de la ZCI, como el skarn cálcico y reducido de scheelita de Los Santos.

Abstract

In this work, a geological, mineralogical and chemical study of the Monleón skarn has been carried out. It is located in the town of Monleón, about 50 km south of Salamanca, in the Central Iberian Zone (ZCI) of the Iberian Massif. The deposit, whose outcrop are small, displays a geometry controlled by NW-SE-trending faults and conjugates faults, which allow divides the skarn deposit in three areas. In the eastern sector, the prograde exoskarn is developed in carbonate and calc-silicate levels and consists of hedenbergite (Hd_{82-83}), grossular (Gr_{68-90}), and scheelite (I). The endoskarn is developed in a fine-grained leucogranite and consists of calcic plagioclase, clinopyroxene and grossular (Gr_{63-67}). The mineral associations formed during the cooling of the system are complex and consist of subcalcic garnet, other hydrated silicates (amphibole, epidote group minerals, chlorite, white mica and zeolite), scheelite (II) and Fe and Cu sulphides.

The Monleón scheelite skarn shows mineralogical and chemical features in common with other tungsten skarns in the ZCI, such as the calcic and reduced scheelite skarn at Los Santos.

Agradecimientos

Al Proyecto de Investigación “Cartografía geológica-minera a escala 1:5.000 del borde N del batolito de Los Santos-Valdelacasa” (LI99). Univ. de Salamanca-Daytal Resources Spain, S.L.

Los depósitos de bauxitas kársticas de la Sierra de Bahoruco, República Dominicana: Una fuente no convencional de REY.

The karst bauxite deposits from the Sierra de Bahoruco, Dominican Republic: a non-conventional REY source.

J.A. Proenza[1], C. Villanova-de-Benavent[1], D. Domínguez-Carretero[1], L. Torró[2], N. Pujol-Solà[3], T. Aiglsperger[4], X. Llovet[5], A. Ramírez[6] y J. Rodríguez[6]

1 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n, 08028, Barcelona, España, japroenza@ub.edu, cvillanovadb@ub.edu, ddominguezcarretero@ub.edu
2 Geological Engineering Program, Faculty of Sciences and Engineering, Pontifical Catholic University of Peru, Lima, Perú, ltorro@pucp.edu.pe
3 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, España, npujolsola@ugr.es
4 Dpto. Civil Engineering and Natural Resources, Division of Geosciences and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Suecia, thomas.aiglsperger@ltu.se
5 Centres Científics i Tecnològics, Universitat de Barcelona, Lluís Solé i Sabarís, 1-3, 08028 Barcelona, España, xavier@ccit.ub.edu
6 Servicio Geológico Nacional, Av. Winston Churchill 75, Edificio J. F. Martínez, Santo Domingo, República Dominicana, aramirez@sgn.gob.do, jrodriguez@sgn.gob.do

Palabras clave: metales críticos, tierras raras, escandio, bauxitas kársticas, República Dominicana.

Resumen

Las bauxitas kársticas de la Sierra de Bahoruco (suroeste de la República Dominicana) están extremadamente enriquecidas en REY (elementos de las tierras raras más ytrio; promedio ∑REY ~1900 ppm). En los depósitos más enriquecidos hay muestras con contenidos totales de REY > 2 % en peso, probablemente las muestras de bauxitas más ricas en REY descritas en nuestro planeta. Los datos preliminares indican que la concentración de REY varía significativamente entre los depósitos. La mayoría de los depósitos estudiados están enriquecidos en LREE. Sin embargo, en algunos depósitos hay un predominio de MREE y HREE. La caracterización mineralógica preliminar revela que las fases portadoras de REY son fosfatos, carbonatos, óxidos, oxihidróxidos de Mn, y minerales del grupo de las arcillas. La mayoría de ellas se interpretan como secundarias. No obstante, se han encontrado granos de monacita(-Ce, La, Nd) que pueden interpretarse como relícticos. Los fosfatos secundarios de REY han sido identificados tentativamente como rabdofana (Y, Y+Nd±Dy), churchita (Y>Gd,Dy, Nd>Sm,Gd) y florencita (Nd>Sm). Los carbonatos de REE se pueden asignar provisionalmente a minerales de la serie polisomática bastnaesita-synchysita (Gd>Nd,Sm, Nd>Sm,Gd), y a calcioancylita(-Gd).

Abstract

The karst bauxites of Sierra de Bahoruco (SW Dominican Republic) are extremely rich in REY (rare earth elements + yttrium; average ∑REY ~1900 ppm). Certain deposits yield REY contents > 2 wt.%, which probably represent the highest concentrations ever recorded in karst bauxite materials in the world. Preliminary data indicates that the REY concentration varies significantly between deposits. Most of the studied deposits are enriched in LREE, whereas other deposits are enriched in MREE and HREE. The initial mineralogical characterisation revealed that the REY-bearing minerals are phosphates, carbonates, oxides, Mn oxyhydroxides, and clay minerals. Most of these minerals are interpreted as secondary, formed during the bauxitisation processes, except for relict monazite (-Ce, La, Nd) grains. Secondary REY phosphate grains were tentatively identified as rhabdophane (Y, Y+Nd±Dy), churchite (Y>Gd,Dy, Nd>Sm,Gd) and florencite (Nd>Sm). REY carbonate grains were provisionally related to the polysomatic series bastnäsite-synchysite (Gd>Nd,Sm, Nd>Sm,Gd), and calcioancylite-(Gd).

El nodo sur de España del Esquema Regional de Innovación del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología en Materias Primas

South Spain Regional Innovation Scheme Innovation Hub of the EIT Raw Materials

M. Regueiro y González-Barros[1]

1 Vicepresidencia de Relaciones Internacionales. C/Del Pinar 25. m.regueiro@csic.es

Palabras clave: nodo sur, esquema regional de innovación, *EIT Raw Materials*, ayudas para proyectos

Resumen

El Instituto Europeo de Innovación y Tecnología en Materias Primas es la comunidad de innovación más grande del mundo en el sector de las materias primas. Tiene como objetivo convertir las materias primas en una de las principales fortalezas de Europa, fomentando la competitividad sostenible del sector europeo de minerales, metales y materiales. Los instrumentos que utiliza son las comunidades de innovación (KIC) que pretende brindar un entorno colaborativo entre empresas, centros de investigación y universidades. El CSIC es miembro de pleno derecho del Centro de Co-ubicación Sur desde 2016 y coordina desde 2021 el Nodo Sur de España cuyo objetivo es ayudar a empresas e instituciones a solicitar las ayudas que ofrece el *EIT RM*. La convocatoria de proyectos KAVA 12 está abierta desde noviembre de 2023. La convocatoria incluye proyectos de Escalado (Presupuesto de < 2M€. Hasta 3 años. Proyectos de innovación basados en tecnologías validadas que necesitan un empujón para llevarlos al mercado), de Educación (< 200.000 €/año. Entre 1 y 3 años. Proyectos orientados a la formación innovadora a través de programas de grado y máster en el ámbito de las materias primas), Fortalecimiento de Capacidades (Entre 1 y 2 años ampliable a 3. Proyectos orientados a reforzar la actividad innovadora en reglones da importancia estratégica (RIS)) e Innovación (< 1 M€. 2 años ampliable a 3. Proyectos de innovación basados en tecnologías validadas que necesitan un empujón para llevarlas al mercado).

Abstract

The European Institute of Innovation and Technology in Raw Materials (EIT Raw Materials) is the world's largest innovation community in the raw materials sector. Its goal is to make raw materials one of Europe's key strengths, fostering sustainable competitiveness in the European sector of minerals, metals, and materials. The instruments it uses are the Knowledge and Innovation Communities (KIC), aiming to provide a collaborative environment among businesses, research centers, and universities. CSIC has been a full member of the Co-Location Center South since 2016 and has been coordinating the Southern Spain Hub since 2021, with the objective of assisting companies and institutions in applying for the grants offered by EIT Raw Materials. The call for projects, KAVA 12, has been open since November 2023. The call includes Upscaling projects (Budget < €2M. Up to 3 years. Innovation projects based on validated technologies needing a push to bring them to market), Education projects (< €200,000/year. Between 1 and 3 years. Projects focused on innovative training through degree and master's programs in the field of raw materials), Capacity Building projects (Between 1 and 2 years, extendable to 3. Projects aimed at reinforcing innovative activity in strategically important regions (RIS)), and Innovation projects (< €1M. 2 years, extendable to 3. Innovation projects based on validated technologies needing a push to bring them to market).

INTERNSHIP. Un nuevo programa de becas del esquema regional de innovación del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología en Materias Primas

INTERNSHIP, a novel internships program of the Regional Innovation Scheme of the EIT Raw Materials

M. Regueiro y González-Barros[1]

1 Vicepresidencia de Relaciones Internacionales. C/Del Pinar 25. m.regueiro@csic.es

Palabras clave: becas, esquema regional de innovación, Instituto Europeo de Innovación y Tecnología en Materias Primas

Resumen

El Instituto Europeo de Innovación y Tecnología en Materias Primas (*EIT Raw Materials*) ha lanzado un programa de becas excepcional para estudiantes de maestría en el ámbito de las materias primas, que permite a empresas e instituciones integrar a los mejores estudiantes europeos. Esto fortalece la cooperación Universidad-Empresa y familiariza a los futuros profesionales con los desafíos de la vida laboral real. El RIS Internship es un programa diseñado para potenciar las habilidades de liderazgo y trabajo en equipo de los mentores de las organizaciones que acogen a los becarios, además de ser una plataforma ágil para conectar a los estudiantes con dichas organizaciones. Este programa de becas está dirigido a los estudiantes más destacados, ofreciendo una cobertura de gastos de hasta 600 €/mes, y becas de 1 a 3 meses con el objetivo de desarrollar competencias y capacidades en un entorno que simula desafíos reales del ámbito profesional. La plataforma del proyecto permite conectar a los estudiantes con una amplia gama de posibles empleadores futuros. Por lo tanto, el objetivo es que las empresas e instituciones seleccionen a sus futuros profesionales entre los participantes. Los estudiantes pueden solicitar estas becas, mientras que las empresas pueden inscribirse gratuitamente en el programa a través del enlace https://www.ris-internship.eu/. La convocatoria está abierta desde enero de 2024.

Abstract

The European Institute of Innovation and Technology in Raw Materials (EIT Raw Materials) has launched an exceptional scholarship program for master's students in the field of raw materials, allowing companies and institutions to integrate the best European students. This strengthens the University-Business cooperation and familiarizes future professionals with the challenges of real work life. The RIS Internship is a program designed to enhance the leadership and teamwork skills of mentors from organizations hosting interns, as well as being an agile platform to connect students with these organizations. This scholarship program is aimed at outstanding students, offering coverage of expenses up to €600/month, and scholarships lasting 1 to 3 months with the aim of developing competencies and capabilities in an environment that simulates challenges in the professional field. The project platform allows students to connect with a wide range of potential future employers. Therefore, the goal is for companies and institutions to select their future professionals from among the participants. Students can apply for these scholarships, while companies can enrol in the program for free through the link https://www.ris-internship.eu/. The call for applications is open from January 2024.

Estudio mineralógico y geoquímico de las fases metálicas acumuladas en una planta de tratamiento pasivo para drenaje ácido de mina.

Mineralogical and geochemical study of the accumulated metallic phases in a passive treatment plant for acid mine drainage.

A. Rodrigo[1], R. León[1], J.M. Nieto[1], F. Macías[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071, Huelva (España).
ainara.rodrigo241@alu.uhu.es rafael.leon@dct.uhu.es jmnieto@uhu.es francisco.macias@dgeo.uhu.es

Palabras clave: Faja Pirítica Ibérica, drenaje ácido de mina, tratamiento pasivo, materias primas críticas, revalorización.

Resumen

La Faja Pirítica Ibérica (FPI) es una de las provincias metalogénicas con mayor volumen de depósitos de sulfuros masivos polimetálicos del mundo. Tras más de 4500 años de actividad minera prácticamente continuada, en la región se han generado grandes volúmenes de desechos en forma de escombreras, cortas o galerías inundadas. En estas estructuras, se produce la exposición de los sulfuros a agentes atmosféricos y su consiguiente disolución oxidativa, en un proceso denominado Drenaje Ácido de Mina (AMD). El tratamiento más viable y efectivo para el AMD en la FPI es el tratamiento pasivo de tipo Sustrato Alcalino Disperso (DAS), del cual un ejemplo de aplicación a escala real es la planta de tratamiento pasivo de Mina Esperanza (Almonaster La Real, Huelva) (Orden *et al*., 2021). En este trabajo, se ha llevado a cabo un estudio preliminar del perfil de precipitación en esta planta, distinguiéndose cuatro frentes principales de precipitación con diferentes fases metálicas asociadas. Mientras algunos elementos presentan un comportamiento geoquímico definido a lo largo de los diferentes frentes de precipitación (p. ej. Cu, V, As), otros como el Y y las REE se distribuyen de forma anómala en profundidad. Se observa además la precipitación de altas concentraciones de Cu (en varios estados de oxidación) junto a REE e Y, en los frentes más ricos en Al (*i.e.* basaluminita). La alta carga metálica estimada retenida en la planta de tratamiento (*i.e.* 4 T de Al, 0.8 T de Cu, 0.6 T de Zn, 35.5 kg de REE, etc.) evidencia la gran efectividad del DAS para retirar del AMD materias primas de interés económico.

Abstract

The Iberian Pyrite Belt (IPB) is one of the metallogenic provinces with higher concentrations of polymetallic massive sulfide deposits in the world. After more than 4,500 years of almost continuous mining, large volumes of mining waste such as dumps, flooded galleries and open pits have originated in the region. In these polluting systems, the exposure of sulfides to atmospheric agents takes place, leading to the oxidation of pyrite in a phenomenon called Acid Mine Drainage (AMD). The remediation system that has proven to be most viable and effective in the IPB is the passive treatment using Dispersed Alkaline Substrate (DAS). A full-scale example of DAS system application is the passive treatment plant of Mina Esperanza (Almonaster La Real, Huelva) (Orden *et al*., 2021). In this work, a preliminary geochemical and mineralogical study of the precipitation profile inside the treatment plant is carried out, where four main precipitation fronts have been distinguished. While Cu, V or As show a variable geochemical behavior in depth, others such as Y and REE are anomalously distributed in relation to these fronts. Associated with the Al-rich fronts (*i.e.* basaluminite), the precipitation of high concentrations of Cu (in various oxidation states) together with REE and Y is observed. The large metallic load retained in the treatment plant (4 T of Al, 0.8 T of Cu, 0.6 T of Zn, 35.5 kg of REE, etc.) is evidence of the high effectiveness of DAS for concentrating raw materials of economic interest.

Referencias

Orden S., Macías, F., Cánovas, C.R., Nieto, J.M., Pérez-López, R. y Ayora, C. (2021). *Journal of Environmental Management*, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111699.

Evaluación del potencial de recuperación de Sb en una presa de residuos mineros del Distrito Minero Linares-La Carolina (Jaén).

Evaluation of the potential for Sb recovery in mining wastes from a tailings dam in the Linares-La Carolina Mine District (Jaén).

V. Rodríguez-Gómez[1], J.A. Arranz-González[1], P. Adánez[1], F. J. Fernández-Naranjo[1] y A. Rosario-Beltré[1]

1 CN Instituto Geológico y Minero de España (CSIC), Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. v.rodriguez@igme.es, jc.arranz@igme.es, p.adanez@igme.es, fj.fernandez@igme.es, ja.rosario@igme.es

Palabras clave: economía circular, materias primas críticas, antimonio, residuos mineros, distrito minero Linares-La Carolina.

Resumen

La presa de lodos de 905 II 1 012, denominada Casa de la Liebre, es el resultado de la acumulación de los residuos del complejo llamado Minas Collado del Lobo, que forma parte del distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén). El distrito fue el principal productor de plomo en el mundo durante el periodo 1880- 1920. En este distrito filoniano, situado en el flanco sur del anticlinorio de Alcudia, la mena que se beneficiaba está constituida fundamentalmente por galena y sulfoantimoniuros de plata. Esta presa de lodos, que presenta un riesgo alto para el medio natural en caso de rotura, contiene cantidades apreciables de materias primas secundarias, incluidas las materias primas críticas. En concreto contiene las concentraciones más elevadas de Sb (6288-10241 ppm), Sc (201 ppm) y W (151 ppm), de entre las instalaciones de residuos mineros analizadas en España por Rosario-Beltré *et al.* (2023). Sobre estos residuos se realizaron análisis por microsonda electrónica que determinaron que el Sb está asociado al As. Además, se realizaron ensayos de lixiviación con agua desionizada durante 24 horas, tomando alícuotas a diferentes tiempos y analizando el contenido de Sb disuelto por ICP-MS. El ensayo demuestra el potencial de lixiviación del Sb y el aumento de la lixiviabilidad con el tiempo, alcanzando los 1784 µg/l a las 24 horas.

Abstract

The mining tailings dam with code 905 II 1 012, called Casa de la Liebre, is the result of the accumulation of mining wastes from the complex called Minas Collado del Lobo, part of the Linares-La Carolina Mining District (Jaén). This mining district was the main lead producer in the world during the period 1880-1920. In this phyllonian district, located on the southern flank of the Alcudia anticlinorium, the ore consisted mainly of galena and silver sulfoantimonides. This tailings dam, which poses currently a high risk to the natural environment in case of failure, contains appreciable quantities of secondary raw materials, including critical raw materials. In particular, it contains the highest concentrations of Sb (6288-10241 ppm), Sc (201 ppm) and W (151 ppm), among the mining waste facilities analysed in Spain by Rosario-Beltré *et al.* (2023). Electron microprobe analyses were performed on waste samples, determining that Sb is associated to As. In addition, leaching tests were carried out with deionised water for 24 hours, taking aliquots at different times and analysing the dissolved Sb content by ICP-MS. The test demonstrated the leaching potential of Sb and the increase of leachability with time, reaching 1784 µg/l at 24 hours.

Referencias

Rosario-Beltré, A.J., Sánchez-España, J., Rodríguez-Gómez, V., Fernández-Naranjo, F. J., Bellido-Martín, E., Adánez-Sanjuán, P. y Arranz-González, J. (2023). *Journal of Cleaner Production* 407, 137163.

Origen y formación de yesos durante el Plioceno en Lepe (Huelva, SO España).

Origin and formation of gypsum during the Pliocene in Lepe (Huelva, SW Spain).

A. Romero-Baena[1,2]; F. Muñiz[1,2]; A. Cosano[1]; P. Campos[1,2]; D. Martín[1,2]; A. Miras[1,2]; M. Martín[3]; Z. Belaústegui[4], J. Rodríguez-Vidal[5] y L.M. Cáceres[5]

1 Dpto. Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química, Universidad de Sevilla. 41012 Sevilla. aromero@us.es, fmuniz@us.es, alejandrocosanosierra@gmail.com, pcampos1@us.es, dmartin5@us.es, amiras@us.es.
2 Museo de Geología de la Universidad de Sevilla, CITIUS, Universidad de Sevilla.
3 Centro de Estudios Universitarios Cardenal Spínola CEU, Bormujos, Sevilla. 41930. monica.martin@ceuandalucia.es
4 Dpto. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. 08024 Barcelona. zbelaustegui@ub.edu
5 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva. 21071 Huelva. jrvidal@dgeo.uhu.es, mcaceres@dgeo.uhu.es

Resumen: En este trabajo se estudia la formación y el contexto paleoambiental de un yacimiento de fósiles marinos yesificados y cristales de yesos de edad Plioceno Superior aparecido en la localidad de Lepe (Huelva). El estudio químico, mineralógico y petrográfico revela que el yacimiento se formó a partir de una salmuera sulfatada de una sebkha costero. Los datos isotópicos demuestran que la sebkha estaba alimentado por aguas ácidas procedentes de la oxidación de sulfuros en la Faja Pirítica Ibérica. La migración vertical de las aguas ácidas ricas en sulfato favoreció la disolución del carbonato de las conchas, y el posterior reemplazamiento por sulfato. Los cristales lenticulares asociados a diaclasas en el interior del sedimento se formaron a partir de conchas fósiles, que favorecieron la nucleación de los cristales de yeso. En la superficie, la intensa evaporación y sucesivos eventos de inundación facilitaron la formación de rosetas, con cristales lenticulares en la base y prismáticos hacia la parte superior.

Palabras clave: yesificación, isótopos de azufre, sebkha, Plioceno, Lepe.

Abstract: *In this work, the formation and paleoenvironmental context of a site of gypsum marine fossils and gypsum crystals of Upper Pliocene age that appeared in the town of Lepe (Huelva) is studied. The chemical, mineralogical and petrographic study reveals that the deposit was formed from a sulphated brine of a coastal sabkha. Isotopic data demonstrate that the sabkha was fed by acidic waters from the oxidation of sulfides in the Iberian Pyritic Belt. The vertical migration of acidic sulfate-rich waters favored the dissolution of carbonate in the shells, and its subsequent replacement by sulfate. The lenticular crystals associated with joints inside the sediment were formed from fossil shells, which favored the nucleation of gypsum crystals. On the surface, intense evaporation and successive flooding events facilitated the formation of rosettes, with lenticular crystals at the base and prismatic towards the top.*

Key words: *gypsification, sulfur isotopes, sabkha, Pliocene, Lepe.*

INTRODUCCIÓN

El estudio de minerales evaporíticos como el yeso ($Ca_2SO_4 \cdot 2H_2O$) se suele utilizar para reconstrucciones paleogeográficas y de condiciones paleoambientales (Warren, 2016). Su formación está ligada a una alta tasa de evaporación de zonas saturadas en sulfato cálcico (salmueras) en ambientes lacustres (continentales) o marinos, bajo climas áridos o semiáridos (Warren, 2016). La producción diagenética de yeso ocurre en depósitos sedimentarios que permite la migración del agua y una adecuada abundancia de Ca, S y O (Bain, 1990).

En este sentido, en la localidad de Lepe (Huelva), se ha descubierto un yacimiento de edad Plioceno Superior con extraordinarios fósiles marinos yesificados, así como cristales de yesos en forma de roseta y lenticulares. El yacimiento está restringido a un área de unos 10 m^2 y un espesor de <1 m, y no presenta una continuidad lateral. En este trabajo se estudia el origen y la formación de estos yesos, con el objeto de aportar información al contexto paleoambiental del área en el que se produjeron.

MARCO GEOLÓGICO

Los materiales estudiados se corresponden con la parte superior del relleno siliciclástico neógeno del sector occidental de la Cuenca del Guadalquivir (Fig. 1A-B) y se localiza en las cercanías de la localidad onubense de Lepe (Fig. 1C). En este área, el Neógeno viene representado por facies siliciclásticas marinas marginales (limos, arenas y gravas) conocidos de manera informal como "Limos Blancos de Lepe" (Belaústegui y Muñiz, 2016) que constan de 9 tramos (Fig. 1D): un intervalo Mioceno Superior (Tramos 1 a 5) y un intervalo Plioceno (Tramos 6 a 9), ambos delimitados por una superficie erosiva, en discordancia sobre grauvacas y lutitas del Carbonífero Inferior y, por encima arenas y conglomerados erosivos del Pleistoceno inferior interpretados como terrazas fluviales. En particular, el

material objeto de estudio pertenece al Tramo 8 de arenas limosas (Fig. 1D).

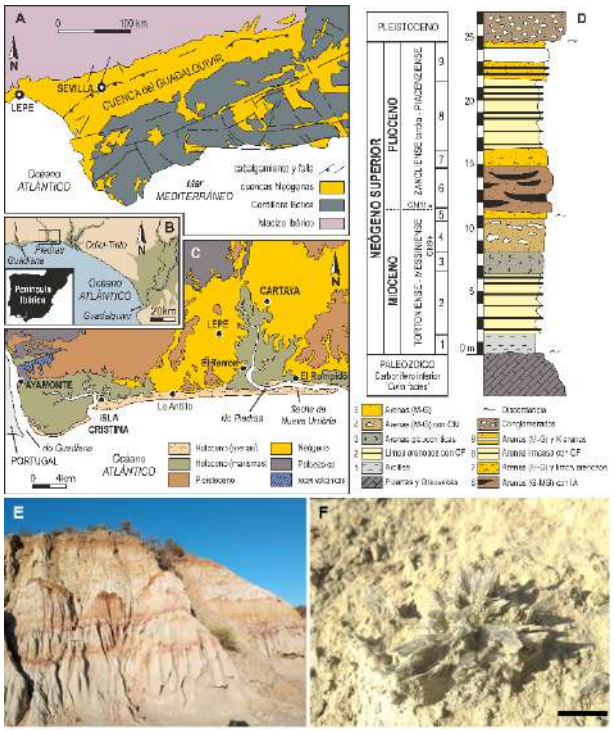


FIGURA 1. *A-C. Situación geográfica y contexto geológico del área estudiada. D. Sección estratigráfica sintética del Neógeno del área de Lepe (ver detalles en Belaústegui y Muñiz, 2016). E. Vista parcial del yacimiento estudiado. F. Vista en planta de cristales de yeso en roseta in situ (escala de la barra 1 cm).*

MATERIALES Y MÉTODOS

El material yesificado estudiado se corresponde con fósiles marinos (bivalvos, gasterópodos, escafópodos, corales, equinodermos equinoideos y huesos de peces), cristales en rosetas centimétricas y cristales lenticulares de tamaño centimétrico-decimétrico asociados a diaclasas subverticales (Fig. 2). Las muestras se tomaron en la parte superior de los limos y arenas limosas del Tramo 8 de la serie litoestratigráfica local. Igualmente, se hizo un seguimiento lateral del nivel con los yesos y se tomaron muestras del sedimento en diferentes puntos.

En cuanto a los métodos empleados, a las muestras se les realizó: (1) determinación de carbonatos con un calcímetro de Bernard, (2) análisis químico de elementos mayoritarios y traza por fluorescencia de rayos-X (FRX), (3) análisis mineralógico por difracción de rayos-X (DRX, método de polvo), (4) análisis isotópico de $\delta_{S\text{-}34}$, (5) análisis granulométrico, y (6) microscopía óptica petrográfica y electrónica de barrido.

RESULTADOS

Sedimento

Según el análisis granulométrico, tanto los sedimentos del nivel con los yesos como de puntos contiguos lateralmente son similares, y se clasifican como limos y limos arenosos. Por otro lado, el contenido en carbonatos fue inferior al 0,5%, estando dentro del error del método, por lo que se considera que no hay presencia de éstos. El análisis mineralógico corrobora estos resultados, ya que no se ha detectado la presencia de calcita ni aragonito. En particular, la mineralogía de las muestras está formada por cuarzo, feldespatos, micas y trazas de clorita (Tabla I), destacando la ausencia de yeso.

Por otro lado, el análisis químico es compatible con la mineralogía propuesta, es decir, el contenido en SO_3 y Ca fue inferior al 0,3%, excepto en la muestra SE1 (SO_3 0,9%; Ca 0,8%). El contenido en elementos traza es del mismo orden que el observado en los sedimentos de estuarios actuales del entorno (Tabla II).

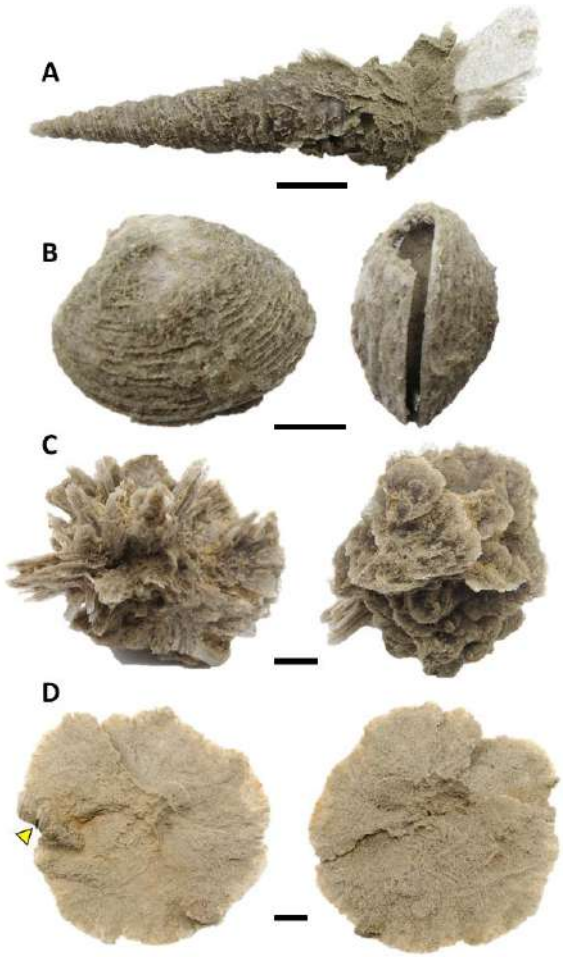


FIGURA 2. *Material yesificado: A. Gasterópodo Turritella sp. B. Bivalvo Chamelea sp. C. Yesos en forma de roseta. D. Yeso lenticular y Turritella sp. (flecha). (Escala de la barra= 1 cm).*

Material yesificado: fósiles, rosetas y cristales

En general, la mineralogía de las muestras yesificadas está formada por yeso, cuarzo, feldespatos, micas y trazas de clorita (Tabla I). Al igual que en el sedimento, el análisis químico es coincidente con la mineralogía propuesta. En las muestras de fósiles y cristales de yeso el contenido en SO_3 está comprendido entre el 25 y 32 % y el Ca entre el 20 y el 27 %, muy superior al presentado en el sedimento. En cuanto a elementos traza (Tabla II), destacan el Cd, por presentar una concentración que duplica, en algunos casos, la observada en los

sedimentos, y el Sr, por presentar valores muy inferiores a los observados en yesos de origen marino (Rossi et al., 2015). Finalmente, los valores isotópicos de δ_{S-34} fueron claramente negativos en todas las muestras (Tabla II).

	Muestra	Gp	Qz	Ab	Ms	Or	Chl
Sedimentos	Se 1	-	63	14	18	5	tr
	Se 2	-	60	16	18	6	tr
	Se 2NE	-	62	15	18	5	tr
	Se 2SW	-	60	16	19	5	tr
Fósiles	Tu 1	40	34	11	11	-	tr
	Tu 2	35	39	13	9	-	tr
	Bi 1	51	30	8	7	-	tr
	Bi 2	32	39	14	13	-	tr
Cristales	ROF	45	32	9	10	-	tr
	ROL	43	33	10	10	-	tr
	YL	45	33	11	8	-	tr

TABLA I. Análisis mineralógico por DRX. Muestras: Se (Sedimento), Tu (Turritella), Bi (Bivalvo), ROF (Roseta Fibrosa), ROL (Roseta Lenticular), YL (Yeso Lenticular). Mineralogía: Cuarzo (Qz), Yeso (Gp), Albita (Ab), Moscovita (Ms), Ortoclasa (Or), Clorita (Chl), tr (traza).

	Muestra	As	Cd	Cu	Pb	Sr	Zn	δ_{S-34} (CDT)
Fósiles	Tu 1	9	2,0	7	9	54	20	-39,2
	Tu 2	9	1,6	5	7	62	20	-37,8
	Bi 1	9	2,2	3	7	69	12	-40,9
	Bi 2	8	0,8	4	6	39	11	-40,3
Cristales	ROF	11	1,8	4	6	91	18	-38,2
	ROL	8	2,2	5	8	99	20	-39,8
	YL	9	1,9	4	10	85	19	-37,6
Sedimentos	Se 1	13	1,0	7	14	66	45	-39,8
	Se 2	15	0,8	8	13	72	42	-
	Se 2NE	15	1,3	7	12	74	41	-
	Se 2SW	14	0,9	9	10	77	37	-
E. Piedras[1]		-	-	16	14	-	6	-
E. Guadiana[2]		16	0,1	28	19	123	75	-
E. Huelva[3]		30	0,5	22	24	-	104	-

TABLA II. Contenido en elementos traza (mg/kg) en comparación con sedimentos de los estuarios (E.) de los ríos Piedras (Lepe), Guadiana (Ayamonte) y Tinto y Odiel (Huelva) y datos isotópicos de S (‰). ([1]Lario et al., 2016; [2]Caliani et al., 1997; [3]Delgado et al., 2010).

Por otra parte, en el estudio petrográfico de láminas delgadas de fósiles de *Turritella* y *Chamelea* (Fig. 3) se observó que los cristales de yeso se disponen paralelos a la superficie de la concha (Fig. 3A-C), con un contacto bastante neto con el relleno sedimentario. En ocasiones, también se observaron rellenando fracturas (Fig. 3C), o en disposición radial desde la concha hacia el interior del fósil (Fig. 3D). Estas observaciones indican que los cristales de yeso crecieron por reemplazamiento del carbonato cálcico de la concha y, desde aquí, continuaron creciendo hacia el interior del fósil rellenando pequeñas grietas o huecos (Fig. 3D) del relleno sedimentario. La ausencia de yeso en el relleno siliciclástico se explica por la falta de núcleos efectivos para su cristalización.

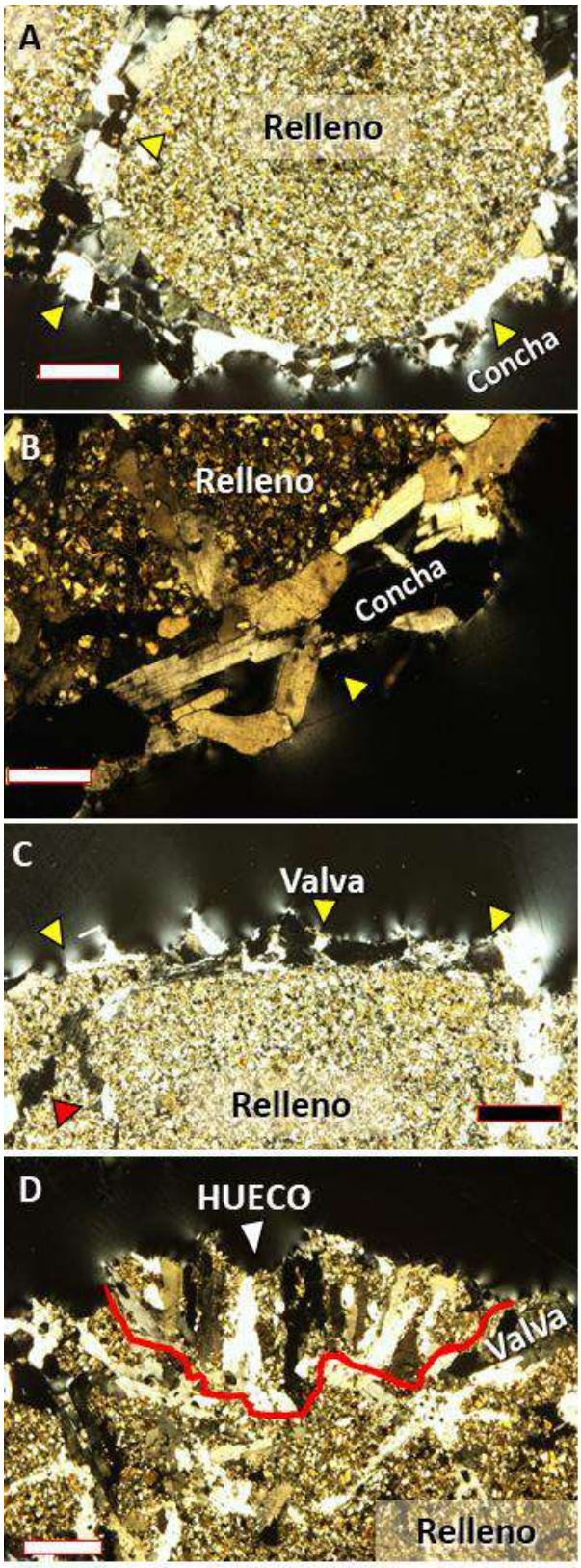


FIGURA 3. *Fotomicrografías. A: Concha de una Turritella (flechas amarillas) y relleno de una vuelta. B: Detalle de los cristales de yeso paralelos a la superficie de la concha (flecha amarilla) de Turritella sp. C: Cristales de yeso dispuestos en paralelo a la superficie de una valva de Chamelea (flechas amarillas) y rellenando fracturas (flecha roja). D: Cristales de yeso radiales rellenado un hueco desde la cara externa de la concha. A, C y D (escala 1000 µm); B (escala 500 µm).*

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La producción de salmueras en zonas supramareales costeras depende de factores fisiográficos y climáticos favorables (clima semiárido-árido) (Warren, 2016). Los requisitos fisiográficos son comunes a pequeña escala en forma de lagunas, charcas y superficies supramareales expuestas. En términos generales, se conocen bajo el nombre de sebkha o sebja, definidas como una marisma marina marginal o llanura arenosa litoral y supramareal en ambientes áridos, donde se forman minerales evaporíticos (yeso, anhidrita, halita, etc.) desplazables y reemplazantes en la zona capilar y sobre un nivel freático salino, ya sea dentro del sedimento o en la superficie, en combinación con arcillas, limos y arenas (Warren, 2016). Los minerales evaporíticos están restringidos en gran medida a los niveles superiores, pero el proceso diagenético puede extenderse en profundidad por filtración de la salmuera a través de los sedimentos.

A partir de los análisis y observaciones realizadas se constata que la yesificación de los fósiles y cristales de yeso se produjo a partir de la salmuera de una sebkha, alimentado por aguas sulfatadas continentales. En efecto, los valores obtenidos de $\delta_{S\text{-}34}$ (Tabla II) comprendidos entre -37 y -41‰, están muy lejos de la signatura típica del sulfato marino (+20‰, Paytan et al., 1998) y son indicativos, por tanto, de un origen continental del S. Además, estos valores son congruentes con los reportados por Velasco-Acebes et al. (2019) para sulfuros de la Faja Pirítica Ibérica (FPI) (-42 hasta +4‰). Por tanto, la yesificación se produjo, probablemente, a partir de aguas ácidas procedentes de la oxidación de sulfuros de yacimientos de la FPI, que quedaron expuestos en la superficie durante el Plioceno tras un levantamiento epirogénico del Ándevalo de la provincia de Huelva tras la orogenia Alpina.

Por otro lado, los altos valores de Cd observados en las muestras de yeso (por sustitución de Ca por Cd en la estructura del yeso), podrían estar relacionados con salmueras originales ricas en Cd alimentadas por aguas ácidas. El origen continental de las aguas queda reforzado, además, por el contenido en Sr en las muestras de yeso (<100 mg/kg, Tabla II), anormalmente bajo en comparación con otras evaporitas formadas por desecación de aguas marinas (hasta 1500 mg/kg, Rossi et al., 2015).

Desde el punto de vista paleoambiental, el área estudiada en Lepe se correspondería, por tanto, con una sebkha costero supralitoral, de pequeñas dimensiones (10 m^2), en un contexto de lagoon y bajo condiciones climáticas áridas o semiáridas durante el Plioceno Superior. Esta pequeña charca se inundaba eventualmente por las crecidas del sistema fluvial de los ríos actuales del entorno Piedras-Guadiana, que aportarían aguas ácidas y ricas en sulfato procedentes de la FPI. En la sección estudiada, los eventos de sucesivas exposiciones facilitaron la formación de rosetas, con cristales lenticulares en la base y prismáticos hacia la parte superior, donde la evaporación era más intensa (Warren, 2016). La infiltración vertical de las aguas ácidas provocó la disolución del carbonato de las conchas marinas y el alto contenido en sulfato favoreció el reemplazamiento del mismo, produciéndose así la yesificación. En las diaclasas, la presencia de conchas favoreció la nucleación de cristales de yeso, que crecieron para formar los cristales lenticulares. En el seno de los sedimentos, la ausencia de cristales de yeso puede ser debida a la falta de huecos para su formación y, sobre todo, a la ausencia elementos que favorecieran su nucleación y cristalización.

REFERENCIAS

Bain, R.J. (1990): Diagenetic, nonevaporative origin for gypsum. *Geology*, 18: 447-450.

Belaústegui, Z. y Muñiz, F. (2016): Ichnology of the Lepe area (Huelva, SW Spain): trace fossils at the Pliocene 'Arroyo Valleforero' section and modern traces at the Piedras Estuary. *Comunicações Geológicas*, 103: 131-142.

Caliani, J. F., Muñoz, F. R. y Galán, E. (1997): Clay mineral and heavy metal distributions in the lower estuary of Huelva and adjacent Atlantic shelf, SW Spain. *Science of the Total Environment*, 198: 181-200.

Delgado, J., Boski, T., Nieto, J. M., Pereira, L., Moura, D., Gomes, A., ... y García-Tenorio, R. (2012): Sea-level rise and anthropogenic activities recorded in the late Pleistocene/Holocene sedimentary infill of the Guadiana Estuary (SW Iberia). *Quaternary Science Reviews*, *33*: 121-141.

Lario, J., Alonso-Azcárate, J., Spencer, C., Zazo, C., Goy, J. L., Cabero, A., ... y García-Rodriguez, M. (2016): Evolution of the pollution in the Piedras River Natural Site (Gulf of Cadiz, southern Spain) during the Holocene. *Environmental Earth Sciences*, 75: 1-15.

Paytan, A., Kastner, M., Campbell, D., y Thiemens, M.H. (1998): Sulfur isotopic composition of Cenozoic Seawater Sulfate. *Science*, 282: 1459-1462.

Rossi, C., Vilas, L., y Arias, C. (2015): The Messinian marine to nonmarine gypsums of Jumilla (Northern Betic Cordillera, SE Spain): Isotopic and Sr concentration constraints on the origin of parent brines. *Sedimentary Geology*, 328: 96-114.

Velasco-Acebes, J., Tornos, F., Kidane, A., Wiedenbeck, M., Velasco, F., y Delgado, A. (2019): Isotope geochemistry tracks the maturation of submarine massive sulfide mounds (Iberian Pyrite Belt). *Mineralium Deposita*, 54: 913–934

Warren, J.K. (2016): *Evaporites: A geological compendium.* Springer, Springer International Publishing, Berlin, 1813 p.

Monitoreo y evaluación de la contaminación por drenaje ácido de mina: el futuro de la presa de Alcolea (Huelva)

Monitoring and assessment of acid mine drainage pollution: the future of the Alcolea reservoir (Huelva)

J. Romero-Matos[1], C. R. Cánovas[1], F. Macías[1], L. Sánchez-López[1], R. León[1], R. Millán-Becerro[1], J. M. Nieto[1], R. Pérez-López[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y Centro de Investigación en Recursos Naturales Salud y Medioambiente (RENSMA), Universidad de Huelva, Campus "El Carmen", 21071, Huelva, España. Jonatan.romero@dct.uhu.es

Palabras clave: cuenca del río Odiel, recursos hídricos, hidrogeoquímica, restauración, calidad del agua.

Resumen

Ante la gran sequía hidrológica que azota tanto al desarrollo económico-social como a la calidad de los ecosistemas, en la provincia de Huelva se plantea retomar la construcción de la presa de Alcolea en la cuenca del río Odiel para aprovechar sus aguas. No obstante, son varios los estudios que ponen en duda la calidad del agua que sería embalsada, dada la grave afección por drenaje ácido de mina (AMD) de la red fluvial del Odiel (Romero-Matos *et al.*, 2023). Este trabajo se enmarca en un proyecto cuyo objetivo es establecer recomendaciones técnicas para la restauración de la cuenca del Odiel en base a evidencias científicas actualizadas. Se ha caracterizado el grado de afección y la carga contaminante que transportan los cursos fluviales de la cuenca. En condiciones de caudal medio, el río Odiel en Alcolea presenta una elevada acidez (0,5 g/L eq. de $CaCO_3$) y transporta una gran cantidad de metales (12 t/día). Posteriormente, se realizó un modelo hidrogeoquímico que permite simular actuaciones de remediación en la cuenca y predecir cómo afectaría a la calidad del agua. Los resultados demuestran una mejoría significativa para una reducción del 100% de los principales focos contaminantes (minas de Riotinto, Tharsis y San Telmo). Actualmente, se está monitorizando la evolución de la calidad de agua que se embalsaría en Alcolea durante un año hidrológico completo, para obtener estimaciones más exactas de las condiciones si no se tomara ninguna medida de restauración.

Abstract

Given the severe drought that affects both socio-economic development and the quality of the ecosystems, in the Huelva province the construction of the Alcolea Dam at the Odiel River catchment is being considered for the use of its waters. However, there are several studies that question the quality of the water to be dammed, given the acid mine drainage (AMD) pollution of the Odiel river network (Romero-Matos *et al*., 2023). This work gathers the results of a research aimed at establishing technical recommendations for the restoration of the Odiel catchment based on updated scientific evidence. The grade of affection and the pollutant load transported by the watercourses have been characterized. Under average flow conditions, the Odiel River has a high acidity (0.5 g/L eq. of CaCO3) and transports large amounts of metals (12 ton/day) at the dam site. Subsequently, a hydrogeochemical model was developed that allows simulating remediation actions in the sources and predicts their impact on water quality. The results show a very significant improvement for a 100% reduction of the main pollutant sources (Riotinto, Tharsis and San Telmo mines). Currently, high-temporal resolution sampling is being carried out to evaluate the evolution of the water quality that would be retained in Alcolea during a full hydrological year, making more accurate estimates if no restoration measures were taken.

Referencias

Romero-Matos, J., Cánovas, C.R., Macías, F., Pérez-López, R., León, R., Millán-Becerro, R. y Nieto, J.M. (2023). *Water Research, 233*, 119791. https://doi.org/mfcf

Caracterización de las mineralizaciones de Sn, Nb y Ta en la mina de Golpejas, Salamanca: del yacimiento primario a los residuos mineros.

Characterization of the Sn-Nb-Ta mineralizations in the Golpejas mine, Salamanca: from the primary deposit to the mining waste.

A. San Cipriano-Mata[1], T. Llorens-González[2], A. Fernández-Fernández[1], S.M. Timón-Sánchez[2], A. Díez-Montes[2], F.J. López-Moro[2] y T. Sánchez-García[3]

1 Dpto. de Geología, Universidad de Salamanca. Pza. de Los Caídos, s/n, 37008, Salamanca. asancipriano@usal.es; aff@usal.es.
2 IGME-CSIC, Plaza de la Constitución, 1, 37001, Salamanca. t.llorens@igme.es; s.timon@igme.es; al.diez@igme.es; fj.lopez@igme.es
3 IGME-CSIC, Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid. t.sanchez@igme.es

Palabras clave: casiterita, minerales del grupo de la columbita, mina Golpejas, materias primas críticas.

Resumen

El yacimiento de Sn (Nb, Ta) de Golpejas (Salamanca) se localiza en el sector oeste de la Zona Centro Ibérica, formando parte del cinturón de Sn-W del Macizo Ibérico. Fue explotado durante la segunda mitad del siglo XX para extraer Sn, Nb y Ta, acumulando los residuos mineros en balsas y escombreras que fueron abandonados tras su cierre. En este trabajo se realiza una caracterización granulométrica y química-mineralógica de la mineralización de Sn-Nb-Ta en el yacimiento primario, que consiste en varios cuerpos laminares de leucogranito albítico y en venas de cuarzo que atraviesan tanto las láminas graníticas como la roca metamórfica encajante. La mineralización estudiada se encuentra diseminada en el leucogranito en forma de casiterita y minerales del grupo de la columbita (MGC), que se asocian preferentemente a mica blanca. La casiterita puede alcanzar varios mm y contiene hasta 11,72 % en peso de Ta_2O_5, mientras que los MGC presentan tamaños inferiores a 300 µm y composiciones variables entre columbita-Fe y tantalita-Mn. De acuerdo al estudio preliminar de los minerales de Sn, Ta y Nb contenidos en las balsas de residuos mineros, se concluye que estos presentan granulometrías inferiores y patrones químico-mineralógicos muy similares a los observados en el yacimiento primario.

Abstract

The Sn (Nb, Ta) Golpejas deposit (Salamanca) is located in the western sector of the Central Iberian Zone, as part of the Sn-W belt of the Iberian Massif. It was mined during the second half of the 20th century to obtain Sn, Nb and Ta, being the mining waste accumulated in ponds and waste dumps that were abandoned after its closure. In this work, a granulometric and chemical-mineralogical characterization of the Sn-Nb-Ta mineralization of the primary deposit is carried out, which comprises several albite leucogranite laminar bodies and quartz veins cross-cutting both the granitic sheets and the metamorphic host rock. The studied mineralization occurs disseminated in the leucogranite and consists of cassiterite and columbite group minerals (CGM), which are preferentially associated with white mica. The cassiterite crystals can reach several mm in size and contain up to 11.72 wt.% Ta_2O_5, while CGM grains are less than 300 µm in size and show variable compositions between columbite-Fe and tantalite-Mn. According to the preliminary study of the Sn, Ta and Nb minerals contained in the mining waste ponds, it is concluded that those minerals show lower grain size and very similar chemical-mineralogical patterns than those observed in the primary deposit.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a los proyectos (i) TED2021-130109A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por la "Unión Europea NextGenerationEU/PRTR"; (ii) FRAME (proyecto GeoERA, GA Nº 731166); (iii) MINCE (000X-730), financiado por MITERD.

Evolución hidroquímica en el estuario del río Tinto (Huelva, SO España) durante un evento de precipitación.

Hydrochemical evolution in the Tinto River estuary (Huelva, SW Spain) during a rain event.

L. Sánchez-López[1], J. Romero-Matos[1], R. León[1], R. Huertas[1], J. L. Guerrero[1], F. Macías[1], C. R. Cánovas[1] y R. Pérez-López[1].

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y Centro de Investigación en Recursos Naturales, Salud y Medioambiente (RENSMA), Universidad de Huelva, Campus "El Carmen", 21071 Huelva, España. laura.sanchez@dct.uhu.es, jonatan.romero@dct.uhu.es, rafael.leon@dct.uhu.es, raul.huertas@dct.uhu.es, joseluis.guerrero@dfa.uhu.es, francisco.macias@dct.uhu.es, carlos.ruiz@dgeo.uhu.es, rafael.perez@dgeo.uhu.es.

Palabras clave: drenaje ácido de mina, lluvias torrenciales, estuario, contaminación, sales solubles.

Resumen

El Río Tinto está severamente afectado por drenaje ácido de mina. Este estudio examina el efecto de las primeras precipitaciones después del verano en la carga contaminante que recibe el estuario del Tinto. Durante tres días, se tomaron un total de 72 muestras mediante un automuestreador en el dominio fluvial del estuario. En condiciones normales, el pH oscila desde valores fluviales a valores marinos (≈2,5-8,0). Sin embargo, el evento extremo de precipitación causó una gran descarga fluvial que mantuvo los valores de pH muy bajos (2,6-3,0). Las concentraciones de Fe disuelto fueron dos órdenes de magnitud superiores a los valores medios anuales, registrando 156 mg/L al comienzo y disminuyendo a 15 mg/L al final. Se observó un aumento del material particulado ($\bar{x}$ 157-314 mg/L) coincidiendo con una disminución de Fe(III) en solución, probablemente asociado a la precipitación de oxi-hidróxidos de Fe en el estuario. La precipitación del Fe tamponó el pH en los valores ácidos observados, anulando la influencia mareal, la cual sólo fue registrada a partir de los valores de conductividad eléctrica (de 2,8-37 mS/cm). Este evento probablemente registró la pluma de contaminación asociada al intenso lavado de sales evaporíticas precipitadas durante el verano en la cuenca del Río Tinto. Durante este tipo de eventos, enormes cantidades de acidez y metales alcanzan el Océano Atlántico (Cánovas *et al*., 2010).

Abstract

The Tinto River is heavily impacted by acid mine drainage. This study examines the effect of the first rainfall after summer on the pollution load received by the Tinto estuary. Over three days, 72 samples were collected using an autosampler in the fluvial domain of the estuary. Under normal conditions, the pH ranges from riverine values to near seawater values (≈2.5-8.0). However, the extreme rain event caused a large fluvial discharge that kept the pH values very low (2.6-3.0). Dissolved Fe concentrations were two orders of magnitude higher than the annual mean values, reaching up to 156 mg/L at the beginning and decreasing to 15 mg/L at the end. An increase in particulate matter ($\bar{x}$ 157-314 mg/L) was observed, coinciding with a decrease in dissolved Fe(III), probably due to the precipitation of Fe oxy-hydroxides in the estuary. The Fe precipitation buffered the pH to the observed acidic values, hindering the tidal influence, which was only recorded by the electrical conductivity values (2.8-37 mS/cm). This event probably recorded the pollution plume associated with the intense washout of evaporite salts precipitated during the summer in the Tinto River basin. During such events, large amounts of acidity and metals reach the Atlantic Ocean (Cánovas *et al*., 2010).

Referencias

Cánovas, C.R., Olías, M., Nieto, J.M. y Galván, L. (2010). *Applied Geochemistry*, doi: 10.1016/j.apgeochem.2009.11.014

Spectral signature (VNIR-SWIR) of the outcropping rocks of the Sierra del Aramo, Asturias. A preliminar study.

Firma espectral (VNIR-SWIR) de los materiales aflorantes de la Sierra del Aramo, Asturias. Un estudio preliminar.

A. Santamaría-López[1], J. Morales[1], J.D. Ramírez[1], M. Suárez[1]

1 Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced S/N. Salamanca, 37008 España. a.santamaria@usal.es; juan.morales@usal.es; jramfra@usal.es; msuarez@usal.es

Abstract: Cu mining in the Sierra del Aramo is the oldest and well known in Asturias, with mining operations carried out intermittently from prehistoric times until the end of the 20th century, turning the area into an archaeological site of great interest. This deposit, like all of the same type in Asturias, is located in the dolomitized carboniferous limestones of the Barcaliente Formation. It is an epithermal deposit, with sulfides, sulfosalts, arsenates, silicates, oxides and native elements as the main mineralization, with important contents in Cu, but also in a critical element such as Co. In this work, 61 samples were studied by means of X-ray diffraction (XRD) and reflectance spectroscopy in the visible, near-infrared and short-wave infrared (VNIR-SWIR) with the aim of determining the spectral signatures of the outcropping rocks on the so-called Plateau of Sierra del Aramo surface, for their subsequent use in the interpretation of the corresponding remote sensing images. The mineralogical study allowed the identification of nine mineral assignments, eight of which are identifiable by VNIR-SWIR spectroscopy, determining their corresponding spectral signatures after classification and averaging of their corresponding reflectance spectra.

Key words: VNIR-SWIR spectroscopy, spectral signature, mineral identification.

Resumen: *La minería de Cu en la Sierra del Aramo es la más antigua y conocida de Asturias realizándose operaciones mineras intermitentemente desde tiempos prehistóricos hasta finales del siglo XX, convirtiendo la zona, además, en un yacimiento arqueológico de gran interés. Este yacimiento, como todos los de este tipo en Asturias, se encuentra en las calizas carboníferas dolomitizadas de la Fm. Barcaliente. Se trata de un depósito epitermal, con sulfuros, sulfosales, arseniatos, silicatos, óxidos y elementos nativos como mineralización principal e importantes contenidos no sólo en Cu sino en un elemento crítico tan importante como el Co. En este trabajo, se estudiaron 61 muestras por medio de difracción de rayos-X (XRD) y espectroscopía de reflectancia en el rango de longitudes de onda del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR, según sus siglas en inglés) con el objetivo de determinar las firmas espectrales de las rocas aflorantes en la superficie de la plataforma superior de la Sierra del Aramo para su posterior utilización en la interpretación de las correspondientes imágenes de teledetección. El estudio mineralógico permitió identificar nueve asociaciones minerales, de las que ocho son identificables mediante espectroscopía VNIR-SWIR, determinado sus correspondientes firmas espectrales tras la clasificación y promedio de sus correspondientes espectros de reflectancia.*

Palabras clave: *espectroscopía VNIR-SWIR, firma espectral, identificación mineral.*

INTRODUCTION

Mining in the Sierra del Aramo is the oldest and most relevant in terms of Cu and Co content in Asturias. The mining operations carried out date back to prehistoric times, turning the area into an archaeological site of great interest (Blas Cortina, 2014). In the original extraction procedure, fire was used to heat the rock, followed by cooling with water, for making it brittle to enable breaking it down. The Texeo mine, for instance, has had intermittent working periods with an average copper grade of 12%, between 1-3% in the case of cobalt and between 1-3% for nickel (Álvarez et al., 2018). This site, like all those of this type in Asturias, is related to carboniferous limestones and dolomites, often karstified. Specifically, the ore- containing limestone here is the one corresponding to Barcaliente Formation, which is part of the so-called Caliza de Montaña Formation.

Generally, it is a very dark limestone with great odor due to the abundant fine-grained organic matter. It is a mudstone with little fauna and low intrinsic porosity, but quite karstified. Both, the bottom and the top show stratification in thin layers, being massive in the central part. In the Aramo site, Caliza de Montaña shows a thickness up to 400 m. The mineralogy in the Aramo deposit, classified as an epithermal deposit, corresponds fundamentally to carbonates, sulfides, sulfosalts, arsenates, silicates, oxides and native elements (Álvarez et al., 2018).

The weathering of the primary sulfides and the waste that have been dispersed in the different stages of exploitation have resulted in the formation of secondary minerals (such as goethite, hematite, malachite, azurite and others) in a good part of the southern area of the Sierra del Aramo, causing the release of elements such as Cu or As to soils, waters or streams (Alonso Sánchez, 2020; Loredo et al., 2008).

This preliminary work is part of a European Project "*Secure and Sustainable Supply of Raw Materials for EU Industry*" (S34I, (DOI: 10.3030/101091616) which main aim is the use of Earth Observation data to improve raw materials exploration. Here we show the preliminary results of the determination of the spectral signatures of the outcropped rocks in the Sierra del Aramo to further study the potential concentration of different elements of interest throughout Remote Sensing.

METHODS

Samples were collected by Aurum Exploration Ltd Company, one of the partners of the EU project, who conducted powder preparation and chemical analysis. In total, 61 samples were studied by means of X-ray diffraction (XRD) and Visible, Near Infrared-Short Wave Infrared spectroscopy (VNIR-SWIR). The same powdered samples were used for both analyses. Mineral characterization was carried out by using a Bruker diffractometer D8 Advance ECO, with LYNXEYE SSD160 high resolution detector and Cu Kα radiation, operating at 0.05º 2-theta/s. Semi-quantification was performed by using the Diffract EVA version 4.2 software, which performs the calculation based on the pattern's relative heights and the ratio between the intensities of the strongest line of the compound of interest and the strongest line of corundum (I/I_{cor}), both measured from a scan made of a 50-50 mixture. VNIR-SWIR spectra were acquired using an ASD FieldSpec® 4 Hi-Res, in the 350-2500 nm spectral range. The spectral resolution was 3 nm in the 350–1000 nm range and 8 nm in the 1000–2500 nm range. The spectra were obtained by averaging 25 spectral readings from each sample. Samples were prepared in a metallic sample holder and measured in the laboratory using the contact probe of the instrument protected with a glass without response. For obtaining the spectral signatures, the infrared part of the spectra was considered. The spectral signature for each different identified mineralogical association were developed after obtaining the averaged spectra of all samples corresponding at the same association (which display, as logical, similar individual spectra).

RESULTS AND DISCUSSION

The initial classification of the samples was carried out based on the mineral identification, determined by the analysis of the XRD patterns. This allowed grouping of the samples based on their identified and semi-quantified constituents. A total of 9 groups were identified (Table I). Six of them correspond to carbonate-rich samples. Another 2 groups contain quartz-rich samples. The last group consists mainly of gibbsite mineral. All the spectra were analyzed according to this mineralogical classification and the same grouping could be done in the NIR-SWIR region of the spectra, except for the two groups composed by different proportions of calcite and dolomite, in which it is not possible to identify majority dolomite.

The characteristic absorption bands, their position, intensity, and the general global reflectance of the representative averaged spectra, result from their mineral content (e.g. Gupta, 2003). Therefore, in groups with similar major minerals, the presence of different accessory minerals can result in the appearance of prominent absorption bands or features which are very useful for differentiating between them. The group G1 includes samples containing majority calcite, and in some cases almost exclusively calcite, so the characteristic absorption bands of this mineral are observable in their VNIR-SWIR spectra, i.e. a major absorption feature at 2338 nm and two bands of lower intensity at 1876 nm and 1995 nm (Cloutis et al., 2010) (Fig. 1b). Accessory mineral in this group is dolomite in most cases, but very small amounts of quartz or clay minerals can also be found. However, dolomite proportion is low and insufficient to display the typical dolomite absorption band at 2320 nm. In group G2, samples containing mostly dolomite were included. Its average spectrum shows the absorption band at 2320 nm, a shoulder at 2270 nm, and a broad absorption band at 1950 nm, fitting well with the pure dolomite VNIR-SWIR spectrum (Kokaly et al., 2017). Samples of the groups G3 and G4 contain calcite and dolomite. The characteristic absorption feature of dolomite does not appear clearly differentiated from that of calcite in spectra from these two groups. On the contrary, a single feature is observed centered at ~2332 nm. Probably, the spectral signature of calcite is dominant and the observed feature is the result of the combination of both mineral bands in this region. This shifting from the pure calcite and dolomite spectra is the only feature allowing the differentiation of these groups from previous G1 and G2. However, as the spectral signatures of G3 and G4 are mostly identical, only one common averaged curve is displayed in Figs. 1 and 2 (labeled as G3-G4).

Group	Minerals
G1	>90% Calcite
G2	>90 % Dolomite
G3	Calcite > Dolomite
G4	Dolomite > Calcite
G5	Calcite > clay minerals
G6	Calcite > malachite
G7	Quartz
G8	Quartz > clay minerals
G9	>90% Gibbsite

TABLE I. *Groups of samples defined from the mineralogical compositions determined by XRD.*

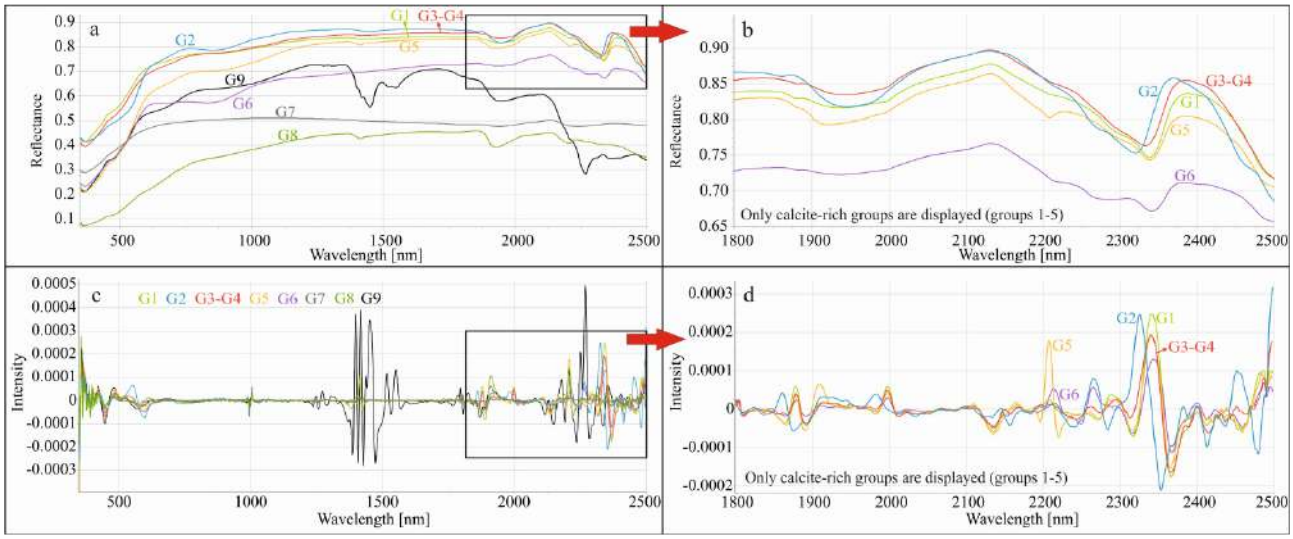


FIGURE 1. Spectral signatures of mineralogical groups defined in the study: VNIR-SWIR spectra (a); calcite-rich clusters with spectra between 1800 nm and 2500 nm (b); second derivatives of VNIR-SWIR spectra (c); second derivatives of calcite-rich groups between 1800 nm and 2500 nm (d).

In group G5, the presence of clay minerals causes the occurrence of two bands at ~1400 nm and ~1900 nm, typical of this group of minerals and related to the presence of OH^- in their structure. The absorption feature at 1900 nm attenuates the presence of the minor bands of calcite at 1876 nm and 1995 nm, which appear as shoulders. As the characteristic bands of dioctahedral clay minerals at 1413 nm and 2208 nm can be recognized with relative ease, these constitute good differentiating indicators of this group. The typical spectrum of pure malachite shows absorption bands at 800 nm, 2272 nm and 2400 nm, and a shoulder at 2215 nm (Kokaly et al., 2017). These features are observable in the G6 spectrum even for small amounts of malachite (despite the 2272 nm absorption band occurs as a shoulder and the 2400 nm highly decreases its intensity). Furthermore, in this group the calcite band is shifted to higher wavelengths (up to 4 nm). This is reasonable, since the malachite band at 2400 nm may be contributing to this shifting. It is worth mentioning that global reflectance of the spectral signature of this group is considerably lower than that of the group G1. This phenomenon is related to the lower reflectance of other phases than calcite. In concrete, pure malachite phase spectrum shows a much lower global reflectance than pure calcite spectrum (Kokaly et al., 2017). In group G7 the spectrum is relatively flat, most probably due to the absence of absorption features in the quartz spectrum in this wavelength region. Additionally, the global reflectance is considerably lower than groups with carbonate minerals (Hunt, 1977). Even though XRD semi-quantification analyses point towards minor content of clay minerals in group G8, bands at 1413 nm, 1925 nm and 2208 nm, corresponding to dioctahedral clay minerals (e.g. Bishop et al., 2008) allow differentiating it from the group G7. The presence of these bands will be determinant to know which types of clay minerals are present. The averaged spectrum of group G9 is similar to that of pure gibbsite (Kokaly et al., 2017).

In addition of these characteristic spectral features, in some of these groups the presence of iron-oxides can be identified by the wide absorption bands in the visible region (Fig. 1a-b), centered at ~480 nm in the case of hematite and 900 nm for goethite (Báscones et al., 2022).

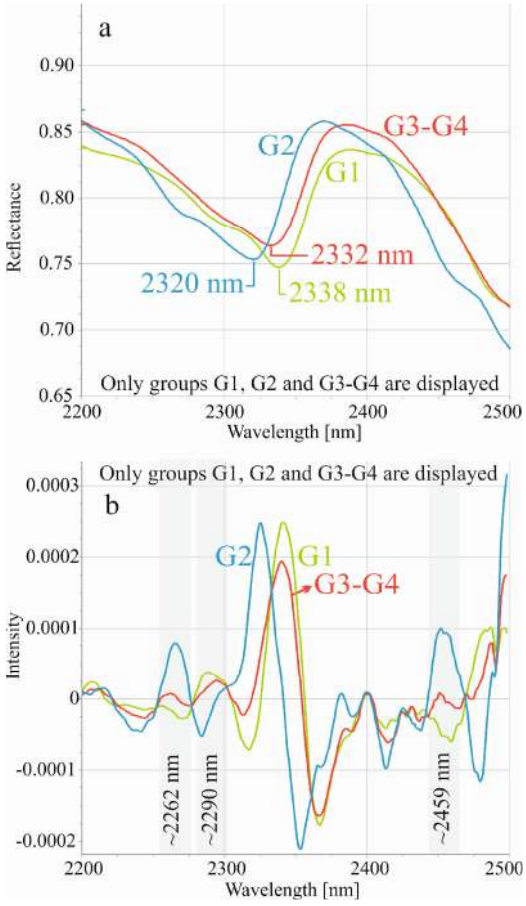


FIGURE II. Spectral signatures (a) and second derivatives (b) of groups G1, G2 and G3-G4 in the wavelength range between 2200 nm and 2500 nm.

Complementary to the determination of the spectral signatures, an analysis of the second derivate of all the spectra was conducted. The implementation of the second derivative (Fig. 1c) accentuates the presence of absorption features (shown as second derivative peaks) easing the differentiation between groups, in particular between the carbonate-rich ones (Fig. 1d).

In this sense, despite G1 (almost pure calcite), G2 (almost pure dolomite) and G3-G4 (calcite-dolomite mixtures) second derivatives seem similar, there are some differences in position and morphology of their respective second derivative peaks in regions at ~2262 nm, ~2290 nm and ~2459 nm (among others), that can be used as discriminants between these groups (grey-shadowed regions in Fig. 2b). Additionally, the differences in position of the main peak position between 2324 nm and 2340 nm also reflects the variation in mineral proportions between G1, G2, G3-G4 (Fig. 2b) and G6 (calcite with malachite). Additional peaks at 1860 nm, 1980 nm, 2264 nm and 2452 nm are useful for identifying the dolomite-rich group G2. In group G5 peaks linked to the dioctahedral clay mineral content stand out (1412 nm, 1908 nm and 2207 nm). In group G6 the spectral signature of malachite is more easily identified (peaks at 2213 nm and 2264 nm)

The 8 determined averaged spectral signatures fits reasonably well the clustering conducted based on the qualitative/semi-quantitative XRD data. Although the spectra shown in Fig. 1 present several morphological similarities (because of their similar mineral composition, as logical) the spectra can be differentiated from each other. Groups more difficult to discriminate are G1, G2 and G3-G4 as the position of the absorption band in the region between ~2320 nm and ~2338 nm acts as key for determining the presence of calcite, dolomite or mixtures of both minerals. In this sense, it has been proven that the complementary use of the second derivative, shown in Fig. 2, is an adequate pre-processing technique that facilitates the distinction of spectral signatures from each other. In short, the above enables these average spectra as good candidates to be suitable spectral signatures.

CONCLUSIONS

In this study 8 spectral signatures corresponding to the outcropping rocks on the platform of the Sierra del Aramo (Asturias) by means of VNIR-SWIR spectroscopy were determined. The spectral signature determined correspond to 9 different mineralogical associations and 8 groups fits well the clustering conducted based on the qualitative/semi-quantitative XRD data although the spectra cannot differentiate the majority minerals in assembles in which calcite and dolomite are together. In this sense, results obtained here may be directly applied on the analysis of hyperspectral images of remote sensing obtained with sensors working in the same spectral range, supporting the systematic mineral exploration in the area (e.g. by remote sensing cartographies) and future continuous monitoring of extraction, closure, and post closure activities. Further, in deep analysis of the mineralogical, chemical, and spectral data by chemo metrics methods would let to assess the exploitable potential of the Sierra del Aramo.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work has been financed by the project S34i (DOI: 10.3030/101091616). Authors want to thank Dr. V. Williams (Aurum Exploration Ltd Company) for his always awesome attitude and collaboration. We also thank NUCLEUS platform at University of Salamanca, especially J.M. Compaña (Servicio de Rayos X), E. Manchado and J. Delgado (Servicio de Preparación de Rocas) for their encouraged work.

REFERENCES

Alonso Sánchez, V. (2020). *Caracterización estructural de la mineralización y alteración de Cu-Co-Ni asociada a rocas carbonatadas, Mina de Aramo, Oroclinal Cantábrico, Asturias, Norte de España* (Master's thesis, Universidad Internacional de Andalucía).

Álvarez, R., Ordóñez, A., Pérez, A., De Miguel, E., y Charlesworth, S. (2018): Mineralogical and environmental features of the asturian copper mining district (Spain): A review. *Engineering Geology,* 243: 206-217.

Báscones, A., Suárez, M., Ferrer-Julià, M., García-Meléndez, E., Colmenero-Hidalgo, E., Quirós, A. (2020). Characterization of clay minerals and Fe oxides through diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-SWIR). *Revista de Teledetección*, 2020 (55), pp. 49-57. DOI: 10.4995/raet.2020.13331.

Blas Cortina, M.Á.D. (2014): El laboreo del cobre en la Sierra del Aramo (Asturias) como referente cardinal de la minería prehistórica en la región cantábrica. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 24: 45–84.

Bishop, J. L., Lane, M. D., Dyar, M. D., & Brown, A. J. (2008). Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: Smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. *Clay minerals*, *43*(1), 35-54.

Cloutis, E.A., Grasby, S.E., Last, W.M., Léveillé, R., Osinski, G.R., y Sherriff, B.L. (2010): Spectral reflectance properties of carbonates from terrestrial analogue environments: Implications for Mars. *Planetary and Space Science*, 58: 522–537.

Gupta, R.P. (2003): Spectra of Minerals and Rocks. *Remote Sensing Geology*, 33–52.

Hunt, G.R., (1977): Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3): 501–513.

Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L. y Klein, A.J., (2017): *USGS Spectral Library Version 7*. U.S. Geological Survey Data Series, 1035, 61 p.

Loredo, J., Álvarez, R., Ordóñez, A., y Bros, T. (2008). Mineralogy and geochemistry of the Texeo Cu–Co mine site (NW Spain): screening tools for environmental assessment. *Environmental geology*, *55*, 1299-1310.

Geoquímica y mineralogía del Sc en las lateritas de Ni-Co de Bahía de Moa (Cuba).

Geochemistry and mineralogy of Sc in the Ni-Co laterites of Moa Bay (Cuba).

C. Villanova-de-Benavent[1], D. Domínguez-Carretero[1], T. Aiglsperger[2], X. Llovet[3], J.A. Proenza[1]

1 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Carrer Martí i Franquès, s/n, 08028, Barcelona, España. cvillanovadb@ub.edu; ddominguezcarretero@ub.edu; japroenza@ub.edu
2 Department of Civil Engineering and Natural Resources. Luleå University of Technology, SE 97187, Luleå, Suecia. thomas.aiglsperger@ltu.se
3 Centres Científics i Tecnològics, Universitat de Barcelona, 08028, Barcelona, España. xavier@ccit.ub.edu

Palabras clave: escandio, laterita, goethita, asbolana, Bahía de Moa.

Resumen

El escandio (Sc) es un metal crítico con aplicaciones muy importantes en la producción de pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) y de aleaciones de Al-Sc, así como en la industria aeroespacial, electrónica, de láseres y cerámica. Los depósitos lateríticos de Ni-Co constituyen una fuente significativa de Sc en el mercado mundial. Actualmente, están en desarrollo varios proyectos de exploración de Sc en lateritas, tanto en las formadas por la meteorización de peridotitas ofiolíticas (60-100 ppm de Sc), como en las derivadas de complejos máficos-ultramáficos zonados de tipo Alaska-Ural (> 400 ppm de Sc). En este trabajo, se han estudiado tres perfiles lateríticos de Ni-Co del distrito minero de Bahía de Moa (noreste de Cuba). En general, el Sc se encuentra principalmente concentrado en la parte superior de la zona de óxidos (horizonte limonítico, ~100 ppm), y se correlaciona positivamente con Fe_2O_3, Al_2O_3 y MnO, y negativamente con MgO y SiO_2. Por lo tanto, las principales fases portadoras de Sc en la zona de estudio son oxihidróxidos de Fe y Mn. Los análisis de EMP indican contenidos de 96-236 ppm Sc en goethita y que las más ricas en Sc también lo son en Al, y de 88 ppm Sc en los oxihidróxidos de Mn, mientras que en la hematites y la maghemita están por debajo del límite de detección (~50 ppm Sc). En conclusión, la mineralogía del Sc en lateritas de Ni-Co es compleja y su correcta identificación tiene implicaciones en estudios de movilidad geoquímica en condiciones supergénicas y en el diseño de los procesos de extracción más adecuados.

Abstract

Scandium (Sc) is a critical metal with applications in the production of solid oxide fuel cells (SOFC), and Al-Sc alloys, as well as in the aerospace, electronics, laser and ceramics industries. Ni-Co laterite deposits represent a significant source of Sc worldwide. Currently, there are various active exploration projects of Sc in laterites formed after weathering of ophiolite peridotites (60-100 ppm de Sc), and in those derived from zoned, mafic-ultramafic Ural-Alaskan complexes (> 400 ppm de Sc). In this work, three Ni-Co laterite profiles from the Moa Bay mining district (Northeast Cuba) have been studied. In general, Sc is mainly concentrated in the upper portion of the oxide zone (limonite horizon, ~100 ppm), and is positively correlated with Fe_2O_3, Al_2O_3 and MnO, and negatively correlated with MgO and SiO_2, suggesting that the main Sc-bearing minerals are Fe and Mn oxyhydroxides. EMP analyses indicate Sc contents ranging from 96 to 236 ppm in goethite and that the ones with highest Al are also the richest in Sc, and of 88 ppm in Mn oxyhydroxides, while Sc is below the detection limit in hematite and maghemite (~50 ppm Sc). In conclusion, the mineralogy of Sc in Ni-Co laterites is complex, and its correct identification has implications in geochemical mobility studies in supergene conditions, and in the design of efficient ore processing methods.

El depósito de Cu-(Co) sedimentario Cabezo de La Mina (Santomera, Murcia)

The sediment-hosted Cu-(Co) deposit of Cabezo de La Mina (Santomera, Murcia)

L. Yesares[1], J. M. González-Jiménez[2], I. F. Blanco-Quintero[3], P. Marín-Troya[2], A. R. Ferreira[2], R. Piña[1], L. Ortega[1], I. Fanlo[4] y F. Gervilla[5]

1 Dpto., Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis 2, 28040 Madrid. myesares@ucm.es, rpinagar@ucm.es, lortega@ucm.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla, Granada. jmgonzj@ugr.es
3 Dpto., Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. if.blanco@ua.es
4 Dpto., Ciencias de la Tierra, Cristalografía y Mineralogía, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. fanlo@unizar.es
5 Dpto., Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18002 Granada. gervilla@ugr.es

Resumen: Las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas constituyen uno de los metalotectos europeos con mayor con potencial para la exploración de depósitos minerales ricos en metales tales como el Cu, Pb, Zn, Co, Au y Ag. Entre los de mayor relevancia histórica se encuentra el depósito de Cu-(Co) de Cabezo de la Mina (Santomera, Murcia). Encajado en una secuencia de pizarras, areniscas, dolomías y evaporitas, que incluye rocas básicas hipoabisales, el estilo de esta mineralización es estratoligado, rellenando planos de estratificación, espacios abiertos en las areniscas, y en menor medida, en las dolomías. Calcopirita y bornita se han identificado como minerales hipogénicos, encontrándose parcial o totalmente reemplazados por minerales supergénicos, incluyendo: sulfuros (calcosina y covellina), carbonatos (azurita y malaquita), y oxi-hidróxidos (goethita, hematites y cuprita). Los datos preliminares sugieren que fluidos hidrotermales, originados en un contexto extensivo, circularon a través de pizarras y rocas básicas lixiviando parte de los metales. Estos fluidos metalíferos interaccionaron con litologías reactivas provocando el reemplazamiento, de diagenético a epigenético, de las rocas encajantes y la precipitación de la mineralización de calcopirita y bornita. Posteriormente, la infiltración de fluidos meteóricos tuvo como resultado la alteración supergénica de la mineralización, precipitando los sulfuros, carbonatos y oxi-hidróxidos secundarios.

Palabras clave: cobre, cobalto, sedimentario, supergénico, Cordilleras Béticas.

Abstract: *The Internal Zones of the Betic Cordillera is one of the Europe's most relevant metallotects with recognized potential for mineral deposits enriched in metals like Cu, Pb, Zn, Co, Au and Ag. The Cu-(Co) deposits of Cabezo de la Mina (Santomera, Murcia) is among the most historic importance. Hosted in a sequence made up of sandstone and dolomites with evaporite and hypabyssal basic rocks, a stratabound-like mineralization is found in as infilling strata planes and opened spaces of the sandstones, and in to a lesser extent dolomite. Chalcopyrite and bornite are the only hypogenic minerals, being partially or completely replaced by a suite of supergene minerals, including: sulfides (chalcocite and covellite), carbonates (azurite and malachite), and oxy-hydroxides (goethite, hematite and cuprite). Preliminary data suggest that hydrothermal fluids, very likely originated in an extensional geodynamic setting, circulated through impure shales and basic rocks leaching a portion of their hosted metals. These metal endowed fluids interacted with reactive lithologies promoting their replacement, from diagenetic to epigenetic, of the hosting rocks, while precipitating the chalcopyrite-bornite ore. Subsequently, weathering-related fluids infiltrated the ore promoting its supergene alteration while precipitating the secondary sulfides, carbonates and oxyhydroxides.*

Key words: *copper, cobalt, sedimentary-hosted, supergene, Betic Cordilleras.*

INTRODUCCIÓN

Los depósitos de Cu encajados en rocas sedimentarias representan el 23% de la producción anual de Cu (Hitzman et al., 2017) a pesar de que volumétricamente son mucho más pequeños que los depósitos magmáticos de Ni-Cu, o los magmático-hidrotermales del tipo pórfido cuprífero. Este tipo de depósitos sedimentarios son además nuestra fuente primordial de Co. De hecho, más del 65% del Co que se produce en el mundo anualmente se extrae de los depósitos de Cu (Co-Ni) del "*Central African Copperbelt*" (Petavratzi et al., 2019). Los depósitos de Cu-(Co-Ni) sedimentarios suelen estar formados por diseminaciones, filoncillos y lentes de sulfuros de Cu-Fe-(Co-Ni), a menudo concordantes con la estratificación de las rocas encajantes. Estas pueden ser rocas sedimentarias siliciclásticas o carbonatadas, en secuencias que, además, suelen incluir evaporitas y rocas básicas hipoabisales. Estas últimas suelen ser resultado de la inyección de magmas básicos en niveles someros de

la corteza durante los episodios de rifting, responsables de la formación de las cuencas sedimentarias. Se ha sugerido que una mayor concentración de Co y Ni en este tipo de depósitos podría estar asociada con la presencia de estas rocas básicas, aunque dicha relación es aún objeto de debate (Ej. Hitzman et al., 2017).

En las Cordilleras Béticas, en el sur de la Península Ibérica, se conocen diferentes tipos de mineralizaciones estratoligadas, a partir de las cuales se ha explotado Cu, junto con otros metales base (Pb, Zn, Co), preciosos (Au, Ag) e industriales (F y Ba). Las mineralizaciones de Cu-(Co-Ni) están restringidas a las zonas internas de la Cordillera. El depósito estratoligado del Cabezo de la Mina (Santomera, Región de Murcia), también conocido en la literatura como Cabezo de la Fuente o Mina del Siscar, es uno de los de mayor importancia para el Cu en esta provincia metalogenética. Este depósito comenzó a explotarse en el calcolítico e intermitentemente entre los siglos XVI al XVIII. Tuvo su época de mayor esplendor durante la "fiebre del cobre" que tuvo lugar durante el primer tercio del siglo XIX y mitad del siglo XX, periodo durante el cual la mineralización de Cu fue explotada casi en su totalidad. Este trabajo presenta nuevos datos de campo y laboratorio, reevaluando, bajo la luz de nuevos modelos metalogenéticos, la posible génesis del depósito.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Las Cordilleras Béticas se localizan al sur de la Península Ibérica, extendiéndose entre las provincias de Cádiz (al oeste) y Valencia (este), respectivamente. Esta cordillera constituye, conjuntamente con la Cordillera del Rif en Marruecos, la porción más occidental del orógeno Alpino (Fig. 1).

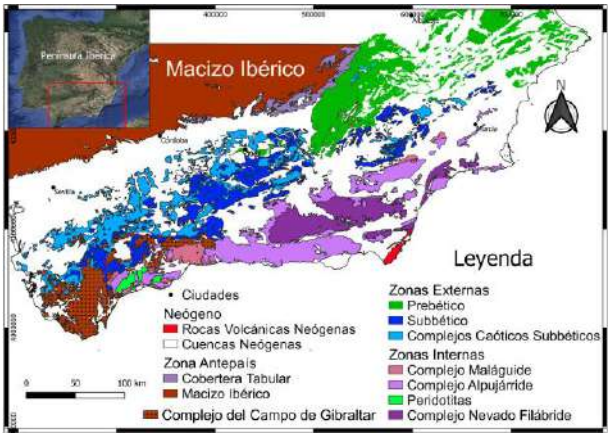


FIGURA 1. *Principales unidades geológicas de las Cordilleras Béticas.*

La etapa principal de construcción tuvo lugar en el Mioceno inferior cuando el océano Tetis se cerró, debido a la convergencia NO-SE entre las placas africana y euroasiática y el empuje hacia el oeste de la placa de Alborán. El Macizo Ibérico, situado al norte, constituye el zócalo de esta cordillera, la cual está conformada por tres grandes unidades (Fig. 1):

(1) Flysch del Campo de Gibraltar, formado por rocas sedimentarias Mioceno-Paleógenas de facies marinas profundas.

(2) Zonas Externas, fundamentalmente rocas sedimentarias depositadas un contexto extensional en el Mesozoico, que muestran deformación no relacionada con el metamorfismo de colisión — se diferencian el prebético próximo al zócalo y el subbético en una posición más al sur.

(3) Zonas Internas, que incluyen rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas de edad pre-Mesozoica con diferente grado de metamorfismo predominantemente Alpino, y localmente Varisco — tres grandes complejos tectonoestratigráficos de muro a techo, incluyendo: (1) Nevado-Filábride, (2) Alpujárride y (3) Maláguide.

El depósito estratoligado de Cu-(Co) de Cabezo de la Mina, objeto de este estudio, se localiza en la parte sur-oeste de la Sierra de Orihuela, justo en el límite administrativo de las provincias de Alicante y Murcia (Fig. 2a y b). Las rocas que conforman la Sierra de Orihuela, incluyen, de muro a techo, filitas, cuarcitas y dolomías con intercalaciones de rocas básicas metamorfizadas (gabros con textura ofítica—*ofitas sensu lato*). El protolito de las metabasitas se asocia a la inyección de magmas básicos durante el Triásico superior al Jurásico medio, en un contexto extensivo ligado a la ruptura de Pangea (Puga y Torres-Roldán 1989). Estas registran metamorfismo barroviano en facies de los esquistos verdes, originado durante los estadios finales de la colisión Alpina (Blanco-Quintero et al., 2023).

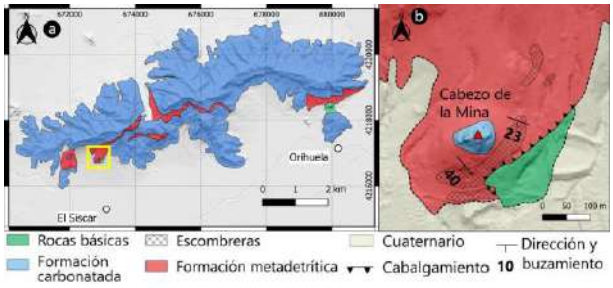


FIGURA 2. (a) *Mapa geológico de la Sierra de Orihuela. Modificado de Martín-Rojas et al. (2007); (b) detalle de la localización del depósito de Cabezo de la Mina.*

Algunos autores (i.e., De Boer et al., 1972) han propuesto que las rocas que conforman la Sierra de Orihuela pertenecían al Complejo Ballabona-Cucharon, distinguiendo tres unidades: (1) Bermejo, (2) Túnel y (3) Orihuela. Otros autores (Simon, 1987) las clasificaron como parte del Complejo Almágride. Trabajos recientes incluyen a la secuencia que conforma la Sierra de Orihuela como una parte del Alpujárride inferior (Martín-Rojas et al., 2007), sugiriendo una única subdivisión tectónica: la unidad de Orihuela-Callosa.

DEPÓSITO DE Cu-(Co) CABEZO DE LA MINA

El depósito estratoligado de Cu-(Co) Cabezo de la Mina está íntimamente asociado con la secuencia de rocas sedimentarias que conforman la Unidad Orihuela-Callosa (Fig. 3a y b).

La secuencia se inicia con un cabalgamiento que pone en contacto un cuerpo de metabasitas con rocas metasedimentarias. Estas comienzan con un tramo de rocas metadetríticas a muro y calizas/dolomías a techo. Las rocas metadetríticas con espesores de ca. 150 m, son filitas y pizarras de diversos colores, con intercalaciones de niveles cuarcíticos y yeso.

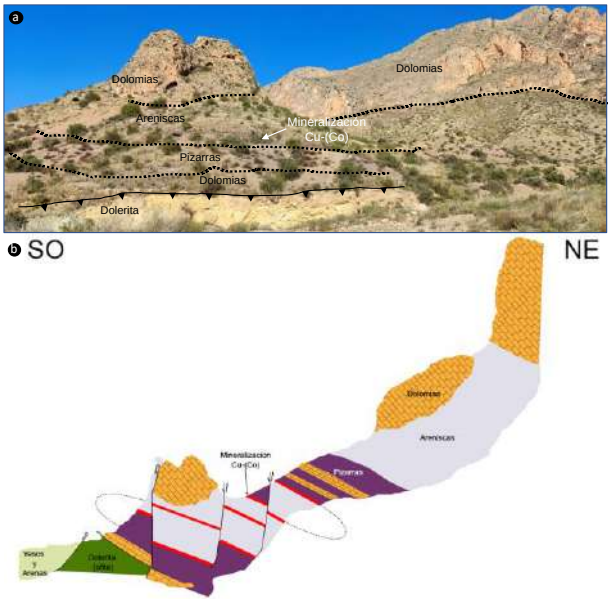


FIGURA 3. (a) Vista desde el este del Cabezo de la Mina. A grandes rasgos, se diferencian de muro a techo: Rocas básicas – Rocas detríticas (Areniscas) y Pizarras – Carbonatos; (b) corte del entorno geológico de las mineralizaciones de Cu-(Co).

En el área de afloramiento del depósito de Cu-(Co), esta secuencia está duplicada debido a un plegamiento isoclinal con buzamiento del eje axial de 20-30 hacia el oeste y, posteriormente, desplazada por fallas normales. El contacto entre las rocas metadetríticas y los metacarbonatos (calizas y dolomías) de techo es concordante.

La mineralización de Cu-(Co) se presenta en forma de capas delgadas rellenando los planos de estratificación de las areniscas (Fig. 4a, b). Asimismo, rellena fracturas, diaclasas y otros espacios abiertos en forma de pequeños filoncillos de tamaño centimétrico (Fig. 4c yd).

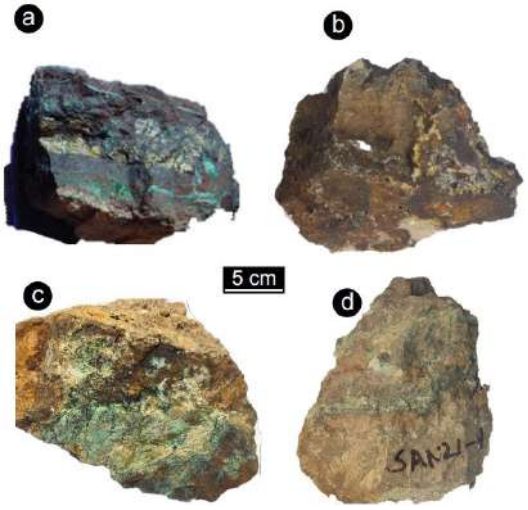


FIGURA 4. Imágenes de la mineralización de Cu-(Co) de Cabezo de la Mina. *(a) Imagen de mineralización masiva de calcopirita alterada a minerales supergénicos de Cu (Escanilla, 2016). (b) agregados de óxidos en arenisca; (c) minerales supergénicos de Cu rellenando espacios abiertos en areniscas; (d) dolomía cortada por una vena mineralizada.*

Calcopirita y bornita son los únicos minerales preservados de la mineralización hipogénica original. Estos sulfuros se encuentran parcial o totalmente reemplazados por una amplia variedad de minerales supergénicos de Cu-Fe (Fig. 5). Calcopirita y bornita presenta texturas en islas con bordes reemplazados por bornita y esta a su vez por minerales del grupo de la calcosina y covellina (Fig. 5a-c). Todos estos minerales suelen estar embebidos en una matriz de cuprita, atacamita, goethita, hematites, azurita y malaquita, con texturas de tipo boxwork y/o coloforme (Fig. 5d-h). En ocasiones, estos minerales suelen estar asociados con eritrina.

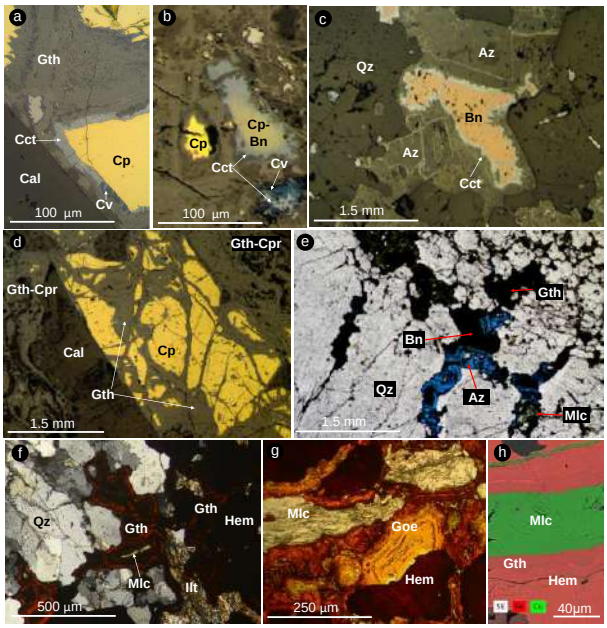


FIGURA 5. Imágenes de microscopio petrográfico de luz reflejada (a-d) y transmitida (e-g), y microscopia electrónica de barrido (h); (a-c) relictos de calcopirita reemplazados por bornita (Bn), calcosina (Cct) y covellina (Cv) englobadas en goethita (Gth) y azurita (Az); (d) calcopirita primaria reemplazada por cuprita (Cpr) y goethita; (e) cuarzo (Qz) con espacios rellenos de bornita, azurita y goethita; (f-h) goethita, hematites y malaquita (Mlc) coloforme rellenando huecos entre los agregados de cuarzo.

GÉNESIS Y EVOLUCION DEL DEPÓSITO

Brun (1910) sugirió que los metales que forman el depósito de Cu-(Co) Cabezo de la Mina fueron segregados de magmas básicos que intruyeron durante la sedimentación de las rocas siliciclásticas y carbonatadas. Recientemente, Ruiz-Montes (2000) también propuso un origen sinsedimentario o sindiagenético, con una alteración epitermal posterior superpuesta.

Sin embargo, las observaciones de campo, relación entre la mineralización y las rocas encajantes, así como la mineralogía identificada en este estudio permite sugerir un estilo de mineralización estratoligada. El

contexto extensivo asociado a la ruptura de Pangea durante el Triásico-Jurásico (Puga y Torres-Roldán, 1989) favoreció la formación de cuencas y el emplazamiento de rocas básicas en secuencias sedimentarias. Este tipo de escenario es el ideal para la circulación de fluidos hidrotermales, normalmente de cuenca, reducidos y relativamente calientes (~350ºC), que lixivian los metales de las rocas encajantes incluyendo las rocas básicas (Hitzman et al., 2017). Estos fluidos metalíferos interaccionaron con litologías reactivas, como por ejemplo areniscas ricas en materia orgánica y/o carbonatos, provocando su reemplazamiento, de diagenético a epigenético, y la precipitación de la mineralización hipogénica de Cu. Modelos genéticos similares han sido propuestos para explicar el origen de los depósitos de Cu-Co de tipo *Copper Belt Central*, en Zambia y Congo, donde la circulación de fluidos ricos en metales, tanto en etapas extensivas como compresivas, ha generado depósitos estratiformes encajados en litologías ricas en materia orgánica y espacialmente asociados a rocas básicas (Hitzman et al., 2017). Y también explican los depósitos de Zn-Pb tipo *Irlanda*, en los que la circulación y mezcla de fluidos metalíferos y salmueras dieron lugar a depósitos estratoligados encajados en carbonatos, y cuyos contenidos en Cu y Co incrementan hacia zonas de la cuenca en las que se localizan los sills de rocas básicas (Yesares et al., 2019).

En nuestro caso de estudio, la identificación de minerales de origen supergénico, sugiere la alteración de la mineralización de calcopirita y bornita, muy probablemente debido a la circulación de fluidos meteóricos. Durante este último estadio, se generó la siguiente secuencia mineral supergénica de Cu: calcosina ± covellina → cuprita ± goethita ± hematites → azurita ± malaquita. Asimismo, la frecuente identificación de eritrina asociada a los minerales supergénicos sugiere la presencia potencial de minerales hipogénicos de Co, tales como arseniuros y sulfoarseniuros, que pudieron coexistir con la calcopirita, los cuales no han sido identificados en este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro del marco del proyecto MECOBE "Metallogeny of Cobalt in the Betic Cordillera (Ref.P21-00705; PROYEXCEL_00705), financiado por la Junta de Andalucía, a través de la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades "FEDER una manera de hacer Europa".

REFERENCIAS

Blanco-Quintero, I.F., Santamaría-Pérez, E., Martín-Algarra, A., González-Jiménez, J.M., Sánchez-Navas, A., Benavente, D., Cañaveras, J.C. y García-Casco, A. (2023): Elusive evidence for basic rocks of the Tethyan passive margin in the easternmost Alpujarride Complex, Western Mediterranean. Submitted to International Geology Review.

Brun, M. L. (1910): Estudio Geológico de la zona cuprífera de Santomera en la Provincia de Murcia. *Revista Minera Metalúrgica y de Ingeniería*, 61: 109-12, 123125-151.

De Boer, A., Egeler, C.G., Kampschuur, W., Montenat, C., Rondeel, H.E., Simon, O.J. y van Winkoop, A.A. (1972): *Memoria de la Hoja Geologica nº 913 (Orihuela). Mapa Geológico de España E 1:50.000. Segunda serie*. IGME, Madrid.

Hitzman, M., Bookstrom, A., Slack, J. y Zientek, M. (2017): *Cobalt-styles of deposits and the search for primary deposits*. U.S. Geological Survey,47 p.

Martin-Rojas, I., Estévez, A., Martín-Martín, M., Delgado Salazar, F. y García-Tortosa, F. (2007): New data from Orihuela and Callosa Mountains (Betic Internal Zone, Alicante, SE Spain). Implications for the "Almágride Complex" controversy. *Journal of Iberian Geology*, 33: 311-318.

Petavratzi, E., Gunn, A.G. y Kresse, C. (2019): *Cobalt*. BGS Commodity Review. British Geological Survey,72 p.

Puga, E. y Torres-Roldán, R. L. (1989): Geochemistry and age relationships of metamorphosed mafic sills from Sierra de Enmedio and Sierra de Carrascoy (Eastern Betic Zone, Southeastern Spain). *Estudios Geológicos*, 45: 325–336.

Ruiz-Montes, M. (2000): *Mapa metalogenético de la Región de Murcia 1:200.000*, Primera ed., Madrid.

Simon, O. J. (1987): On the triassic of the Betic Cordilleras (Southern Spain). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 11: 385-402.

Yesares, L., Drummond, D.A., Hollis, S.P., Doran A.L., Menuge, J.F., Boyce, A.J., Blakeman, R.J. y Ashton, J.H. (2019): Coupling Mineralogy, Textures, Stable and Radiogenic Isotopes in Identifying Ore-Forming Processes in Irish-Type Carbonate- Hosted Zn–Pb Deposits. *Minerals*, 9: 335-362.

Nuevos recursos de metales críticos y de alto valor tecnológico en minerales metálicos de la Faja Pirítica Ibérica

New resources of high-tech critical metals in metallic minerals from the Iberian Pyrite Belt

L. Yesares[1], J.M. González-Jiménez[2], R. Piña[1], R. Sáez[3], G. Almodóvar[3], J.M. Pons[4] y S. Tenorio[5]

1 Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis 2, 28040 Madrid. myesares@ucm.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla, Granada. jmgonzj@ugr.es
3 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva, Av. 3 de Marzo s/n, 21071 Huelva. saez@uhu.es
4 Atalaya Mining, Minas de Riotinto, 21660, Huelva. juanmanuel.pons@atalayamining.com
5 Tharsis Mining, Pueblo Nuevo, s/n, Tharsis-Alosno, Huelva. sergio.tenorio@tharsismining.com

Palabras clave: Faja Pirítica Ibérica, sulfuros masivos vulcanogénicos, metales críticos, exploración.

Resumen

La Faja Pirítica Ibérica (FPI), al SO de la Península Ibérica, es la provincia metalogenética con la mayor concentración de depósitos de sulfuros masivos vulcanogénicos (VMS) conocida en el planeta Tierra (Sáez *et al*., 1999). En la actualidad, la FPI es considerada por la UE como una provincia estratégica por su gran potencial para la extracción de Cu como producto principal, y otros metales críticos y de alto valor tecnológico como subproductos. En esta comunicación se revisan los avances más recientes para la identificación de nuevos recursos de metales estratégicos en estos depósitos. Se enfatiza el uso de la pirita — el mineral que más abunda en estos yacimientos — como trazador geoquímico y mineralógico, desde la escala de depósito a la nanoescala. La combinación de diversas técnicas microanalíticas muestran que la pirita experimenta una maduración textural durante la formación y evolución de los depósitos, la cual lleva aparejada una señal geoquímica y mineralógica característica. Así, en las etapas más tempranas y de menor temperatura, la pirita se enriquece en As, Pb, Zn y Sb presentes en forma de partículas de galena, tetraedrita y arsenopirita de tamaño nano y micrométrico. En cambio, la pirita que ha experimentado recristalización por calentamiento, contiene elevadas concentraciones de Cu, Ag, Co, Au y Bi en forma de inclusiones nano y micrométricas de tennantita, calcopirita, gersdorffita y oro.

Abstract

The Iberian Pyrite Belt (IPB), in the SW of Iberian Peninsula, is the Earth's largest metallogenic province of volcanogenic massive sulfide (VMS) (Sáez *et al*., 1999). Nowadays, the IPB is targeted by EU a strategic province for its great potential for Cu extraction as main product, as well as others critical and high-tech metals as by products. This communication reviews the most recent advances in the identification of resources of new strategic metals in these deposits. Emphasizing the use of pyrite — the most abundant mineral in these ores — as geochemical and mineralogical tracer from deposit to nanoscale. The combination of several microanalytical techniques reveal that pyrite undergoes a textural maturation as a result of overlapping processes operating through the formation and evolution of these deposits, leaving behind a characteristic geochemical and mineralogical signature. Thus, in the earliest stages at lowest temperature, pyrite is enriched in As, Pb, Zn and Sb found as nano to micrometric particles of galena, tetrahedrite and arsenopyrite. In contrast, pyrite recrystallized by heating, host high concentration of Cu, Ag, Co, Au and Bi as nano to micrometric inclusions of tennantite, chalcopyrite, gersdorffite and gold.

Referencias

Sáez, R., Pascual, E., Toscano, M. y Almodóvar, G.R. (1999). *Mineralium Deposita* 34, 549–570.

Evaluación preliminar de residuos mineros abandonados para la recuperación de materias primas críticas: el ejemplo de la mina de Golpejas, Salamanca

Preliminary evaluation of abandoned mining waste for the recovery of critical raw materials: the example of the Golpejas mine, Salamanca

J. Ysla-Salinas[1], T. Llorens-González[1], S.M. Timón-Sánchez[1], A. Díez-Montes[1], T. Sánchez-García[2], J. García-Crespo[2], F.J. López-Moro[1]

1 IGME-CSIC, Plaza de la Constitución, 1, 37001, Salamanca. je.ysla@igme.es; t.llorens@igme.es; s.timon@igme.es; al.diez@igme.es; fj.lopez@igme.es.
2 IGME-CSIC, Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid. t.sanchez@igme.es; garcia.crespo@igme.es

Palabras clave: residuos mineros, evaluación de recursos de Sn-Ta-Nb-REE+Y, economía circular.

Resumen

España cuenta con un elevado número de balsas y escombreras inventariadas procedentes de antiguas explotaciones mineras. Muchos de estos residuos contienen aún cantidades significativas de metales de interés, varios de ellos considerados críticos por la Comisión Europea. Uno de estos ejemplos se encuentra en Golpejas, Salamanca, cuyo yacimiento primario fue explotado durante el siglo pasado para la extracción de casiterita, obteniendo concentrados de columbo-tantalita como subproducto. En el marco del proyecto TI-RRES se han realizado una serie de catas en las dos principales balsas de lodos de Golpejas (B1 al sur y B2 al norte), con el fin de evaluar su potencial minero desde el punto de vista químico, mineralógico y granulométrico. Entre los resultados más destacados cabe mencionar que los mayores contenidos en metales de interés se han obtenido en la balsa B1, con máximos de 749 ppm de Sn, 124 ppm de Ta, 136 ppm de Nb y 176 ppm de REE+Y, siendo estos residuos los que muestran un mayor tamaño de grano. La información recopilada también ha permitido llevar a cabo una valoración preliminar de los recursos de Sn, Ta, Nb y REE+Y contenidos en ambos reservorios, e identificar las áreas más favorables para un hipotético reprocesado en el marco de la economía circular.

Abstract

Spain has a wide number of inventoried ponds and waste dumps from old mining operations. Many of these deposits still contain significant quantities of metals of interest, several of them considered critical by the European Commission. One of these examples is the Golpejas mine, in Salamanca, whose primary deposit were mined during the last century for the extraction of cassiterite, obtaining columbo-tantalite concentrates as a by-product. Within the framework of the TI-RRES project a series of test pits have been developed in the two main sludge ponds of Golpejas (B1 to the south and B2 to the north), in order to evaluate their mining potential from a chemical, mineralogical and granulometric point of view. Among the most outstanding results it is worth mentioning that the highest contents of metals of interest have been obtained in the B1 pond, with maximum values of 749 ppm Sn, 124 ppm Ta, 136 ppm Nb and 176 ppm REE+Y, as well as larger grain size. A preliminary assessment of the Sn, Ta, Nb and REE+Y resources contained in both tailing ponds has been carried out and the most favorable areas have been identified for a hypothetical reprocessing within the framework of the circular economy.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias al proyecto TED2021-130109A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por la “Unión Europea NextGenerationEU/PRTR” y la beca JAEICU_23_01407.

El potencial Minero de Camerún: Explotación Sostenible o Depredación. Caso de la Región Oriental

Cameroon's Mining Potential: Sustainable Exploitation or Predation. Case of the East Region

L. Zang[1], P. Higueras Higueras[1] y E. Garcia[2]

1 Instituto de Geología Aplicada, Universidad de Castilla-La Mancha. Pl. Manuel Meca 1, 13400 Almadén 6 (Ciudad Real). lucien.zang@yahoo.fr, pablo.higueras@uclm.es
2 Área Prospección e Investigación Minera. Departamento Explotación y Prospección de Minas. Edificio de Investigación – 2ª planta | Universidad de Oviedo – Campus de Mieres 33600 Mieres. garciaefren@uniovi.es

Palabras clave: Camerún, minería a pequeña escala, desarrollo sostenible.

Resumen

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible nos dan la hoja de ruta para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos. Responden a los desafíos mundiales a los que nos enfrentamos, incluidos los relacionados con la pobreza, la desigualdad, el clima, la degradación del medio ambiente, la prosperidad, la paz y la justicia (Hilson, 2002). El Camerún no escapa a esta realidad y aspira a ofrecer mejores condiciones de vida a sus poblaciones, apoyándose en parte en sus ricos recursos minerales, todavía muy poco explotados. La actividad minera camerunesa sigue siendo embrionaria y se desarrolla principalmente en el sector de la minería a pequeña escala en el este del país, donde se denuncian muchas violaciones. Nuestro objetivo con este trabajo es presentar la actividad minera de Camerún, enfatizando tanto los aspectos negativos como sus puntos fuertes. Este diagnóstico de la situación, nos permite detectar los frenos a un desarrollo sostenible de la minería en Camerún y proponer soluciones viables que puedan satisfacer a las poblaciones, autoridades y empresas mineras**.**

Abstract

The Sustainable Development Goals give us the roadmap to achieve a better and more sustainable future for all. They respond to the global challenges we face, including those related to poverty, inequality, climate, environmental degradation, prosperity, peace and justice (Hilson, 2002). Cameroon does not escape this reality and aspires to provide better living conditions to its populations, in part relying on its rich mineral resources, which are still very little exploited. Cameroonian mining activity remains embryonic and develops mainly in a small-scale mining way in the east of the country, where many violations are contested. Our aim with this contribution is to present the mining activity of Cameroon, emphasizing both the strengths and negative aspects. This diagnosis of the situation allows us to detect the obstacles to the sustainable development of mining in Cameroon and propose viable solutions that could satisfy the populations, authorities and mining companies.

Referencias

Hilson, G. (2002). *Natural resources forum* 26, 3-13.

Propuesta de parametrización de la medida “distancia a la falla” para la aplicación práctica del proyecto de norma de construcción sismorresistente NCSR-23.

Proposal for parametrizing the "distance to fault" measure for practical application of the NCSR-23 seismic-resistant building draft code.

J. A. Álvarez-Gómez[1], P. Herrero-Barbero[2], H. Perea[3], O. Gómez-Novel[1,4], R. Martín-Banda[5], J. García-Mayordomo[6], J. Gaspar-Escribano[7], Á. González[8], G. Khazaradze[4]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid 28040 Madrid jaalvare@ucm.es
2 Geosciences Barcelona CSIC (GEO3BCN-CSIC). 08028 Barcelona pherrero@geo3bcn.csic.es
3 Institut de Ciències del Mar CSIC. 08003 Barcelona hperea@icm.csic.es
4 RISKNAT, Instituto Geomodels, Departamento de la Dinámica de la Tierra y del Océano, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain octgomez@ub.edu, gkhazar@ub.edu
5 Instituto Geológico y Minero de España, 41013 Sevilla r.martin@igme.es
6 Instituto Geológico y Minero de España, 28760 Tres Cantos, Madrid Julian.garcia@igme.es
7 ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, 28031 Madrid jorge.gaspar@upm.es
8 Centre de Recerca Matemàtica, Campus UAB, Edifici C, 08193 Bellaterra, Barcelona agonzalez@crm.cat

Resumen: Tanto las normas sismorresistentes europeas (Eurocódigo-8), como el proyecto de nueva norma de construcción sismorresistente española (NCSR-23) contemplan la presencia de fallas activas en el diseño. La NCSR-23 incluye la distancia a la falla como parámetro de diseño fundamental para edificación general y para estructuras singulares, como puentes y tuberías. En el proyecto de NCSR-23 se definen distancias a las fallas para considerar efectos de campo cercano en los valores del movimiento fuerte del terreno, así como, para la consideración de su potencial ruptura en superficie. Para aportar una visión desde el punto de vista de la geología de terremotos a la utilización de estas distancias hemos evaluado la sensibilidad de las distancias requeridas a las trazas de las fallas contenidas en la base de datos QAFI (v4). También hemos evaluado las deformaciones permanentes esperables en superficie por roturas de falla mediante modelos de deformación elastica con el fin de analizar la distancia de seguridad mínima a la traza de la falla. Hemos comprobado como la geometría en profundidad de la falla, así como su cinemática (deslizamiento y cabeceo), son de especial importancia, siendo recomendable una revisión a fondo de estos parámetros en la base de datos de fallas activas.

Palabras clave: Falla activa, terremoto, norma sismorresistente, parametrización, distancia a la falla

Abstract: *Both the European earthquake-resistant building codes (Eurocode-8) and the draft of the new Spanish earthquake-resistant building code (NCSR-23) consider the presence of active faults in the design. The NCSR-23 includes the distance to the fault as a fundamental design parameter for general buildings and for special-importance structures, such as bridges and pipelines. In the draft NCSR-23, fault distances are defined to take into account near-field effects in the ground motion levels, as well as to assess potential surface rupture (permanent surface deformation). To provide an earthquake geology perspective on the use of fault distance we have assessed the sensitivity of the required distances to fault traces contained in the QAFI (v4) database. We have also evaluated the permanent deformation expected at the surface by fault rupture with elastic dislocation models in order to assess the minimum safety distance to the fault trace. We have found that the geometry at depth of the fault, as well as its kinematics (slip and rake), are of particular importance, so a thorough review of these parameters in the active fault database is recommended.*

Key words: *Active fault, earthquake, seismoresistant code, parametrizing, distance to fault*

INTRODUCCIÓN

Tanto las normas sismorresistentes desarrolladas en el seno de la unión europea (Eurocódigo-8), como el proyecto de nueva norma de construcción sismorresistente española (NCSR-23) contemplan la presencia de fallas activas de manera explícita en el diseño. La NCSR-23, además de definir los criterios empleados para considerar una falla activa, o la magnitud máxima mínima que dichas fallas puedan generar, incluye la medida de la distancia a la falla como parámetro de diseño fundamental para edificación general y para estructuras singulares, como puentes y tuberías. En el proyecto de NCSR-23 se definen distancias a las fallas en dos ámbitos: i) por un lado, para considerar efectos de campo cercano en la sacudida

sísmica, con distancias definidas de 5, 10 y 15 km, en función del tipo de construcción; y, ii) por otro lado, se utiliza una ambigua "proximidad a la falla", así como la consideración de la potencial ruptura en superficie de la falla, pero sin entrar en más detalle acerca de estos aspectos. Para tratar de aportar una visión desde el punto de vista de la geología de terremotos a la utilización de estas distancias, desde el grupo de trabajo sobre "parametrización de fallas activas" emanado de la Jornada de Trabajo sobre fallas activas y NCSR-23

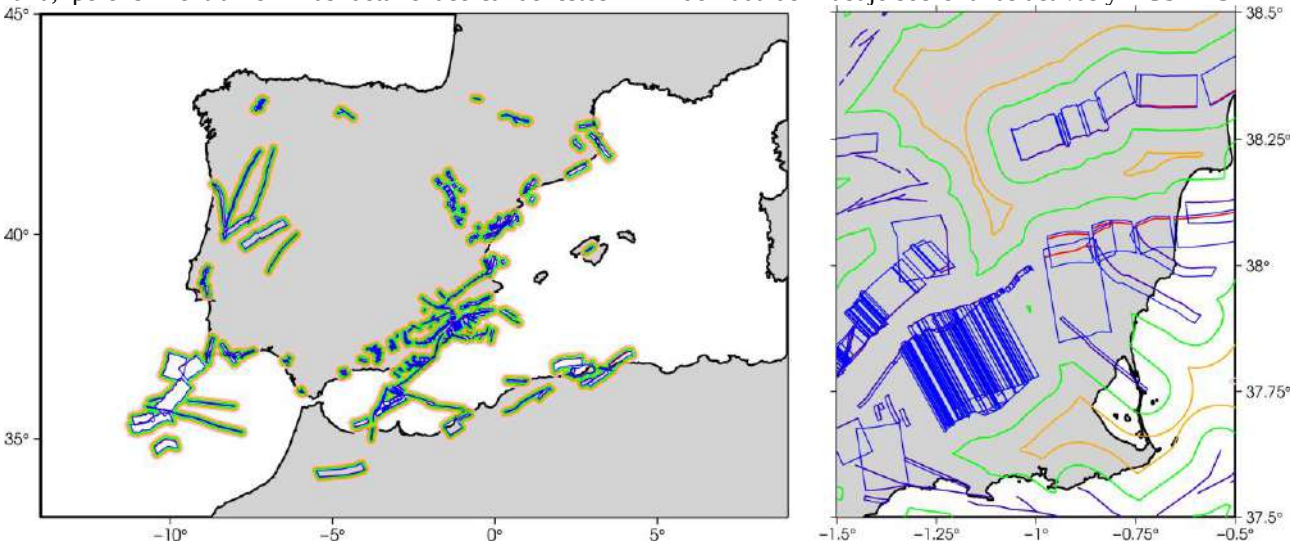


FIGURA 1. *Mapas mostrando la proyección en superficie de las fallas contenidas en la QAFI (v.4) en azul, así como los tres buffers a distancias de 5, 10 y 15 km en verde, naranja y rosa respectivamente. A la derecha detalle en la zona del Guadalentín – Bajo Segura.*

celebrada en el IGME el 18 de septiembre de 2023, hemos elaborado una serie de análisis y mapas preliminares para evaluar la sensibilidad de las distancias requeridas a las trazas de las fallas contenidas en la base de datos QAFI (v4). Además, hemos evaluado, utilizando modelos numéricos y revisando modelos empíricos, las deformaciones permanentes generadas en superficie por roturas de falla con el fin de establecer una distancia de seguridad mínima a la traza de la falla para tener en cuenta la posibilidad de rotura en superficie (deformación permanente del terreno).

DISTANCIA A LA FALLA

El parámetro de distancia a la falla es fundamental en peligrosidad sísmica, tanto para calcular la atenuación de las ondas como para estimar las aceleraciones utilizando ecuaciones de predicción de movimientos del terreno (GMPEs del inglés Ground Motion Prediction Equations). A la hora de medir distancias a falla para contemplar el efecto de aceleración de campo cercano se suelen utilizar diferentes tipos de medida, siendo las más frecuentes la distancia a la traza en superficie de la falla (o su proyección en superficie para fallas ciegas) o bien la distancia a la proyección en superficie del plano de rotura de la falla. Esta última es conocida como distancia de Joyner-Boore (R_{JB}) y permite tener en cuenta el efecto de labio superior en la amplificación de las aceleraciones del terreno.

Dado que la NCSR-23 incorpora la distancia a la falla para considerar efectos de campo cercano en la sacudida sísmica, con distancias definidas de 5, 10 y 15 km, hemos utilizado la distancia de Joyner-Boore, incluyendo la extensión de la falla hacia superficie en el caso de fallas ciegas, para generar márgenes de distancia ("*buffers*", Fig. 1) respecto a las fallas activas incorporadas en la QAFI (v.4) (García Mayordomo et al. 2012).
Como es conocido, si se fija una profundidad sismogénica máxima para la falla, cuanto menor sea el buzamiento de ésta, mayor área tendrá el plano de falla, y también será mayor su área proyectada en la superficie del terreno y la que queda dentro de esos *buffers*.

DEFORMACIÓN SUPERFICIAL

Para evaluar el efecto de los diferentes parámetros cinemáticos de las fallas, así como de la influencia de la profundidad de su límite superior, hemos realizado una serie de modelos elásticos de deformación. Estos modelos son ampliamente utilizados para modelar la deformación generada por terremotos en combinación con análisis geodésicos, geofísicos y/o geológicos, de manera que es una metodología ampliamente validada como aproximación física al proceso de deformación cortical. Hemos obtenido un total de 1001 modelos de deformación que han sido analizados para estudiar la sensibilidad de las deformaciones a los diversos parámetros considerados (Fig. 2). Manteniendo constante la dirección, las dimensiones de la falla y utilizando un deslizamiento normalizado a 1 m, hemos explorado la influencia del buzamiento, el cabeceo y la profundidad del extremo superior de la falla.

El análisis de sensibilidad realizado muestra que el cabeceo y la profundidad del extremo superior de la rotura son los principales parámetros que controlan el patrón de deformación superficial, habiendo considerado la misma magnitud de deslizamiento en todos los modelos. Nuestros resultados muestran que el mayor gradiente en la deformación superficial (equivalente a la dislocación en el terreno) se produce en los primeros cientos de metros de distancia a la falla, aunque

dependiendo de las características geométricas de la falla este gradiente puede ser importante hasta 1 km de distancia, y probablemente debe ser absorbido en fracturas secundarias asociadas a la rotura principal (figura 2). Estos resultados están en la linea de las observaciones hechas en roturas en fallas de diversas cinemáticas (Youngs et al., 2003; Petersen et al., 2011; Takao et al., 2013; Testa et al., 2021).

CONCLUSIONES

El parámetro de buzamiento asignado a la falla en la base de datos tiene un gran impacto en el cálculo de las distancias cuando se utilizan medidas a la proyección del plano en superficie (distancia de Joyner-Boore). Por otra parte, el cabeceo (que mide la cinemática de la falla) es fundamental para tratar de evaluar la potencial deformación superficial de grandes eventos. Por lo tanto, la geometría en profundidad de la falla, así como su cinemática, cobran una especial relevancia, haciendo recomendable una revisión a fondo de estos parámetros en la base de datos de fallas activas.

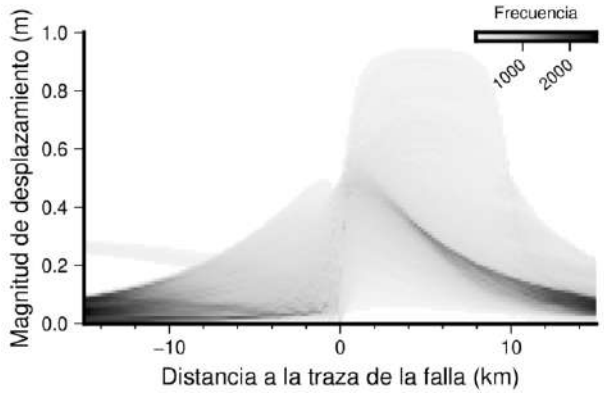


FIGURA 2. *Gráfico de frecuencias de resultados de los modelos de deformación elástica generados. La escala de color muestra el número de veces que los perfiles de deformación transversales a la falla de los modelos muestran la magnitud correspondiente (150 perfiles por modelo). Dado que se mide la magnitud de la deformación generada en superficie los valores siempre son positivos. Se consideran distancias negativas aquellas situadas hacia la izquierda de la traza de la falla en superficie mirando en la dirección de la misma.*

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación no cuenta con financiación propia. Los autores, que provienen principalmente de las comunidades Iberfault (https://iberfault.org) y Fault2SHA (https://fault2sha.net), cuentan con la financiación de los siguientes proyectos de investigación: IJC2020-043372-I (financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR), model_SHaKER (PID2021-124155NB-C31), STRENGTH (PID2019-104668RB-I00) y NSOURCES (PID2020-119772RB-I00) financiadas por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

García Mayordomo, J., Insúa Arévalo, J.M., Martínez Díaz, J.J., Jiménez Díaz, A., Martín Banda, R., Martín Alfageme, S., Álvarez Gómez, J.A., Rodríguez Peces, M.J., Pérez López, R., Rodríguez Pascua, M.A., others., 2012. La Base de Datos de Fallas Activas en el Cuaternario de Iberia (QAFI v. 2.0). *Journal of Iberian Geology*, 38(1): p.285-302.

Petersen, M.D., Dawson, T.E., Chen, R., Cao, T., Wills, C.J., Schwartz, D.P., Frankel, A.D., 2011. Fault Displacement Hazard for Strike-Slip Faults. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(2): p.805-825.

Takao, M., Tsuchiyama, J., Annaka, T., Kurita, T., 2013. Application of Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis in Japan. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 13(1): p.17-36.

Testa, A., Valentini, A., Boncio, P., Pace, B., Visini, F., Mirabella, F., Pauselli, C., 2021. Probabilistic fault displacement hazard analysis of the Anghiari – Città di Castello normal fault (Italy). Italian Journal of Geosciences, 140(3): p.327-346.

Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, A.R., Ake, J.P., Slemmons, D.B., McCalpin, J.P., Doser, D.I., Fridrich, C.J., Swan, F.H., Rogers, A.M., Yount, J.C., Anderson, L.W., Smith, K.D., Bruhn, R.L., Knuepfer, P.L.K., Smith, R.B., dePolo, C.M., O'Leary, D.W., Coppersmith, K.J., Pezzopane, S.K., Schwartz, D.P., Whitney, J.W., Olig, S.S., Toro, G.R., 2003. A Methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA). Earthquake Spectra, 19(1): p.191-219.

Análisis morfométrico cuantitativo de alta resolución del fondo marino para caracterizar el crecimiento de un sistema de fallas transtensional: Las fallas Norte-Sur (Mar de Alborán).

High-resolution seafloor quantitative morphometric analysis to characterize the growth of a transtensional fault system: The North-South faults (Alboran Sea).

A. Canari[1,2], H. Perea[1], S. Martínez-Loriente[1] y J. Llopart[1]

1 Dpto. Geociencias Marinas, Institut de Ciències del Mar - CSIC, 08003 Barcelona. acanari@icm.csic.es, hperea@icm.csic.es, smartinez@icm.csic.es, jaume.llopart@gmail.com.
2 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. acanari@icm.csic.es

Palabras clave: Morfotectónica submarina, Evolución de sistemas de fallas, Ruptura símica multifalla.

Resumen

Comprender el crecimiento y la interacción entre segmentos de falla en las regiones propensas a terremotos es crucial para la correcta evaluación de la peligrosidad sísmica. En regiones de baja deformación, como el mar de Alborán, el análisis del desplazamiento acumulado en escarpes de falla a lo largo del tiempo proporciona información clave para entender el crecimiento del sistema. Este estudio se enfoca en caracterizar los rasgos morfotectónicos resultantes de la actividad Plio-Cuaternaria de las fallas Norte-Sur. Para ello, se han utilizado datos batimétricos de alta resolución obtenidos con un vehículo submarino autónomo y técnicas avanzadas de visualización del relieve para su análisis. Estas herramientas han permitido identificar un conjunto de escarpes de falla rectilíneos que conforman sistemas de *horst* y *graben*, así como tres tipos de *pockmarks*. Se ha realizado un exhaustivo análisis morfométrico cuantitativo utilizando perfiles batimétricos a lo largo de cada traza de falla. Esto nos ha permitido cuantificar el desplazamiento vertical acumulado de la superficie del fondo del mar a lo largo de la traza de las fallas, información fundamental para discutir la deformación y crecimiento de todo el sistema. Los resultados indican una elevada segmentación y una compleja distribución de los desplazamientos acumulados, dando lugar a configuraciones de ruptura sísmica multifalla. Los hallazgos sugieren que se trata de un sistema transtensional en un estadio inicial de crecimiento y contribuye a una mejor comprensión de la dinámica y peligrosidad de estos complejos sistemas de fallas.

Abstract

Understanding the growth and interaction among fault segments in earthquake-prone regions is crucial for accurate seismic hazard assessment. In regions of low deformation, such as the Alboran Sea, analyzing the cumulative displacement on fault scarps over time provides key insights into the system's growth. This study aims to characterize the morphotectonic features resulting from the Plio-Quaternary activity of the North-South faults. For this purpose, was employed high-resolution bathymetric data with an autonomous underwater vehicle and advanced relief visualization techniques have been used for their analysis. These tools have facilitated the identification of a set of rectilinear fault scarps forming horst and graben systems, as well as three types of pockmarks. A comprehensive quantitative morphometric analysis has been carried out using bathymetric profiles along each fault trace. This has allowed quantifying the vertical cumulative seafloor surface displacement along fault traces, crucial for discussing the deformation and growth of the whole system. Results indicate high segmentation and complex distribution of cumulative displacements, leading to multi-fault seismic rupture configurations. The findings suggest that this is a transtensional system in an early stage of growth and may contribute to an understand better the dynamics and hazards of these complex fault systems.

Aplicación de Redes Neuronales Convolucionales para mejorar el conocimiento morfotectónico de las fallas marinas: caso de estudio de las fallas norte-sur en el mar de Alborán.

Use of Convolutional Neural Networks for enhancing morphotectonic insight in marine faults: case study of the north-south Faults in the Alboran Sea.

A. Canari[1,2], L. Pousse-Beltran[3], S. Giffard-Roisin[3], H. Perea[1] y S. Martínez-Loriente[1]

1 Dpto. Geociencias Marinas, Institut de Ciències del Mar – CSIC, 08003 Barcelona. acanari@icm.csic.es, hperea@icm.csic.es, smartinez@icm.csic.es.
2 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. acanari@icm.csic.es.
3 Institut des Sciences de la Terre, Universidad de Grenoble-Alpes, 38000 Grenoble, France. lea.pousse@univ-grenoble-alpes.fr, sophie.giffard@univ-grenoble-alpes.fr.

Palabras clave: *Deep Learning* (DL), Fallas normales, Procesos marinos, Escarpes múltiples.

Resumen

La caracterización de los segmentos de falla y sus conexiones es crucial para la evaluación de la peligrosidad sísmica. El desplazamiento acumulado de los escarpes de falla a lo largo del tiempo proporciona información valiosa, especialmente en regiones con una actividad sísmica de baja a moderada. Los métodos convencionales (aproximaciones manuales o semiautomáticas) para medir el desplazamiento superficial vertical de las fallas suelen realizarse a partir de perfiles topográficos distribuidos de forma dispar a lo largo de los escarpes de falla, de manera que pueden no reflejar todos los cambios morfológicos a lo largo de ellas. En nuestra investigación, hemos utilizado un algoritmo de *Deep Learning* (DL), ScarpLearn, basado en Redes Neuronales Convolucionales, que nos ha permitido analizar gran cantidad de datos automáticamente. Inicialmente diseñado para fallas normales simples en entornos terrestres, lo hemos modificado para procesos marinos y escarpes múltiples. Hemos entrenado el algoritmo utilizando perfiles batimétricos sintéticos a partir de la variación de diferentes parámetros (p.ej., el buzamiento de la falla o el coeficiente de difusión del escarpe, entre otros) y distintas resoluciones de datos. Hemos aplicado el código a las fallas norte-sur del mar de Alborán, mejorando nuestra comprensión de este sistema transtensional y su rol en el contexto regional. La aplicación de DL en conjuntos de datos batimétricos permite avances significativos en la morfotectónica marina.

Abstract

Characterization of fault segments and their connections is crucial for seismic hazard assessment. The cumulative displacement of fault scarps over time provides valuable information, especially in regions with low to moderate seismic activity. Conventional methods (manual or semi-automatic approaches) to measure vertical surface displacement of faults are usually performed from topographic profiles distributed unevenly spread along fault scarps, so that they may not reflect all morphological changes along them. In our research, we have used a deep learning (DL) algorithm, ScarpLearn, based on Convolutional Neural Networks, which has allowed us to perform a large amount of data analysis automatically. Initially designed for simple normal onshore faults, we have modified it for marine processes and multiple scarps. We have trained the algorithm using synthetic bathymetric profiles with different parameters (e.g., fault dip or scarp diffusion coefficient, among others) and different data resolutions. We have applied the code to the north-south faults of the Alboran Sea, improving our understanding of this transtensional system and its role in the regional context. The application of DL into bathymetric datasets allows significant advances in marine morphotectonics.

Implicaciones del uso de travertinos como indicadores de paleoterremotos en la Falla de Alhama de Murcia, España.

Implications for using travertines as paleoearthquake proxies for the Alhama de Murcia Fault, Spain.

C. Canora[1], J.J. Martínez-Díaz[2], J.M. Insua-Arévalo[2], O. Gómez-Novell[2], E. Rodriguez-Escudero[3] y J.A. Álvarez-Gómez[2]

1 Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid 28049 Madrid. carolina.canora@uam.es
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid 28040 Madrid. jmdiaz@geo.ucm.es insuarev@geo.ucm.es octavi.gomez@ucm.es jaalvare@ucm.es
1 Dpto. Geología y Geofísica, CN IGME-CSIC, C/ La Calera 1, Tres Cantos, Madrid. e.rodriguez@igme.es

Palabras clave: Travertinos, Falla de Alhama, Paleoterremoto, Tectónica activa, Caracterización sísmica.

Resumen

Los travertinos asociados a la actividad tectónica han sido definidos en numerosas ocasiones (por ejemplo, Hancock *et al.*, 1999; Selim *et al.*, 2016). Estos depósitos carbonáticos continentales se pueden producir como consecuencia de la apertura de fracturas y grietas por donde asciende las aguas profundas cargadas con carbonatos y que precipitan en superficie en el momento inmediatamente posterior a la actividad sísmica. La datación de estos depósitos puede servir, por tanto, como indicador para la determinación de eventos paleosísmicos en una falla o zona de falla.

En zonas donde la actividad sísmica es moderada, con fallas activas lentas, los vestigios de terremotos pasados pueden haber desaparecido por efecto de la erosión o la antropización. También es posible que, a pesar de tener una conservación de la deformación en los materiales, no exista posibilidad de datarlos. Este es el caso de los materiales afectados por la actividad de la Falla de Alhama de Murcia (FAM) en su rama noroeste (Gómez-Novell *et al.*, 2022).

La utilización de los travertinos en esta rama de la falla para determinar la edad de alguno de los terremotos que los han producido puede ser una herramienta fundamental en la caracterización sísmica de la FAM, y puede servir como método para conocer el ciclo sísmico de otras fallas en entornos tectónicos similares.

Abstract

Travertines associated with tectonic activity have been defined on numerous occasions (e.g. Hancock *et al.*, 1999; Selim *et al.*, 2016). These continental carbonatic deposits can be produced as a consequence of the opening of fractures and cracks through which deep CO_2-rich groundwater rises and precipitates to the surface immediately after seismic activity. Dating of these deposits can serve as an indicator for paleoseismic events in a fault or fault zone.

In moderate seismicity areas, with slow active faults, the vestiges of past earthquakes may have disappeared due to erosion or anthropization. It may also happen that, in spite of having preserved material deformation, there is no possibility of dating them. This is the case of the materials affected by the activity of the Alhama de Murcia Fault (AMF) in its northwest strand (Gómez-Novell *et al.*, 2022).

The use of travertines in this branch of the fault to determine the age of some of the earthquakes that have produced them can be useful proxy for the AMF characterization and can serve as a method to know the seismic cycle in other faults in similar tectonic environments.

Referencias

Gómez-Novell, O., Ortuño, m., García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J.M., Rockwell, T.K., Baize, S., Martínez-Díaz, J.J., Pallàs, R. y Masana, E. (2022). *Tectonics* https://doi.org/10.1029/2022TC007465.

Hancock, P.L., Chalmers, R.M., Altunel, E., Cakir, Z. (1999). *Journal of Structural Geology* 21, 903-916.

Selim, H.H., Yavuz, O., Gürer, O., Karakaş, A. y Taş, K. (2016). *Quaternary International* 425, 416-424.

Paleosismología de la Falla de Karioi. Implicaciones sobre las interacciones volcanotectónicas en la terminación sur del Taupo Rift, Aotearoa Nueva Zelanda.

Paleoseismology of the Karioi Fault. Implications for the volcano-tectonic interactions at the southern termination of the Taupo Rift, Aotearoa New Zealand.

C. Canora[1], P. Villamor[2], K. Berryman[3], B. Alloway[4], R. Basili[5], R. Langridge[2], J.J. Martínez-Díaz[6], M. Martínez-Martos[7] y C. Prentice[8]

1 Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid 28049, España. carolina.canora@uam.es
2 GNS Sciences, Lower Hutt 5011, New Zealand. P.villamor@gns.cri.nz, r.langridge@gns.cri.nz
3 Berryman Research and Consulting, 18 Cluny Road, Plimmerton, Porirua 5026, New Zealand. kelvin@brc.nz
4 Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile. brent.alloway@gmail.com
5 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Roma 00143, Italy. roberto.basili@ingv.it
6 Dpt. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid 28040, España. jmdiaz@geo.ucm.es
7 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Universidad de Granada 18071, España. manuelmm@ugr.es
8 United States Geologial Survey California 94025, UAS. cprentice@usgs.gov

Palabras clave: Falla de Karioi, Paleosismología, Interacción volcanotectónica, Taupo Rift, Tectónica activa.

Resumen

La Falla de Karioi, de dirección E-O a NE-SO, es una de las cinco fallas activas principales que definen la terminación meridional del Taupo Rift. Para la determinación de la historia paelosísmica reciente de esta falla, se han realizado tres excavaciones en las dos ramas principales de la estructura.

Las trincheras nos muestran una secuencia estratigráfica con depósitos de tefra pertenecientes a la llamada erupción de Kawakawa, hace unos 26.000 años, así como múltiples desplazamientos de escala métrica a decimétrica. Estas observaciones indican que en el pasado reciente se produjeron rupturas superficiales del terreno asociadas a terremotos de magnitud M>6 en la falla de Karioi, pero también a roturas secundarias relacionadas con grandes terremotos en fallas cercanas, y que potencialmente podrían estar correlacionados con el vulcanismo (Villamor *et al.*, 2007).

Estos datos contribuyen a comprender la relación entre los procesos volcánicos y tectónicos en zonas de rift y podrían ser comparables con zonas con condiciones similares como pueden ser Japón, Estados Unidos, México, El Salvador y las Islas Canarias, entre otros.

Abstract

The Karioi Fault is one of five main E-W or NE-SW striking active faults that define the southern termination of the modern Taupo Rift. The c. 26 ka Kawakawa tephra observed near the base of the stratigraphy exposed in three trenches excavated across the two main strands of the fault bound the recent paleoseismic history.

Multiple metre-scale and decimetre-scale individual displacements are observed. These observations indicate past surface ruptures have occurred in association with both M>6 earthquakes on the Karioi fault and as probable triggered slip related to large earthquakes on nearby rift bounding faults, that are potentially correlated with volcanism (Villamor *et al.*, 2007).

The data contribute to understanding inter-related volcanic and tectonic processes in similar rifts in Japan, USA, Mexico, El Salvador, and Canary Islands, among others.

Referencias

Villamor, P., Van Dissen, R., Alloway, B., Palmer, A.S. y Litchfield, N. (2007). *GSA Bulletin* 119, 529–547, doi: 10.1130/B26000.1

Campos de intensidad y determinación de fuentes sísmicas: un nuevo enfoque metodológico para terremotos históricos.

Intensity fields and seismic source determination: a new methodological approach for historical earthquakes.

Y. de Pro-Díaz[1], J. J. Martínez-Díaz[1] y C. Canora Catalán[2]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Calle José Antonio Novais 12, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid. ypro@ucm.es, jmdiaz@ucm.es
2 Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. Calle Francisco Tomás y Valiente 7, Fuencarral-El Pardo, 28049 Madrid. carolina.canora@uam.es

Palabras clave: Escenario sísmico, Almería 1804, Benavente 1909, Málaga 1680, Torrevieja 1829.

Resumen

El estudio de los efectos en superficie de terremotos históricos contribuye a la caracterización de las fallas activas. Desde el nacimiento de las primeras escalas de intensidad, estas se han utilizado mediante diversas metodologías para investigar la fuente de los terremotos pre-instrumentales. Recientemente, de Pro-Díaz *et al.* (2022; 2023) han desarrollado una integración de estas metodologías con un nuevo enfoque para constreñir fuentes sísmicas de eventos históricos. Para ello, primero se buscan las fallas o segmentos de falla que resulte plausible que hubiesen generado el terremoto y se elaboran escenarios sísmicos de intensidad para cada una de ellas. Cada escenario se compara con el campo de intensidad observado en el terremoto, centrándose en las zonas donde los escenarios muestran diferencias entre sí. En estas zonas se realiza un test estadístico para comprobar qué escenario presenta una distribución de valores más cercana a la de las intensidades observadas. La falla o segmento de falla a partir del cual se haya modelizado ese escenario será la más parecida a la falla que generó el terremoto.

Se presenta una evaluación de las limitaciones de la metodología analizando un terremoto cuya fuente es conocida, el terremoto de Torrevieja de 1829. Se presentan también resultados aplicando este método a los terremotos de Almería de 1804, Benavente de 1909 y Málaga de 1680.

Abstract

Studying earthquakes' surface effects contributes to characterization of active faults. Since the first intensity scales were proposed, these has been used through different methodologies to search for the source of pre-instrumental earthquakes. Recently, de Pro-Díaz *et al.* (2022; 2023) have integrated some of these methodologies with a new approach in order to constrain seismic sources of historical events. To do so, we first search for faults or fault segments which are plausible as sources for the earthquake and generate seismic intensity scenarios for each of them. Each scenario is compared with the earthquake's observed intensity field, focusing in the areas where scenarios differ from each other. In these areas, a statistical test is performed to evaluate which scenario shows the distribution of values closest to the observed intensity. The fault or fault segment from which this scenario was generated will be the closest to the actual source.

We present an evaluation of our methodology's limitations through the analysis of the 1829 Torrevieja earthquake, whose source is already known. We also apply this method to the 1804 Almería, 1909 Benavente and 1680 Málaga earthquakes and present the results.

Referencias

de Pro-Díaz, Y.; Perea, H.; Insua-Arévalo, J. M.; Martínez-Díaz, J. J.; y Canora, C. (2023). *Frontiers in Earth Science*, 11:1214836.

de Pro-Díaz, Y.; Vilanova, S.; y Canora, C. (2022). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(2), 710–731.

Tectónica activa en la región fronteriza Alt Urgell-Andorra y su relación con la serie sísmica de Os de Civís.

Active tectonics in the Alt Urgell-Andorra border region and its relationship with the Os de Civís seismic series.

A. Echeverria[1], J. Martín Castells[2], M. Ortuño[2], T. Frontera Genovard[3] y A. Margalef Porcar[1]

1 Andorra Recerca+Innovació, Av. Rocafort 21-23. AD600 Sant Julià de Lòria, Andorra, aecheverria@ari.ad ; amargalef@ari.ad
2 RISKNAT Research Group, GEOMODELS Research Institute, Universitat de Barcelona, maria.ortuno@ub.edu; janamartincastells@gmail.com
3 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 08038 Barcelona, tanit.frontera@icgc.cat

Palabras clave: neotectónica, terremotos, relocalización, sismotectónica.

Resumen

Desde el 1 de febrero de 2021, una serie sísmica está afectando la región del Pirineo, justo en la frontera entre Andorra y España. Durante tres años, se han registrado más de 650 terremotos en los alrededores de Os de Civís (Alt Urgell, España). Dos de estos terremotos alcanzaron magnitudes de hasta Ml=3.8 ($I_{máx}$=IV-V) y Ml=3.6 ($I_{máx}$=IV) según el ICGC. Hasta ahora, no se tenía constancia de fallas activas en la zona, dado que en zonas de baja deformación los estudios se localizan alrededor de los terremotos históricos, ausentes en esta zona. Con el propósito de determinar la posible fuente de esta serie sísmica, se ha llevado a cabo un estudio que combina la relocalización de terremotos mediante métodos no lineales con la elaboración de una cartografía neotectónica a escala 1:25.000.

Abstract

Since 1 February 2021, a seismic series has been affecting the Pyrenees region, right on the border between Andorra and Spain. Over three years, more than 650 earthquakes have been recorded around Os de Civís (Alt Urgell, Spain). Two of these earthquakes reached magnitudes of up to Ml=3.8 (I_{max}=IV-V) and Ml=3.6 (I_{max}=IV) according to the ICGC. Until now, no active faults were known in the area, since in low deformation zones the studies are located around the historical earthquakes, which are absent in this area. In order to determine the possible source of this seismic series, a study has been carried combining the relocation of earthquake using non-linear methods with a neotectonic cartography at a scale of 1:25.000.

Entendiendo los registros de terremotos devastadores históricos en la Bahía de Ocoa, centro-sur de la Isla Española

Insights on historical devastating earthquakes recorded in the Ocoa Bay, southern-central Hispaniola

FJ. Fernández[1], J. Escuder-Viruete[2] y F. Pérez-Valera[3]

1 Dpto. Geología, Universidad de Oviedo, C/Jesús Arias de Velasco sn, 33005 Oviedo *Spain*. *fjfernandez@uniovi.es*
2 Instituto Geológico y Minero de España - CSIC, C. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. Spain. *javier.escuder@csic.es*
3 Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante. 03080 Sant Vicent de Raspeig, Alicante. Spain. *fperez@ua.es*

Palabras clave: paleosismicidad, liquefacción, tectónica activa, La Española.

Resumen

Se ha estudiado un afloramiento de playa de cantos cementada en la playa de Tortuguero, localizada en la bahía de Ocoa (República Dominicana). La playa litificada contiene tres niveles con estructuras de licuefacción métricas, intercalados entre niveles indeformados. Estas estructuras de licuefacción en gravas consisten en pliegues sinclásticos que forman domos y cubetas de escala métrica con estructuras de interferencia (Stauffer, 1988) y canales de escapes de fluidos orientados hacia la línea de costa. Únicamente se han podido datar dos niveles, SGL-1 y SGL-2, que han proporcionado edades de radiocarbono corregidas de 1639±72 y 1929±49 BP, respectivamente. A pesar de ello, la regularidad de la potencia y el espaciado de los niveles de la secuencia sugieren una recurrencia sísmica regular estimada, de acuerdo con las edades de estos dos niveles, en ca. 290±60 años. El riesgo sísmico se ha modelizado considerando las potenciales fallas sismotectónicamente activas (Escuder-Viruete *et al.*, 2023), las cuales generarían una ruptura que alcanzaría una aceleración pico del terreno máxima de 0,8 g. El registro histórico del terremoto de Azua del 18 de octubre de 1751, M_i 7,5 (Flores *et al*.,2012) y la recurrencia inferida en este trabajo sugiere que un devastador terremoto podría ser inminente.

Abstract

A cobble beachrock outcrop has been studied on the Tortuguero Beach in Ocoa bay (Dominican Republic). The lithified foreshore sequence contains three metric interbedded liquefaction levels between undeformed beds. These soft-gravelly liquefaction structures consist of synclastic folds, forming a metric-scale interference structure in domes and basins (Stauffer, 1988) and escape fluid channels oriented towards the shoreline. Only two levels have been dated, SGL-1 and SGL-2, which yield radiocarbon corrected ages of 1929±49 and 1639±72 BP, respectively. Still, the regularly spaced and thick of the sequence levels suggest a regular seismic recurrence, estimated according to the ages of these two levels in ca. 290±60 years. The seismic hazard has been modeled based on potentially seismotectonically active faults (Escuder-Viruete *et al.*, 2023), which could generate a rupture reaching maximum peak ground acceleration values of 0.8 g. The historical October 18, 1751, M_i 7.5 Azua earthquake (Flores *et al*., 2012) and the seismic recurrence inferred in this work suggest a devastating earthquake may be imminent.

Referencias

Escuder-Viruete, J., Fernández, F. J., Valera, F. P., y Medialdea, A. (2023). *Tectonics*, doi: 10.1029/2022TC007618

Flores, C.F., ten Brink, U.S., y Bakun, W.H. (2012). *US Geological Survey, Open-File Report 2011–1133*, https://pubs.usgs.gov/of/2011/1133/pdf/ofr2011-1133_212012.pdf

Stauffer, M. (1988). Tectonophysics, doi: 10.1016/0040-1951(88)90182-5

Cartografía apoyada en drones con sensores térmicos y fotogrametría para la identificación de actividad neotectónica en el NO de Iberia: La mina romana de Las Médulas (León) como laboratorio natural.

UAV-assisted mapping based on thermal and photogrammetry data for recognition of neotectonic activity in NW Iberia: Las Médulas (León) Roman Gold Mine as a natural laboratory.

J. Fernández-Lozano[1], J. Babault[2], A. Rodríguez García[2], A. Suárez Rodríguez[2], P.P. Hernaiz-Huerta[2] e I. González-Pérez[1]

[1] Dpto. Tecnología Minera, Topografía y Estructuras, ESTI Minas, Universidad de León 24007 León. jferl@unileon.es, igonp@unileon.es
[2] Unidad Territorial del IGME-CSIC en León. Av. Real 1, Parque Científico Edificio 1, 24006 León. j.babault@csic.es, a.suarez@igme.es, a.rodriguez@igme.es, p.hernaiz@igme.es

Resumen: La mina de oro romana de Las Médulas, declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1997, es un lugar de gran valor natural y cultural. Su geología ha generado diferentes hipótesis sobre su formación, proponiéndose dos modelos tectónicos. Sin embargo, aún no se han obtenido dataciones para los depósitos superiores. Para profundizar en el origen y evolución de la actividad neotectónica de este conjunto, se han realizado vuelos con drones con diferentes sensores, lo que ha permitido una cartografía detallada de las distintas unidades geológicas. La combinación de fotogrametría RGB y térmica proporciona información de interés para mejorar el conocimiento geológico de esta mina de oro romana. El análisis de los datos obtenidos permite inferir la presencia de cambios en la inclinación de los estratos hacia ENE, en el sector del Orellán, que se interpretan como resultado de la formación de un pliegue de arrastre en el bloque inferior del Cabalgamiento del Teleno, activo durante el Mioceno. Mientras que en el sector de Reirigo-Yeres los sedimentos cenozoicos, probablemente de la misma edad o más recientes, yacen horizontales y fosilizan el zócalo paleozoico del bloque superior.

Palabras clave: Las Médulas, neotectónica, estratigrafía, cabalgamiento, drones térmicos y fotogrametría

Abstract: *The Roman gold mine of Las Médulas, declared a World Heritage Site by UNESCO in 1997, holds a great natural and cultural value. Its geology has generated different hypotheses about its formation, with two tectonic models being proposed. However, no dating has yet been carried out for the uppermost deposits. In order gain insight into the origin and neotectonic activity of this complex, drone flights with different sensors have been carried out, which has allowed a detailed mapping of the different geological units. The combination of RGB and thermal photogrammetry provides information that improves the geological knowledge of this cultural heritage site. The analysis of the data obtained allows us to infer the presence of changes in the inclination of the strata towards the ENE, in the Orellán sector, which corresponds to a drag fold in the foot wall of the Teleno Thrust, active during the Miocene. In the Reigiro-Yeres sector, Cenozoic sediments probably of the same age or younger lie horizontally and cover the Palaeozoic basement of the hanging wall.*

Key words: *Las Médulas, Neotectonics, stratigraphy, thrust, thermal and photogrammetry UAV.*

INTRODUCCIÓN

El espacio arqueológico de Las Médulas, situado en la comarca de El Bierzo (provincia de León), representa uno de los enclaves más representativos de la minería aurífera romana en nuestro país. En los últimos años, dos modelos tectónicos han sido propuestos sobre su formación: i) falla normal que acomoda una sucesión de sedimentos miocenos (Pérez-García y Sánchez-Palencia, 2000), y ii) cabalgamiento que afectaría a los niveles inferiores de dicha sucesión, atenuándose hacia techo para quedar fosilizada por los superiores (Heredia et al., 2015). Sin embargo, la intensa vegetación que cubre el entorno y la fuerte topografía dificultan el acceso para su estudio. En este trabajo se ha llevado a cabo una cartografía de esta sucesión con objeto de analizar sus relaciones tectónicas y estratigráficas internas. Para ello, se han empleado drones con sensores térmicos y RGB para la obtención de modelos tridimensionales que permitan un análisis detallado de dichas relaciones. El trabajo ha permitido detallar las características tectonoestratigráficas de todo el conjunto, arrojando luz sobre el proceso de formación geológica de la mina de oro de Las Médulas y la posible presencia de actividad neotectónica en la zona.

MARCO GEOLÓGICO

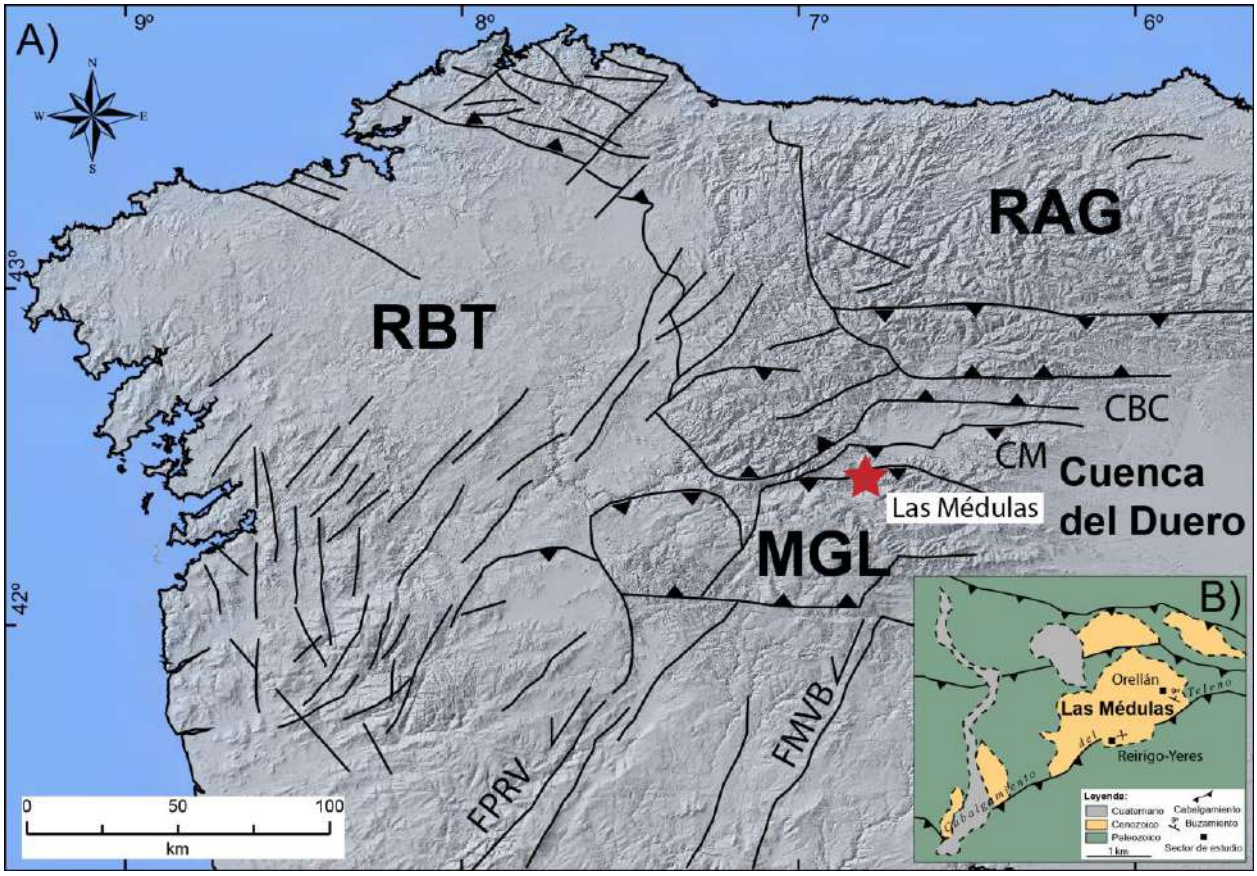


FIGURA 1. *A) Mapa tectónico del NO peninsular: RBT) Región de Rias Bajas-Terra Chá; MGL) Montes Galaico-Leoneses; RAG) Región Astur-Galaica; CBC) Cabalgamiento Basal Cantábrico; CM) Cabalgamiento de Molinaseca; FPRV) Falla de Penacova-Régua-Verin y FVB) Falla de Manteigas-Vilariça-Bragança (modificado de Martín-González y Heredia, 2011). B) Mapa geológico simplificado de Las Médulas y ubicación de los sectores estudiados (modificado de Heredia et al., 2015).*

En el entorno de Las Médulas la sucesión cenozoica se compone de dos formaciones que corresponden de muro a techo a la Fm Toral, compuesta principalmente por arcillas, y la Fm Médulas constituida por los miembros Santalla (inf.) y Yeres (sup.), formados por areniscas y conglomerados (Heredia et al., 2015). Esta sucesión se interpreta que corresponde a una evolución distal-proximal de depósitos de abanicos aluviales. Hacia el sur, afloran los materiales paleozoicos compuestos por pizarras, calizas y areniscas del Ordovícico. Todo el conjunto es atravesado por el Cabalgamiento del Teleno (Fig. 1A y B).

METODOLOGÍA

En este trabajo se han empleado sensores RGB y térmicos aerotransportados para la elaboración de modelos texturizados del sector del Orellán y Reirigo-Yeres. Los vuelos se realizaron con un dron modelo Phantom 4-RTK y un Mavic 3T-RTK. Ambos vuelos fueron apoyados con 18 puntos de control en tierra.

RESULTADOS

En el sector del Orellán se observan cambios de buzamiento (1º-9º hacia el NE). Mientras que en el sector de Reirigo-Yeres, los materiales no superan los 0,5º de buzamiento y no se observan cambios apreciables de espesor de los estratos (Fig. 2). Esto indica que, en el primer caso (sector Orellán), los sedimentos están afectados por un cabalgamiento, mientras que, en el segundo (sector Reirigo-Yeres), fosilizan todo el conjunto, mostrando el final de la deformación.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los cambios de inclinación observados en los estratos del sector Orellán se interpretan como asociados a un pliegue de arrastre en el bloque inferior del Cabalgamiento del Teleno, activo durante el Mioceno superior (Heredia et al., 2015) y posiblemente con reactivaciones posteriores. Mientras que en el sector de Reirigo-Yeres los sedimentos cenozoicos, probablemente de la misma edad o más recientes, yacen horizontales y fosilizan el zócalo paleozoico del bloque superior de dicho cabalgamiento. La casi inexistente deformación registrada en los sedimentos más reciente de Las Médulas sugiere que la deformación asociada al levantamiento de las Montañas de León terminó en el Mioceno superior.

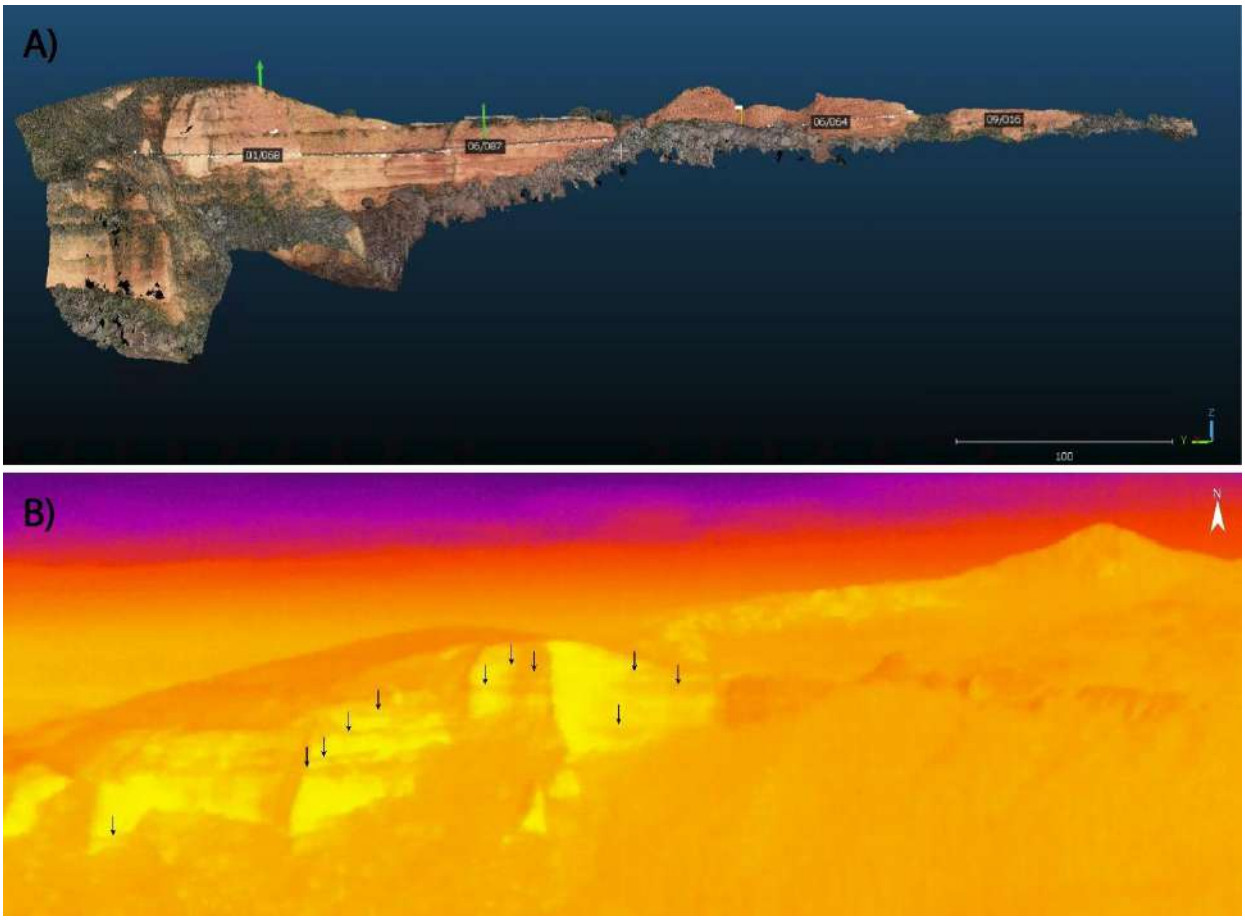


FIGURA 2. *A) Modelo fotogramétrico de la zona del Orelllán sobre el que se indican los cambios de buzamiento hacia el ENE de Las Médulas. B) Imagen térmica de alta resolución en la que se pueden identificar los diferentes estratos y litologías del mismo sector.*

REFERENCIAS

Heredia, N., Fernández, L. P., Martín-González, F. y Bahamonde, J. R. (2015): Depositional style and tectonostratigraphic evolution of El Bierzo Tertiary sub-basin (Pyrenean orogen, NW Spain). *Geologica Acta: an international earth science journal*, 13(1): 1-23.

Martín-González, F. y Heredia, N. (2011). Geometry, structures and evolution of the western termination of the Alpine-Pyrenean Orogen reliefs (NW Iberian Peninsula). *Journal of Iberian Geology*, 37: 103-120.

Pérez-García, L.C. y Sánchez-Palencia, F.J. (2000): Las Médulas y la Minería del Oro Romana en la Asturia Augustana. En: *Las Médulas (León). Un paisaje cultural en la "Asturia Augustana"*, (F.J. Sánchez-Palencia, ed.). Instituto Leonés de Cultura, León, 137-208.

Origen de la serie sísmica de 2021 a la actualidad en el monte submarino Ras Tarf (Mar de Alborán).

Origin of the 2021 to present seismic series around Ras Tarf seamount (Alboran Sea).

J. Galindo-Zaldívar[1], J.A. Peláez[2], J. Henares[3], O. Azzouz[4], M. Benmakhlouf[5], M. Chourak[4], E. d'Acremont[6], F. Estrada[7], M.C. Fernández-Puga[8], L. González-Castillo[1], A. Madarieta-Txurruka[1], S. Martínez-Loriente[7], Y.M. Martos[9], D. Palomino[10], V. Tendero-Salmerón[7], J.T. Vázquez[10] y G. Ercilla[7]

1 Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. jgalindo@ugr.es; lgcastillo@ugr.es; amadatxu@ugr.es
2 Dpto. de Física, Universidad de Jaén, 23071 Jaén, España. japelaez@ujaen.es
3 Universidad Internacional de La Rioja, 26006 Logroño, Spain. jesus.henares@unir.net
4 Université Mohammed Premier, Oujda, Marruecos. azzouzomar@yahoo.fr; m.chourak@ump.ac.ma
5 Faculty of Sciences, Université Abdelmalek Essaadi, Tetouan, Marruecos, benmaklouf@yahoo.fr
6 ISTeP, Sorbonne Université, Campus Jussieu and CNRS, UMR 7193, F-75005 Paris, Francia.
elia.dacremont@sorbonne-universite.fr
7 Institut de Ciències del Mar, Grupo de Márgenes Continentales, CSIC, 08003 Barcelona, España. festrada@icm.csic.es; smartinez@icm.csic.es; vtendero@icm.csic.es ; gemma@icm.csic.es;
8 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Fac. de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR, Universidad de Cádiz, 11510 Cádiz, España.
mcarmen.fernandez@uca.es
9 NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, University of Maryland, College Park, MD, USA.
yasmina.martos@nasa.gov
10 Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, C.O. 29640, Fuengirola, Málaga, España.
desiree.palomino@ieo.csic.es, juantomas.vazquez@ieo.csic.es

Palabras clave: Mar de Alborán, enjambre sísmico, monte submarino Ras Tarf, tectónica activa.

Resumen

El Mar de Alborán está afectado por una serie sísmica desde 2021, localizada principalmente en el monte submarino Ras Tarf. Este alto tiene aspecto de edificio volcánico y se encuentra próximo a la costa de la Cordillera del Rif. La sismicidad tiene características de enjambre, con terremotos que alcanzan una magnitud máxima de Mb=4,5. Existe discusión en la interpretación de esta actividad sísmica, que podría estar asociada a la posible reactivación de un volcán inactivo o tener un origen tectónico. La posible propagación de la actividad sísmica hacia tierra representa una amenaza. Se han integrado datos geológicos, sismicidad, gravedad, datos magnéticos y perfiles de sísmica de reflexión de la región. Los resultados sugieren un origen tectónico de la sismicidad vinculado a un cuerpo ígneo rígido y ahora frío dentro de rocas de caja más blandas. Este cuerpo frágil está afectado por los esfuerzos de la zona de cizalla Bético-Alborán-Rif, límite occidental del indentador tectónico del Mar de Alborán central.

Abstract

The Alboran Sea has been affected by a seismic series since 2021, predominantly centered on the Ras Tarf seamount. This high bears a striking resemblance to a volcanic edifice and is situated near the Rif Cordillera coast. The seismicity exhibits swarm characteristics, with earthquakes reaching a maximum magnitude of Mb=4.5. There are concerns about interpreting this active seismicity, whether it signifies the potential reactivation of a dormant volcano or has a tectonic origin. The potential inland spread of seismic activity poses a threat. Geological data, seismicity records, gravity, magnetic, and seismic reflection profiles have been integrated. The findings suggest a tectonic origin linked to a rigid and now cold igneous body within softer host rock. This brittle body is under stress from the nearby Betic-Alboran-Rif shear zone, the western boundary of the tectonic indenter in the central Alboran Sea.

In memoriam. Dedicamos este trabajo al compañero y amigo Dr. Manuel Catalán Morollón (Manen), recientemente fallecido, que contribuyó notablemente al avance de esta investigación.

Mejoramiento del análisis paleosismológico de eventos de terremotos antiguos mediante el uso de datos hiperespectrales.

Enhancing paleoseismological analysis of ancient earthquake events by using hyperspectral data.

J. Gallego-Montoya[1], M. Ortuño[1], L. Benedetti[2], M. Kirsch[3], M. Riesner[2], and D. Garcia-Sellés[1]

1 RISKNAT Group, GEOMODELS, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Barcelona 08028, Spain. jj.gallego.montoya@ub.edu, maria.ortuno@ub.edu, dgarcia@ub.edu
2 University of Aix Marseille, CNRS, IRD, CEREGE, Aix-en-Provence 13545, France. benedetti@cerege.fr, riesner@cerege.fr
3 Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology, Freiberg 09599, Germany. m.kirsch@hzdr.de

Palabras clave: Datos Hiperespectrales, Cronología de Terremotos, Paleosismología, Proyecto TREAD.

Resumen

La evaluación de la amenaza sísmica se basa en estudios paleosismológicos para extender los catálogos sísmicos más allá de los registros históricos e instrumentales. Por ende, resulta crucial reducir las incertidumbres en la interpretación de eventos paleosísmicos en afloramientos y trincheras. Las cámaras hiperespectrales capturan amplias bandas de datos en un rango de longitud de onda específico, posibilitando la mejora de las interpretaciones paleosismológicas. Esta investigación, enmarcada dentro del Proyecto TREAD - Horizon UE, tiene como objetivo adaptar y mejorar una metodología de trabajo para el uso de datos hiperespectrales en estudios de paleosismología. Se busca con esta técnica mejorar las interpretaciones paleosismológicas en zonas de fallas complejas y optimizar la detección de horizontes asociados a eventos sísmicos prehistóricos para su posterior datación. El proyecto incluye el uso de imágenes hiperespectrales en trincheras y escarpes de fallas en roca, el procesamiento de datos en entornos de programación junto con la integración de modelos fotogramétricos y datos topográficos. Se seleccionaron tres casos de estudio: fallas oblicuas, inversas y de rumbo en las Cordilleras Béticas Orientales y fallas normales en los Apeninos y las Cordilleras Costero Catalanas. Aquí presentamos los hallazgos preliminares sobre la adquisición y análisis de datos hiperespectrales del Sistema de Fallas de Alhama de Murcia en las Béticas Orientales. La metodología proyectada facilitará la integración de datos hiperespectrales en paleosismología, lo que conducirá a una mejor comprensión del comportamiento temporal (ciclicidad) y las interacciones de fallas sismogénicas. Además, ampliará su utilidad para correlaciones mineralógicas en registros de trincheras y el potencial uso de datos de entrenamiento para técnicas de cartografía basadas en aprendizaje automático.

Abstract

Seismic hazard assessment relies on paleoseismological studies to expand seismic catalogs beyond historical and instrumental records. Reducing uncertainties in interpreting paleoseismic events from outcrops and trenches is thus particularly important. Hyperspectral cameras capture extensive data bands across a specified wavelength range, enabling the improvement of paleoseismological interpretations. This research, conducted within the TREAD Project under the EU Horizon framework, aims to adapt and enhance a workflow for utilizing hyperspectral data in paleoseismology studies. This technique will improve paleoseismological interpretations in complex fault zones and optimize the detection of prehistoric earthquake event horizons for subsequent dating. The project includes the use of hyperspectral imagery in trenches and rock fault scarps, processing data in programming environments, and integrating photogrammetric models and topographic data. Three case studies were selected: oblique reverse-strike slip faults in the Eastern Betics and normal faults at the Apennines and the Catalan Coastal Ranges. Here, we present preliminary findings on hyperspectral data acquisition and analysis from the Alhama de Murcia Fault System in Eastern Betics. The projected workflow will enable the utilization of hyperspectral data in paleoseismology and will facilitate the improvement of our understanding of seismogenic faults regarding their behavior (periodic vs. aperiodic) and interactions. This will broaden its applicability to mineralogical correlations in trenching logs and potential training data for machine learning-based mapping techniques.

Paleosismología del Sistema de Fallas de Sabanalarga, Noroccidente de Colombia

Paleoseismology of the Sabanalarga Fault System, Northwestern Colombia

J. Gallego-Montoya[1, 2], H. Perea[3], A. Rendón[4], P. Valla[5] y F. Anselmetti[6]

1 Institute of Geological Sciences, University of Bern, Bern 3012, Switzerland.
2 Department of Earth and Ocean Dynamics, University of Barcelona, Barcelona 08028, Spain. jj.gallego.montoya@ub.edu
3 Institut de Ciències del Mar. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Barcelona 08003, Spain. hperea@icm.csic.es
4 Dept. Geosciences and Environment, National University of Colombia - Medellin, 050034, Colombia. arendonr@unal.edu.co
5 Institute of Earth Sciences, CNRS-Université Grenoble Alpes, Gières 38610, France. pierre.valla@univ-grenoble-alpes.fr
6 Institute of Geological Sciences and Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern 3012, Switzerland. flavio.anselmetti@geo.unibe.ch

Palabras clave: Cauca River Canyon, paleoseismology, paleoearthquake, liquefaction, Sabanalarga.

Resumen

Estudiamos diferentes formas de deformación tectónica en depósitos aluviales no consolidados a lo largo del cañón Interandino del Río Cauca, en el noroccidente de Colombia, como una aproximación al entendimiento de los paleoterremotos relacionados con la actividad reciente del Sistema de Fallas de Sabanalarga, el cual es uno de los sistemas de fallas más prominentes ubicado al oeste de la ciudad de Medellín. El estudio se basó en la evaluación de la actividad tectónica a través de la paleosismología de tres sitios con evidencias de fallamiento y licuefacción en sedimentos no consolidados que abarcan del Pleistoceno Medio al Holoceno. Se estimaron las edades de ocurrencia de varios paleoterremotos relacionados con el Sistema de Fallas de Sabanalarga y sus fallas secundarias, mediante la combinación de métodos de datación por fotoluminiscencia y radiocarbono, junto con el análisis paleosismológico e interpretación sedimentológica de trincheras y afloramientos. Se encontraron evidencias de al menos tres paleoterremotos en los últimos 30 mil años con magnitudes estimadas Mw entre 5.7 y 7.0, siendo los más recientes los ocurridos en el Holoceno, hace 4000 y 1100 años. Nuestros hallazgos indican que las fallas estudiadas tendrían bajas tasas de desplazamiento, pero con el potencial de producir terremotos con magnitudes significativas. Asimismo, los resultados obtenidos enfatizan la importancia de incorporar los estudios paleosismológicos en las evaluaciones de amenaza sísmica considerando la proximidad al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (~50 km), que incluye la ciudad de Medellín con 4 millones de habitantes y la presa Hidro-Ituango, sólo a 40 km aguas abajo del área de estudio.

Abstract

We studied different forms of tectonic deformation in non-consolidated alluvial deposits along the inter-Andean Cauca River Canyon in northwestern Colombia as a proxy for paleoearthquakes related to the recent activity of the Sabanalarga Fault System, which is one of the most prominent active faults in the western area of the city of Medellin. We aimed to evaluate the tectonic activity through a paleoseismological assessment of three sites with evidence for faulting and liquefaction events in unconsolidated sediments that cover from the Middle Pleistocene to the Holocene. Using a combination of luminescence and radiocarbon dating, along with paleoseismological analysis and sedimentologic outcrop and trench interpretations, we estimated the timing of the identified paleoearthquakes related to the Sabanalarga Fault System and its subsidiary faults. We found evidence for at least three earthquakes in the last ~30 ka with estimated moment magnitudes Mw ranging from 5.7 to 7.0, the most recent being those that occurred in the Holocene, 4 and 1.1 ka. Our findings indicate that the studied faults would have slow slip rates but the potential to produce significant high-magnitude earthquakes. Furthermore, the obtained results emphasized the importance of incorporating paleoseismological studies into seismic hazard evaluations considering the proximity to the Metropolitan Area of the Aburrá Valley (~50 km), which includes the city of Medellín with 4 million inhabitants and the Ituango dam, located only 40 km downstream from our study area.

Explorando las incertidumbres de los parámetros de falla en el Mar de Alborán a partir del modelado de tasas de sismicidad.

Exploring the uncertainties in fault source parameters in the Alboran Sea through earthquake rate modelling tools.

O. Gómez-Novell[1,2], H. Perea[3], M.J. Jiménez[4], M. García[4], L. Lozano[5], J. García-Mayordomo[6], J.L. Sánchez-Roldán[2], A. Canari[3], S. Martínez-Loriente[3]

1 Vicerectorat de Recerca, Universitat de Barcelona, España octgomez@ub.edu
2 Dept. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, España jl.sanchez.roldan@ucm.es
3 Institut de Ciències del Mar – CSIC, Barcelona, España hperea@icm.csic.es / acanari@icm.csic.es / smartinez@icm.csic.es
4 Museo Nacional de Ciencias Naturales – CSIC, Madrid, España mjjimenez@mncn.csic.es / mgarcia@mncn.csic.es
5 Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España lllopezdemedrano@mitma.es
6 Instituto Geológico y Minero de España, Tres Cantos, España julian.garcia@igme.es

Palabras clave: Mar de Alborán, tasas de sismicidad, slip rate, multi-falla, peligro sísmico

Resumen

El Mar de Alborán es una de las regiones más sísmicamente activas de Europa Occidental, acomodando parte importante de la convergencia NW-SE entre África y Eurasia. Las principales fallas de la zona han sido responsables de grandes terremotos (IEMS>IX) desde el período histórico, pero la gran mayoría tienen estimaciones pobres de la tasa de deslizamiento y actividad, y se conoce poco acerca de su capacidad para interactuar y romper en patrones de rotura complejos. En este estudio, calculamos varios modelos de tasas de ruptura sísmica para el Mar de Alborán con el código SHERIFS (Chartier et al. 2019) y utilizando un árbol sistemático de exploración de parámetros para determinar los parámetros de cada modelo. Basamos el árbol de exploración en variaciones de la tasa de deslizamiento y diferentes escenarios de ruptura multi-falla para investigar su incertidumbre epistémica. Para cuantificar la viabilidad de las tasas de terremotos calculadas de cada modelo, las comparamos con las tasas reales de sismicidad observadas en la región, priorizando aquellas que tienen un mejor ajuste para la evaluación del peligro sísmico. Los resultados de nuestro trabajo pueden fomentar la discusión entre los investigadores que trabajan en la zona y motivar nuevas investigaciones sobre el comportamiento de las fallas.

Abstract

The Alboran Sea is one of the most seismic regions of Western Europe, accommodating an important part of the NW-SE convergence between the African and Eurasian plates. The major faults within have been responsible of large earthquakes (IEMS>IX) since historical times, but most of them have poor slip and activity rate estimates, and their capability to interact and rupture in complex rupture patterns is poorly known. In this study, we compute several models of earthquake rupture rates for the Alboran Sea with the SHERIFS code (Chartier et al. 2019) and using a systematic parameter exploration tree to determine the parameters of each model. We base the exploration tree on slip rate variations and different multi-fault rupture scenarios to investigate their epistemic uncertainty. To check the feasibility of the computed earthquake rates of each model, we compare them with the real observed seismicity rates in the region, prioritizing those that perform better for the hazard assessment The results of our work may enhance discussion among researchers working in the area and motivate further investigations into fault behavior.

Referencias

Chartier, T., Scotti, O., Lyon-Caen, H. (2019). *Seismological Research Letters* 90 (4), 1678-1688 https://doi.org/10.1785/0220180332.

Un nuevo método para clasificar el rendimiento de simulaciones de terremotos basadas en la física

A new method to rank the performance of physics-based earthquake simulations

O. Gómez-Novell[1,2] F. Visini[3], B. Pace[4], J.A. Álvarez-Gómez[2], P. Herrero-Barbero[5]

1 Vicerectorat de Recerca, Universitat de Barcelona, España octgomez@ub.edu
2 Dept. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, España jl.sanchez.roldan@ucm.es
3 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Chieti, Italia francesco.visini@ingv.it
4 Università degli Studi "Gabriele d'Annunzio" di Chieti e Pescara, Chieti, Italia bruno.pace@unich.it
5 Geosciences Barcelona (GEO3BCN-CSIC), Barcelona, España pherrero@geo3bcn.csic.es

Palabras clave: Simulaciones de terremotos, nuevo método, peligro sísmico

Resumen

Los simuladores de terremotos basados en la física son una herramienta de modelado cada vez más popular en los estudios de peligrosidad sísmica, así como del comportamiento de las fallas, ya que son capaces de superar las limitaciones de completitud de los catálogos reales y porque permiten reproducir patrones complejos de roturas e interacción entre fallas. Un reto importante de estos modelos gira en torno a la selección de los parámetros físicos de entrada que permitan una mayor reproductibilidad de los terremotos en la naturaleza. Debido a la frecuente escasez de datos empíricos, estos parámetros de entrada a menudo se seleccionan mediante prueba y error y análisis de calidad cualitativos, cosa que puede comprometer la objetividad del modelado. En este trabajo presentamos un nuevo método para analizar y clasificar el rendimiento de catálogos de simulación de terremotos mediante la cuantificación del ajuste de dichos modelos a tres tipos de referencias (*benchmarks*) objetivas: a) relaciones empíricas, b) la forma de las distribuciones magnitud-frecuencia y c) las tasas de paleoterremotos. El método proporciona una aproximación objetiva y efectiva para la evaluación de la calidad de cada modelo, permitiendo identificar fácilmente aquellos modelos y combinaciones de parámetros de entrada que mejor replican las relaciones y el comportamiento natural de los terremotos. El método también facilita el análisis exhaustivo de gran cantidad de combinaciones de parámetros, identificando correlaciones sistemáticas entre parámetros y rendimiento del modelo. Los resultados de la clasificación pueden ser útiles para la peligrosidad sísmica, por ejemplo, para la ponderación de distintos modelos de tasas de ocurrencia de terremotos en un árbol lógico.

Abstract

Physics-based earthquake simulators are an increasingly popular modelling tool in earthquake forecasting for seismic hazard as well as fault rupture behavior studies due to their ability to overcome completeness limitations of real catalogues, and also because they allow reproducing complex fault rupture and interaction patterns. One important challenge of these models revolves around selecting the physical input parameters that will yield the better resemblance to earthquakes in nature. Due to the frequent scarcity of empirical data, such input parameters are often selected by trial-error exploration and qualitative model performance analyses, which can overall compromise the objectivity of the procedure. We present a new approach to analyze and rank the performance of simultaneous earthquake simulation catalogues by quantitatively scoring their combined fit to three objective benchmark types: a) earthquake scaling relationships, b) the shape of the magnitude-frequency distributions and c) the paleoearthquake rates. The approach provides an objective and effective approximation to model performance evaluation, allowing to easily identify the models and input parameter combinations that better replicate natural earthquake relations and behavior. The approach also facilitates the exhaustive analysis of many input parameter combinations, identifying systematic correlations between parameters and performance. The model ranking outputs might be useful for further analysis in seismic hazard, such as for the logic tree weighting of earthquake occurrence rate models.

Resultados de una nueva cartografía geológica de la falla de La Vall d´Uixó (Sierra del Espadán, Cordillera Ibérica).

Results of a new geological mapping of La Vall d´Uixó fault (Sierra del Espadán, Iberian Cordillera).

P. P. Hernaiz Huerta[1], M. Ollé López[2], E. Masana Closa[2], H. Perea Manera[3]

1 CN IGME_CSIC. c/ Calera 1, 28760, 28760 Tres Cantos, Madrid, p.hernaiz@igme.es
2 Dep. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, U de Barcelona. c/ Martí Franquès s/n, 08028 BCN, marcollelopez@gmail.com, eulalia.masana@ub.edu
3 Institut de Ciències del Mar_CSIC. Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49. 08003, BCN, hperea@icm.csic.es

Resumen: En el presente trabajo se describe la estructura de la falla de La Vall d´Uixó que se deduce de una nueva cartografía a escala 1:25.000, de cortes geológicos elaborados a partir de ella y de observaciones de su plano de falla. Con un movimiento esencialmente normal, la falla corta y traspone las estructuras contractivas de dirección ibérica y su funcionamiento se relaciona con la extensión neógena asociada a la apertura del surco de Valencia. También se han encontrado evidencias de movimientos en dirección sinestrales de incierta cronología relativa con los anteriores. La afectación del segmento septentrional de esta falla a unos abanicos aluviales asignados al Pleistoceno se interpreta como una reactivación de su actividad principal previa.

Palabras clave: Falla de La Vall d´Uixó, Extensión neógena, Tectónica activa, Sierra del Espadán. Cordillera Ibérica.

***Abstract**: This work describes the structure of the La Vall d'Uixó fault, as inferred from a new 1:25.000-scale mapping, geological cross-sections, and observation of its fault plane. With essentially normal movement, the fault cuts through and displaces the contractional Iberian structures, and its operation is related to the Neogene extension associated with the opening of the Valencia trough. Evidences of left lateral strike slip movements of uncertain relative chronology with the former ones have also been found. The affectation of the northern segment of this fault to alluvial fans assigned to the Pleistocene is interpreted as a reactivation of its previous main activity.*

***Key words**: La Vall d´Uixó fault, Neogene extension, Active tectonics, Sierra del Espadán, Iberian Cordillera.*

INTRODUCCIÓN

En su estudio de la tectónica activa del margen noroeste del Surco de Valencia y sobre la base de observaciones geomorfológicas, Perea (2006) identificó la falla de La Vall d´Uixó como una falla activa que podría haber sido generadora de sismicidad por deformación lenta, recomendando su estudio paleosísmico en el futuro. La falla de La Vall d´Uixó se localiza en el sector SO de la Sierra del Espadán correspondiente a la hoja de La Vall d´Uixó (Nº 668_II). Esta hoja ha sido recientemente cartografiada en el contexto del proyecto de cartografía geológica a escala 1:25.000 que el CN IGME-CSIC está realizando en convenio con el Institut Cartogràfic Valencià (ICV). La nueva cartografía evidencia la posible afectación de esta falla a unos abanicos aluviales cuaternarios en la zona citada por Perea (2006) a la vez que, por su escala de trabajo, aporta un buen detalle de la traza (o trazas) de esta falla en el sustrato, ofreciendo así datos adicionales sobre su estructura.

MARCO GEOLOGICO Y ANTECEDENTES SOBRE LA FALLA DE LA VALL D´UIXÓ

La Sierra del Espadán está separada de la contigua al sur Sierra Calderona por el río Palancia. Conjuntamente conforman la terminación SE del Sector Levantino de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica contra el litoral valenciano, constituyendo sendos dominios geológicos caracterizados por el predominio de las facies/unidades permo-triásicas clásicas (Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper). Sobre ellas se dispone muy parcialmente una cobertera jurásica esencialmente representada por sus formaciones del Jurásico Inferior y, en menor medida, del Jurásico Medio y Superior (Fig. 1).

El contexto geodinámico de los dominios de Espadán y Calderona está condicionado enteramente por el Ciclo Alpino, representado en la zona, de manera cronológica, por: 1) la extensión permo-triásica en la Cuenca Ibérica; 2) la compresión relacionada con la generación de la Cordillera Ibérica; y 3) la extensión neógena relacionada con la apertura del Golfo de Valencia. La estructura general, contractiva, de estas sierras responde a una tectónica de piel gruesa caracterizada por pliegues de amplio radio y dirección NO-SE a ONO-ESE típicamente ibérica, asociados a cabalgamientos y fallas

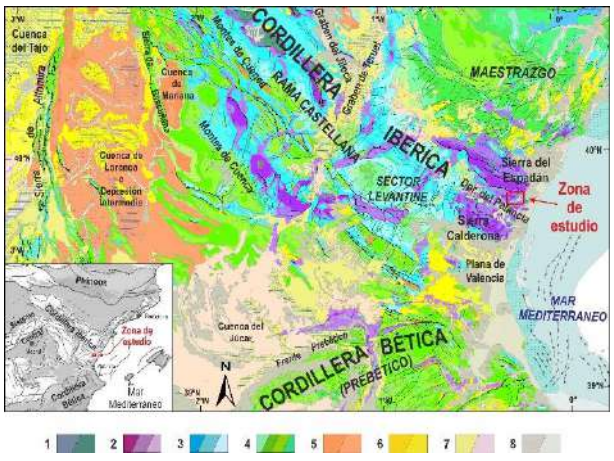


FIGURA 1. *Marco geológico de la zona de estudio (adaptado de IGME/LNEG, 2015). 1. Paleozoico; 2. Permo-Triásico; 3. Jurásico; 4. Cretácico; 5. Paleógeno; 6: Mioceno; 7: Plioceno; 8: Cuaternario*

inversas que involucran al basamento tectónico formado por el Paleozoico y las unidades permo-triásicas estructuralmente solidarias (tegumento). La cobertera, cuando está presente, se interpreta como despegada principalmente a favor del Keuper y plegada de manera disarmónica respecto al basamento, a veces con imbricaciones internas. En los sectores más próximos al litoral, la estructura contractiva dominante en ambas sierras se ve fuertemente distorsionada por la tectónica extensional neógena relacionada con la apertura del Surco de Valencia. Ésta se manifiesta principalmente en forma de una acusada red de fallas normales subparalelas a la costa que controlan el hundimiento de bloques en esa misma dirección.

La Figura 2 muestra el mapa geológico del entorno de la traza de la falla de La Vall d´Uixó y su leyenda. Las areniscas cuarcíticas del Buntsandstein B1, y la alternancia de areniscas micáceas y lutitas rojas del Buntsandstein B2 ocupan los núcleos de los anticlinales de dirección ibérica que aparecen distorsionados y desalineados por el efecto de las fallas normales de dirección NE-SO a NNO-SSE asociadas a la extensión neógena. En el anticlinal central, una de estas fallas permite el afloramiento de la alternancia de areniscas cuarcíticas y argilitas de tonos rojo vino del Pérmico (Pm), infrayacente al B1. Los flancos de los anticlinales y los núcleos de los sinclinales de enlace entre ellos están ocupados por las unidades del Muschelkalk (dolomías del M1, margas del M2, dolomías tableadas del M3 inferior - M3i - y margas dolomíticas y brechas del M3superior – M3s -). La sucesión jurásica (Jr) aflora relativamente completa (hasta el Titoniense), pero de forma discontinua, en los dos bloques orientales situados al S/SE del arroyo de la Font de Escales-Cerverola. El Keuper (Kp) se suele reconocer formando retazos discontinuos en su base. Depósitos terciarios que afloran en zonas próximas (M-Pl) no están representados en la Fig. 2. Una amplia red de abanicos aluviales (Qaa) que tapiza la zona se atribuye al Pleistoceno.

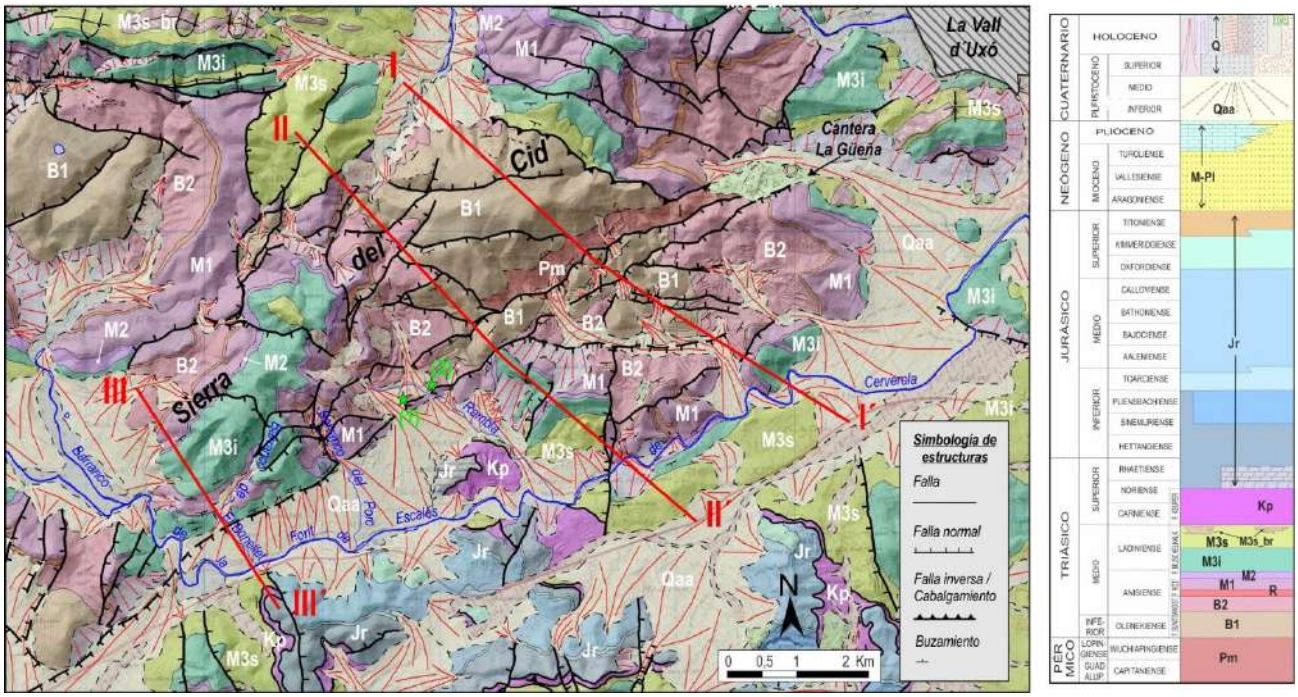


FIGURA 2. *Mapa geológico y leyenda del entorno de la falla de La Vall d´Uixó, adaptado de Hernaiz Huerta (2023). Las siglas de leyenda y mapa coinciden con las citadas en el texto. Se indica la posición de los cortes geológicos de la Fig. 4 y de los afloramientos de las Figs. 5 y 6 (pequeñas estrellas verdes señaladas 1 y 2, respectivamente).*

Perea (2006) relaciona la falla de La Vall d´Uixó con el segmento occidental, activo, del frente montañoso de la Sierra del Cid, que se sitúa inmediatamente al SO de esta localidad y al N/NO del arroyo de Font de Escales-Cerverola (Fig. 2). Y asociado a este frente activo, interpreta la localización de la pequeña cuenca de depósitos cuaternarios formados principalmente por abanicos aluviales que parten del mismo. En este sector, la presencia de la falla se deduce por su trazado rectilíneo que se intuye, sobre todo, en los mapas de sombras derivados de un MDT (Figura 3). En su esquema geomorfológico, este autor dibuja facetas triangulares

asociadas a la traza de la falla en un tramo concreto a lo largo del piedemonte, y prolonga la falla hacia el NE, dividida en dos segmentos dispuestos en relevo, hasta las proximidades de La Vall d´Uixó.

En los perfiles topográficos realizados en este sector, Perea (2006) destaca algunas inflexiones que parecen coincidir con las trazas de la falla allí donde se solapan los dos segmentos (al este de la rambla Cerverola). En el barranco de El Bonellet (Fig. 3), que atraviesa este último tramo, a escasos 50 m al sur de la supuesta traza de falla, el autor cita el afloramiento de un nivel encostrado a techo del abanico aluvial, desplazado unos 30 cm por una falla normal y roto por varias fracturas de tensión asociadas a ésta, lo que supone la principal evidencia de una actividad tectónica reciente en esta zona.

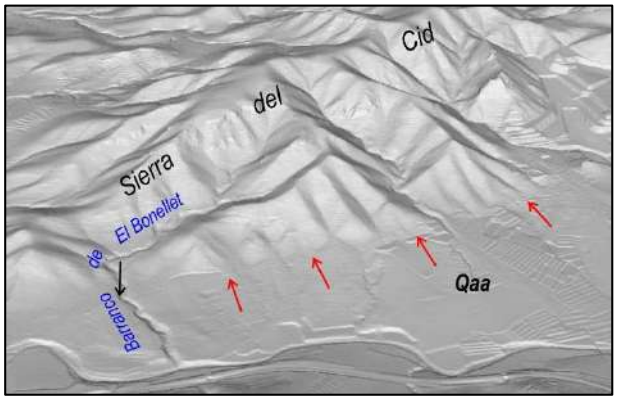


FIGURA 3. *Mapa de sombras (derivado del MDT-2m- del IGN) del frente montañoso activo de la Sierra del Cid. Se aprecia la alineación de la traza de la falla de La Vall d´Uixó (flechas rojas) atravesando la cabecera de los abanicos aluviales (Qaa). Se indica la posición del afloramiento del arroyo de El Bonellet citado en el texto (flecha negra).*

RESULTADOS

La estructura de la falla de La Vall d´Uixó

En el nuevo mapa geológico a escala 1:25.000, la traza de la falla de La Vall d´Uixó se ha representado en el citado sector de los barrancos de El Porc y El Bonellet como una falla (normal) supuesta afectando a los abanicos aluviales. Desde ahí se prolonga hacia el SO, igualmente cubierta por abanicos aluviales, hasta enlazar con la falla de La Boronía (Garay, 2001) cartografiada en sectores más meridionales de Sierra Calderona, donde limita claramente por el NO una pequeña cuenca terciaria (Hernaiz Huerta, 2022).

Desde el barranco de El Porc hacia el NE, la falla entra en el sustrato mesozoico desdoblada, como ya apuntara Perea (2006), en dos segmentos, los cuales se pueden seguir con relativa facilidad por el acusado contraste de las formaciones que ponen en contacto. De acuerdo con su posición relativa, aquí se van a denominar "segmento NO" y "segmento SE" (Fig. 2). Ambos segmentos son subparalelos, tienen un espaciado de 170 a 400 m entre ellos y su traza, aunque esencialmente rectilínea, presenta una ligera sinuosidad consistente con sus buzamientos en general altos (> 60º) al SE. En ambos casos, las formaciones o unidades que conforman los bloques situados al SE de cada segmento se ponen en contacto con formaciones o unidades más antiguas que conforman los bloques contiguos situados al NO, reproduciendo por tanto contactos cartográficos sustractivos generalmente asociados a fallas normales. Por ejemplo, en el segmento de falla SE destaca la confrontación de toda la sucesión dolomítica del Muschelkalk situada en el bloque de techo (descendente) contra las areniscas cuarcíticas del Buntsandstein B1 y la alternancia de areniscas y lutitas rojas del Buntsandstein B2 situadas en el bloque de muro, produciendo un salto vertical aparente de unos 250 m (Fig. 4; corte II-II´). La terminación hacia el NE de los dos segmentos queda oculta bajo los depósitos antrópicos de la cantera La Güeña (Fig. 2), resultando difícil verificar su posible continuidad hacia las inmediaciones de la localidad de La Vall d´Uixó.

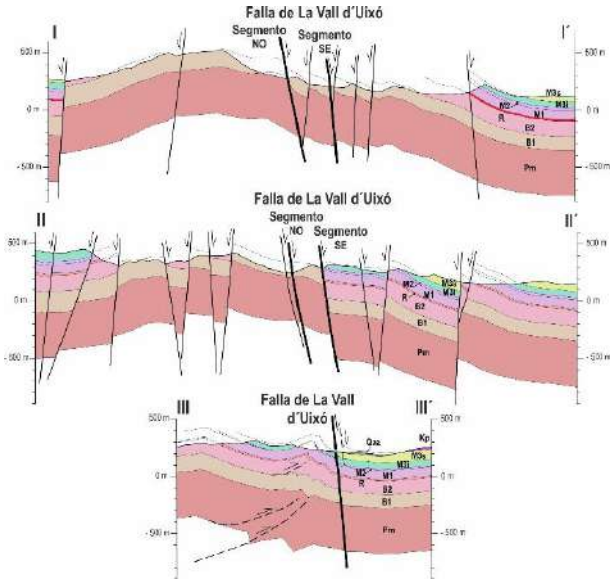


FIGURA 4. *Cortes geológicos de la zona de estudio (ver posición en la Fig. 2). La falla de La Vall d´Uixó se destaca con un trazo más grueso*

En conjunto, los dos segmentos de la falla de La Vall d´Uixó producen el hundimiento de la porción o bloque SE del anticlinal central al que afectan, con la consiguiente reducción espacial de su zona de charnela por la aproximación de sus flancos. La cartografía también muestra un aparente desplazamiento lateral hacia el NE de dicho bloque hundido (que sugeriría una cierta componente en dirección sinestral), pero es difícil de confirmar por la ausencia de puntos de referencia concretos a uno y otro lado de la falla. Tal y como muestra la cartografía y se refleja en los cortes, el desplazamiento en ambos segmentos de la falla es mayor en las transversales centrales del anticlinal y se amortigua hacia el SO, donde el único segmento de falla allí existente muestra un desplazamiento mínimo (Fig. 4; corte III-III´). En este sector SO, con un único segmento de falla, poco más se puede añadir a las observaciones realizadas por Perea (2006) salvo para precisar que las capas de las dolomías del Muschelkalk M1 y M3i a lo largo de la traza de la falla, tienen un buzamiento acusado (40-60º) hacia el SO y que, por tanto, la interpretación de las formas triangulares que se observan en el MDT y se intuyen en el paisaje como facetas asociadas al plano de la falla, debe ser tomada con precaución y revisada.

Observaciones en el plano de falla

Dos afloramientos, situados muy próximos entre sí, (Fig. 2), han permitido hacer observaciones del plano/zona de falla del segmento SE. En el afloramiento más occidental (Fig. 5), un plano de falla principal con un buzamiento medio de unos 45-55º al SE pone en contacto la base del Muschelkalk M1 con la parte alta del Buntsandstein B2, omitiendo la práctica totalidad del Röt (R). Esta unidad, con 20-30 m de espesor en la zona, sólo aparece representada en una pequeña esquirla inmediatamente por debajo y al pie del plano de falla. En este caso no hay exposición del plano de falla propiamente dicho ni, por tanto, de criterios cinemáticos sobre el mismo. Adicionalmente, en el bloque de muro se observan dos planos de falla subverticales, subparalelos y espaciados unos 2 m entre sí, afectando la serie lutítica roja del B2. Ambos planos que, en su parte alta acaban enraizando asintóticamente hacia el plano de falla principal, están parcialmente expuestos y muestran estrías subhorizontales con ángulos variables (10º-30º) indicando movimientos en dirección aparentemente sinestrales. Dado que los cabeceos de las estrías son tanto al SO como al NE, se trataría de movimientos sinestrales normales e inversos.

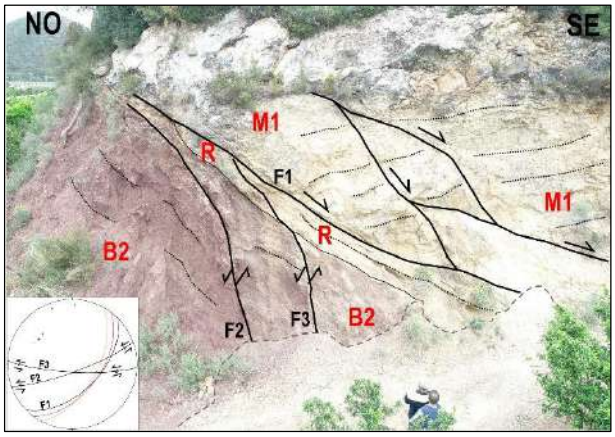


FIGURA 5. Afloramiento del segmento SE de la zona de la falla de La Vall d´Uixó (1, en la Fig. 2). Se incluye la proyección estereográfica (polos y planos) de la estratificación (en rojo) y de las fallas principales (en negro), con sus estrías, y el sentido de movimiento deducido.

En el afloramiento oriental se observa una zona de falla de unos 2-3 m de espesor que pone igualmente en contacto la base dolomítica del M1con la parte alta del B2, quedando el Röt completamente omitido (Fig. 6). La zona de deformación consiste en una harina de falla con una cierta fábrica "pseudo-S-C" desarrollada sobre los términos lutítico-margosos menos competentes, que engloba fragmentos sigmoidales de dolomías y areniscas limitados por fallas discretas. En este caso los planos de falla no muestran una exposición favorable para la observación de criterios cinemáticos, pero todos estos elementos en su conjunto son coherentes con un cizallamiento en dirección sinestro.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

De manera similar a lo observado en otras fallas equivalentes del resto de la región, y más concretamente de Sierra Calderona (Hernaiz Huerta, 2022, 2024), la falla de La Vall d´Uixó corta y traspone las estructuras contractivas de dirección ibérica y, por tanto, su funcionamiento se puede relacionar de manera general con la extensión Neógena asociada a la apertura del surco de Valencia. Este funcionamiento queda aún más acotado por la mencionada conexión hacia el sur con la falla de la Boronía que delimita y, posiblemente, haya controlado el depósito de una pequeña cuenca terciaria que culmina con calizas lacustres del Mioceno superior-Plioceno. El movimiento de la falla es eminentemente normal con omisión de serie estratigráfica en el bloque o bloques hundidos, pero también hay evidencias de movimientos en dirección sin que, de momento, se pueda discernir su cronología relativa. En ese contexto, la actividad subactual o reciente del segmento que afecta a los abanicos aluviales asignados regionalmente al Pleistoceno, se puede considerar, muy probablemente, como una reactivación de la actividad principal previa de esta falla. Estudios paleosísmicos detallados deberán determinar los pormenores de esta deformación más reciente y su posible relación con actividad sísmica.

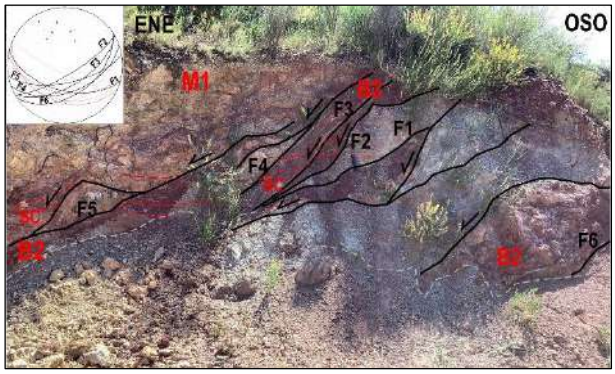


FIGURA 6. Afloramiento del segmento SE del plano de la falla de La Vall d´Uixó, (2, en la Fig. 2). Se incluye la proyección estereográfica (polos y planos) de las fallas principales (en negro) y de la "pseudo-fábrica SC" (planos "S" en rojo) asociada al cizallamiento.

REFERENCIAS

Garay, P. (2001): *El dominio triásico Espadán-Calderona. Contribución a su conocimiento geológico e hidrogeológico*. Tesis Doctoral, U. de Valencia, 692pp.

Hernaiz Huerta, P.P. (2022): *La estructura de Sierra Calderona (SE de la C. Ibérica): El colapso extensional neógeno de un edificio Permo-Triásico y Jurásico estratigráficamente complejo.* Guía de campo de la XXXIII Reunión de la Comisión de Tectónica, SGE, Madrid.

Hernaiz Huerta, P.P. (2023): Mapa geológico a escala 1:25.000 de la hoja de La Vall d´Uixó (668 II). En: *Proyecto de actualización de la Cartografía Geológica a escala 1:25k en el ámbito litoral de la Comunidad Valenciana (ICV_CN IGME, en elaboración) https://icv.gva.es/va/geocv25*.

Hernaiz Huerta, P. P. (2024): The geology of Sierra Calderona (SE Iberian Cordillera, Spain), a review. Results of a new 1:25.000 scale geological mapping. *Journal of Maps, 20:1, 2302363.*

IGME/LNEG (2015): *Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias a escala 1:1.000.000.* IGME, Madrid.

Perea, H. (2006): *Falles actives i perillositat sísmica al marge nordoccidental del solc de València.* Tesis Doctoral. U. de Barcelona, 382 pp

Análisis determinista de la respuesta sísmica en las Béticas Orientales (SE Iberia) a partir de la simulación de sismicidad sintética

Deterministic seismic response analysis in the Eastern Betics (SE Iberia) from physics-based earthquake modeling

P. Herrero-Barbero[1], J. A. Álvarez-Gómez[2], M. Tsige[2], J. J. Martínez Díaz[2]

1 Geociencias Barcelona CSIC (GEO3BCN-CSIC). 08028 Barcelona pherrero@geo3bcn.csic.es
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid jaalvare@ucm.es, meaza@ucm.es, jmdiaz@ucm.es

Palabras clave: Modelos físicos, Peligrosidad sísmica, Amplificación sísmica, Béticas Orientales

Resumen

La sismicidad histórica en las Béticas Orientales, aunque moderada, documenta terremotos destructivos desde el siglo XV. Conocer el comportamiento de estas grandes roturas sísmicas es esencial para evaluar el potencial movimiento del terreno. Abordamos este problema modelizando un catálogo sintético de roturas sísmicas asociadas a fallas regionales, mediante un simulador computacional de terremotos que reproduce la nucleación y propagación cosísmica. Las simulaciones sugieren eventos con magnitudes M_W>6.5, algunos resultado de multi-roturas complejas con tiempos de recurrencia de hasta 1 ka, respaldando evidencias paleosismológicas. Se seleccionan escenarios deterministas de terremoto máximo y otros asociados con ciertas probabilidades de superar una magnitud severa, en correlación con eventos históricos. La estimación de la aceleración pico del terreno (PGA) incluye la posible amplificación por influencia de los suelos a partir de una zonificación geológico-geotécnica regional. Los resultados muestran que áreas urbanas en el valle de Guadalentín y la costa alicantina podrían experimentar PGAs cercanos a 0.6 g. Desde M_W 6.0, se superarían valores críticos de 0.5 g en la cuenca de Bajo Segura y Murcia debido a la amplificación inducida por potentes depósitos arcillosos blandos. La geometría de la falla y las roturas múltiples también son factores determinantes. Esta aproximación determinista precede a futuras evaluaciones híbridas probabilistas de peligrosidad en las Béticas, donde es crucial el análisis local de propiedades dinámicas de suelos blandos.

Abstract

Historical seismicity in the Eastern Betics (SE Iberia), although moderate, includes some destructive earthquakes since the 15th Century. Understanding large seismic ruptures is key to determine the potential ground motion. We address this issue by modeling a synthetic rupture catalog associated with regional faults, using a physics-based earthquake simulator for rupture nucleation and propagation. Simulations suggest M_W>6.5 earthquakes are possible, some resulting from complex fault interactions with recurrence times of up to 1 kyr (Herrero-Barbero *et al.*, 2021), supporting paleoseismic evidence. Deterministic scenarios of maximum earthquakes and those likely to exceed a certain severe magnitude are selected, correlating with historical events. Peak ground acceleration (PGA) estimation includes possible soil amplification from a geology-based evaluation. The results show that urban areas along the Guadalentín valley and the Alicante coast could experience PGAs close to 0.6 g. From magnitude M_W 6.0, PGAs exceed critical values of 0.5 g at the Bajo Segura basin and Murcia city due to amplification induced by thick deposits of very soft clays. Fault geometry and multi-fault ruptures are also determining factors. This deterministic approach precedes upcoming hybrid probabilistic hazard assessments in the Betics, where local analysis of dynamic properties of soft soils is crucial.

Tasas de deformación y cinemática de fallas en la Cordillera Bética Oriental (Murcia-Alicante, SE España) basadas en datos GNSS

Deformation rates and fault kinematics in the Eastern Betic Cordillera (Murcia-Alicante, SE Spain) based on GNSS data

N. Jacobo-Quiñones[1], G. Khazaradze[2], P. Alfaro[3], A. Gil-Cruz[4,5], I. Martin-Rojas[3], A. Staller[6]

1 Alumna de Máster en Recursos Minerales y Riesgos Geológicos, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain. njacobqu7@alumnes.ub.edu
2 RISKNAT Group, GEOMODELS Research Institute, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain. gkhazar@ub.edu
3 Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03080 Alicante, Spain. ivan.martin@ua.es, pedro.alfaro@ua.es
4 Departamento Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, Campus de Las Lagunillas, 23071 Jaén, Spain.
5 Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA), Universidad de Jaén, Campus de Las Lagunillas, 23071 Jaén, Spain. ajgil@ujaen.es
6 Universidad Politécnica de Madrid. Res. Gr. TERRA: Geomatics, Natural Hazards and Risks. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía C/ Mercator, 2, 28031 Madrid, Spain. a.staller@upm.es

Resumen: En la presente comunicación se describen las actividades colaborativas entre las universidades de Barcelona, Alicante, Jaén y Politécnica de Madrid, que se están llevando a cabo para determinar la deformación y cinemática de las fallas presentes en las provincias de Murcia y Alicante, dentro del dominio tectónico de la Cordillera Bética Oriental (CBO). Este trabajo pretende determinar los valores actuales de los vectores de deformación geodésica del sector de estudio en la CBO a partir de los datos disponibles y de los proporcionados por nuevas campañas GNSS. Los resultados obtenidos permitirán conocer las características de la deformación actual tanto a escala de las placas tectónicas (Nubia y Eurasia), como a escala regional. Además, a partir de la interpretación geológica y tectónica de los nuevos resultados, se determinarán el campo de deformación y la cinemática de las fallas de la zona. Esto permitirá a su vez identificar cuáles son las fallas más activas, es decir, aquellas que tienen una mayor peligrosidad sísmica.

Palabras clave: GPS, cinemática de fallas, terremotos, tectónica activa, Cordillera Bética Oriental

Abstract: *This communication describes recent and planned collaborative research activities that are being carried out between the universities of Barcelona, Alicante, Jaen, and Politécnica de Madrid, with the main objective of determining the deformation and kinematics of the faults present in the provinces of Murcia and Alicante, within the tectonic domain of the Eastern Betic Cordillera (EBC). This work aims to determine the current state of the geodetic deformation rates in the study sector, based on the analysis of the past geodetic data and the realization of new GNSS campaigns. The obtained results will allow a better characterization of the ongoing geodynamic processes of the studied area, including the determination of the present-day crustal deformation rates both on the scale of the tectonic plates (Nubia and Eurasia) and on a regional scale. Furthermore, based on the geological and tectonic interpretation of the new results obtained, the deformation field and the kinematics of the faults in the area will be determined. This will in turn allow us to identify which are the most active faults, that is, those that may pose a greater seismic hazard for the population and infrastructure in the area.*

Key words: *GPS, fault kinematics, earthquakes, active tectonics, Eastern Betic Cordillera*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En la presente comunicación se describen las actividades que se están llevando a cabo actualmente para determinar la deformación y cinemática de las fallas presentes en las provincias de Murcia y Alicante, dentro del dominio tectónico de la Cordillera Bética Oriental (CBO) (Fig. 1).

Mediante el empleo de los sistemas GNSS (incluyendo GPS) es posible determinar, entre otros, el movimiento intersísmico de las fallas, el cual es responsable de la acumulación de deformación y esfuerzos. Esto proporciona indicios de las zonas donde podrían producirse futuros terremotos. Por tanto, a partir de la medición de la deformación mediante sistemas GNSS podemos identificar las fallas y estructuras geológicas actualmente activas y conocer su tasa de desplazamiento geodésica. Estos datos ayudan a conocer el potencial sísmico de las fallas y, consecuentemente, mejorar la evaluación de la peligrosidad sísmica de la zona.

Este trabajo pretende determinar los valores actuales de los vectores de velocidad del sector de estudio en la CBO a partir de los datos disponibles y de la realización de nuevas campañas de adquisición de datos mediante técnicas GNSS. Estos datos permitirán conocer las características de la deformación actual tanto a escala de las placas tectónicas (Nubia y Eurasia), como a escala regional.

Además, a partir de la interpretación geológica y tectónica de los nuevos resultados obtenidos, se determinarán las tasas de deformación (*strain rates*) y la cinemática de las fallas de la zona. Esto permitirá a su vez identificar cuáles son las fallas más activas, es decir, aquellas que tienen una mayor peligrosidad sísmica.

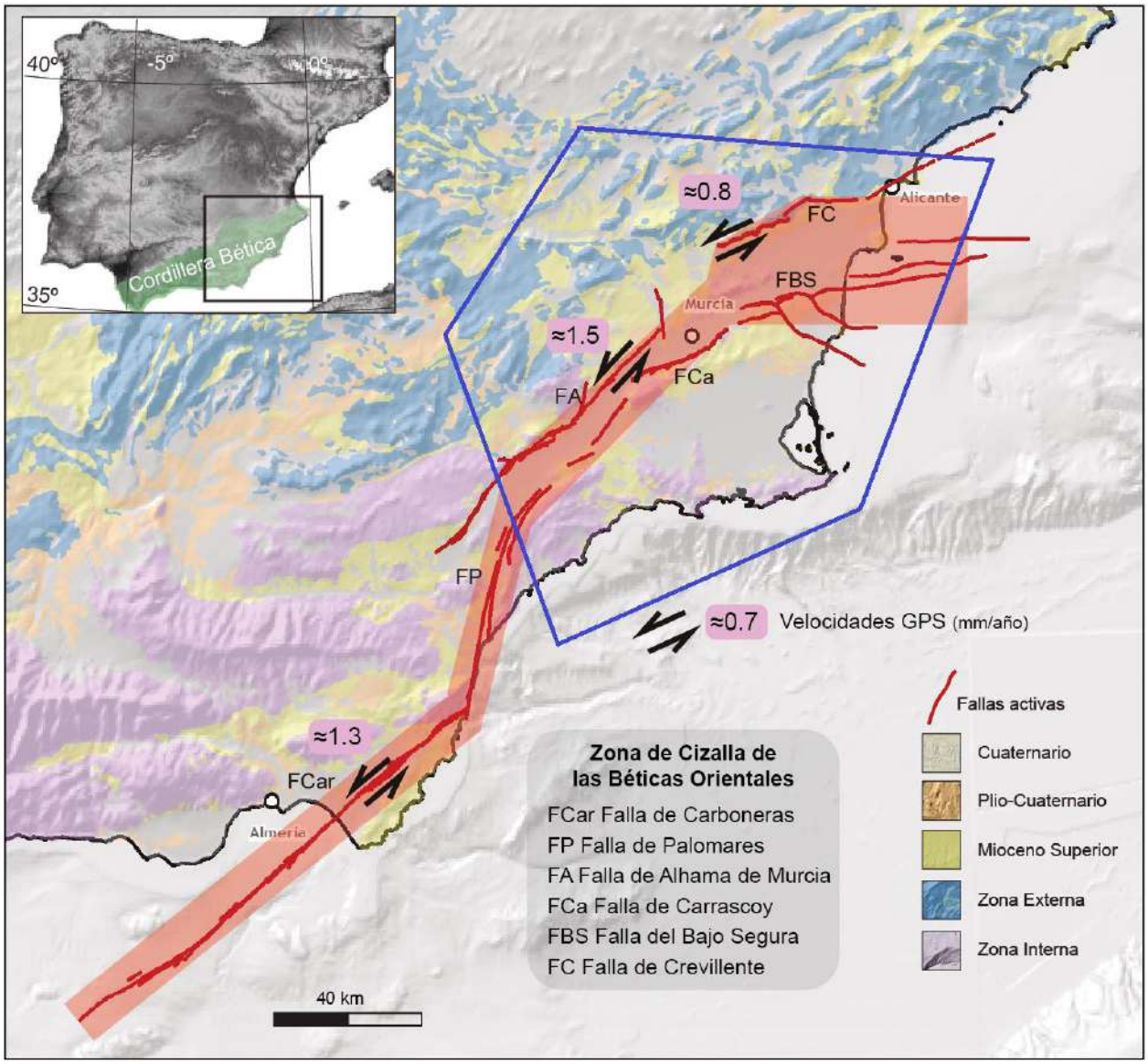


FIGURA 1. *Localización geográfica del área de estudio (líneas azules) con el mapa geológico simplificado la Cordillera Bética Oriental. Las líneas rojas indican las fallas activas de QAFI* (García-Mayordomo et al., 2012). *La franja rojiza indica la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO).*

CONTEXTO TECTÓNICO

La Cordillera Bética es un cinturón montañoso generado por la convergencia entre las placas Euroasiática y de Nubia (África) durante la orogenia Alpina (Alonso-Chaves et al., 2004). En concreto, nuestra zona de estudio se localiza en la parte meridional de la CBO, que es una de las regiones tectónicamente más activas de la Península Ibérica, con una sismicidad baja a moderada (M_W<6) y, puntualmente, con terremotos destructivos, como el terremoto histórico de Torrevieja de 1829 (Martínez-Solares, 2023). Esto es debido a que en dicha zona existe una de las estructuras de escala cortical más activas, la denominada Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO) (Fig. 1) (Silva et al., 1993). La ZCBO es un corredor tectónico compuesto principalmente por un conjunto de fallas de desgarre sinistral, aunque observándose también fallas inversas oblicuas, con direcciones que van de N-S a SW-NE. Esta zona de cizalla es la encargada de acomodar parte del movimiento de dirección NW-SE producido por la convergencia entre las placas Euroasiática y de Nubia.

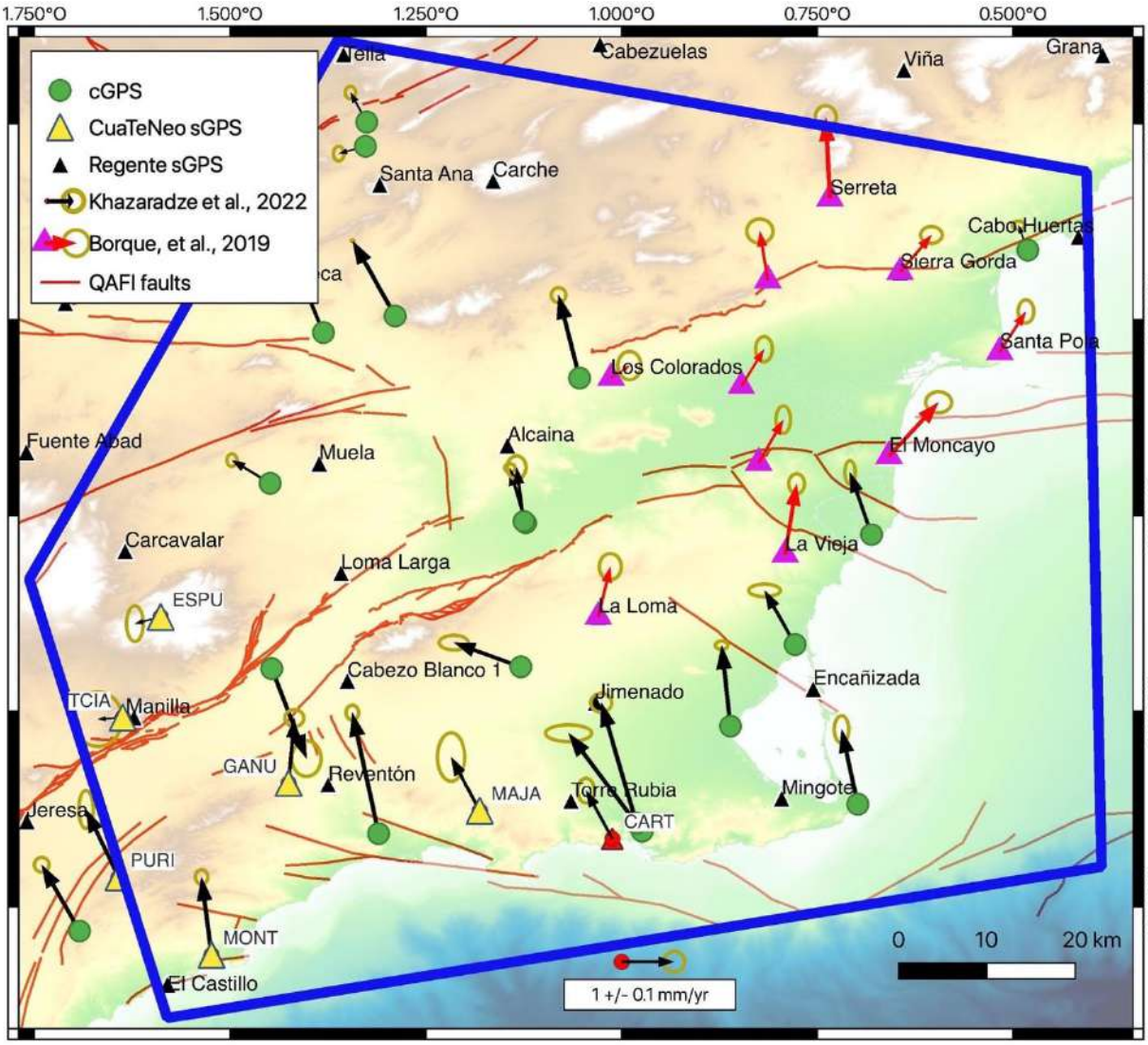


FIGURA 2. *Mapa de vectores de velocidad residual con respecto a Eurasia fija (ITRF2014) en la zona de estudio (polígono azul), calculado a partir de procesado de datos GNSS continuos y de campañas episódicas* (Borque et al., 2019; Khazaradze et al., 2022).

Las principales fallas activas de este corredor tectónico son las de Bajo-Segura, Carrascoy, Alhama de Murcia, Palomares y Carboneras.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta en el presente trabajo se basa, en primer lugar, en la recopilación de los datos de mediciones GNSS previas de la red de estaciones continuas (cGPS), entre las que se encuentran: ERGNSS (red geodésica permanente del Instituto Geográfico Nacional (IGN)), REGAM (red geodésica permanente de la Región de Murcia) o ERVA (red geodésica de la Comunidad Valenciana). También se recopilan los datos de estaciones episódicas (sGPS), de las cuales podemos destacar la red CuaTeNeo (Echeverria et al., 2013), perteneciente a la Universitat de Barcelona (UB); la red Regente del IGN (Barandillo-Fernández y Quirós-Donate, 1996) o la red GESE-CV (Borque et al., 2019) (Fig. 2). Junto con estos datos previos se llevarán a cabo nuevas campañas de medición GNSS en los puntos de especial interés. En primer lugar, mediremos algunos puntos de la red CuaTeNeo, como los de ESPU y GANU, que no han sido medidos durante años. También se medirán algunos puntos de la red Regente de los que se dispone de pocos datos para la determinación de velocidades estadísticamente significativas.

El conjunto de datos recopilados será procesado de forma homogénea. Para ello, se empleará el software GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2010) desarrollado por el Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT).

Inicialmente, los datos se procesarán empleando el programa GAMIT, a partir del cual se conseguirá una primera estimación de las coordenadas de las estaciones procesadas. A continuación, se empleará GLOBK, donde se introducirán los datos resultantes de GAMIT para obtener las soluciones de las posiciones diarias de las estaciones (series temporales) y sus velocidades horizontales. Posteriormente, a partir de las velocidades obtenidas en cada estación, se procederá a calcular las tasas de deformación horizontal mediante el software SSPX (Cardozo y Allmendinger, 2009).

Por último, se procederá a la interpretación geológica y tectónica de los resultados obtenidos, determinando de

esta manera la cinemática de las fallas de la zona de estudio (Fig. 2).

RESULTADOS ESPERABLES

A continuación, se enuncian las tareas y los resultados que se esperan obtener en este trabajo que actualmente se está desarrollando:

- Realizar nuevas campañas de observación GNSS de varios puntos sGPS (CuaTeNeo, Regente, …) en la zona de estudio.

- Elaborar mapas con la representación de las velocidades GNSS en 2D y 3D con los nuevos datos obtenidos, junto con las tablas asociadas.

- Calcular las tasas de deformación (*strain rates*), con el objetivo de identificar las fallas activas y las zonas con más deformación.

Estos resultados permitirán actualizar en un futuro los mapas de peligrosidad sísmica del área de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto NSOURCES (PID2020-119772RB-I00), GeoActiva (CGL2017-83931-C3-3-P) y TALMUR (PID2021-127967NB-I00), financiados por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033. También del proyecto AICO/2021/196, financiado por la Generalitat Valenciana. El Institut Cartogràfic Valencià, la Agencia Valenciana de Seguridad y Respuesta a las Emergencias (Generalitat Valenciana), el Consorcio Provincial para el Servicio de Prevención y Extinción de Incendios y Salvamento de Alicante, las Excelentísimas Diputaciones Provinciales de Alicante y Castellón y el Ayuntamiento de Almoradí también han financiado esta investigación.

REFERENCIAS

Alonso-Chaves, F. M., B. Andreo, C. Arias, J.M. Azañón, J.C. Balanyá, A. Barón, et al. (2004). Cordillera Bética y Baleares. En J. A. Vera (Ed.), *Geología de España*, ISBN 8478405461, 347–464.

Barandillo-Fernández, A. y Quirós-Donate, R. (1996). Proyecto REGENTE Una nueva red geodésica Nacional. *Física de La Tierra*, *8:* 23–38.

Borque, M. J., Sánchez-Alzola, A., Martin-Rojas, I., Alfaro, P., Molina, S., Rosa-Cintas, S., et al. (2019). How much Nubia-Eurasia convergence is accommodated by the NE end of the Eastern Betic Shear Zone (SE Spain)? Constraints from GPS velocities. *Tectonics*, *38*(5): 1824–1839.

Cardozo, N. y Allmendinger, R. W. (2009). SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data. *Computers and Geoscinces*, *35*(6): 1343–1357.

Echeverria, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Dávila-Martín, J. y Suriñach, E. (2013). Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. *Tectonophysics*, 608: 600–612.

García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J. M., Martínez-Díaz, J. J., Jiménez-Díaz, A., Martín-Banda, R., Martín-Alfageme, S., et al. (2012). The Quaternary active faults database of Iberia (QAFI v.2.0). *Journal of Iberian Geology*, *38*(1): 285–302.

Herring, T., King, R. W. y McClusky, S. (2010). *Introduction to GAMIT/GLOBK*. *Mass. Inst. of Technol., Cambridge, Mass*. Cambridge, MA, USA, 48.

Khazaradze, G., Pena-Castellnou, S., Romanyà-Serrasolsas, M., Matarín-Aguilar, X. y Vernant, P. (2022). Present-day 3D crustal deformation field of the Iberian Peninsula. En *IV Reunión Ibérica sobre fallas Activas y Paleosismología (IberFault 2022)*, ISBN 978-84-18321-58-0, 151–154.

Martínez-Solares, J. M. (2023). Sismicidad histórica de la Península Ibérica. *Física de La Tierra*, *15*: 13–28.

Silva, P.G., Goy, J.L., Somoza, L., Zazo, C. y Bardají, T. (1993). Landscape response to strike-slip faulting linked to collisional setting: Quaternary tectonics and basin formation in Eastern Betics, southeastern Spain. *Tectonophysics*, *224*(4): 289-303.

Estudio morfotectónico de la isla de Cefalonia (mar Iónico, Grecia) para identificar fallas activas capaces de generar grandes terremotos.

Morphotectonic study of the Cephalonia Island (Ionian Sea, Greece) to identify active faults capable of generating large earthquakes.

P. León[1], H. Perea[2], J. Molins-Vigatà[1] y A. Canari[1,2]

1 RISKNAT Research Group, GEOMODELS Research Institute, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. jmolinsvigata@ub.edu, pleondom55@alumnes.ub.edu, acanari@icm.csic.es.
2 Dpto. Geociencias Marinas, Institut de Ciències del Mar – CSIC, 08003 Barcelona. hperea@icm.csic.es, acanari@icm.csic.es.

Palabras clave: Morfología tectónica, Red de drenaje, Mapas de relieve, Índices morfométricos, Fallas inversas

Resumen

La isla de Cefalonia, situada en el mar Iónico (Grecia), es una zona con una alta actividad sísmica, como se constata por la ocurrencia de dos terremotos destructivos en los últimos 80 años. Este estudio pretende identificar aquellas zonas de la isla con mayores evidencias de actividad tectónica cuaternaria con el objetivo de revelar la presencia de fallas activas. Para lograrlo, se han llevado a cabo análisis exhaustivos del modelo digital de elevación (MDE) de 30 m de la isla, empleando tanto herramientas de visualización del relieve como el cálculo de diferentes índices morfométricos. Como resultado, se ha generado un mapa de relieve rojo-azul para examinar los rasgos geomorfológicos y la topografía del área, destacando su ventaja de ser una visualización independiente de la iluminación incidente. Además, se ha aplicado el método de *Local Relief* para detectar las variaciones en el relieve y analizar la evolución del paisaje. En cuanto a los índices morfométricos, se han utilizado el KSN y el CHI para identificar posibles anomalías en la red de drenaje. Los resultados obtenidos nos han permitido identificar aquellas zonas de la isla que podrían ser más activas y estar relacionadas con la presencia de fallas. Posteriormente, llevamos a cabo un análisis en detalle de algunas de estas zonas utilizando un MDE de 5 m, siguiendo las mismas metodologías de análisis morfométrico que para el MDE de 30 m. De esta manera, se ha determinado con mayor detalle aquellas zonas que muestran evidencias morfológicas de mayor actividad tectónica y que podrían estar relacionadas con la presencia de fallas activas en la isla de Cefalonia. Este estudio puede ser utilizado para la planificación de trabajos de reconocimiento de campo en la isla.

Abstract

The Cephalonia Island, located in the Ionian Sea (Greece), is an area with a high seismic activity, as evidenced by the occurrence of two destructive earthquakes in the last 80 years. This study aims to identify those areas of the island with the greater evidence of Quaternary tectonic activity in order to reveal the presence of active faults. To achieve this, various analyses of the 30 m digital elevation models (DEMs) of the island were carried out, using both relief visualization tools and the calculation of different morphometric indices. As a result, a Red-Blue Relief Map has been generated to examine the geomorphological features and topography of the area, highlighting its advantage of being a visualization independent of incident illumination. In addition, the Local Relief method has been applied to detect relief variations and to analyze the landscape evolution. The morphometric indices used were KSN and CHI to identify anomalies in the drainage network. The results obtained allowed us to identify those areas of the island that could be more active and related to faults. Subsequently, we carried out a detailed analysis of some of these areas using 5 m DEM, following the same morphometric analysis methodologies as for the 30 m DEM. In this way, it has been determined in more detail those zones that show morphological evidence of greater tectonic activity and that could be related to the presence of active faults in the Cephalonia Island. This study can be used for the scheduling of field survey work in the island.

Formación experimental a velocidades sísmicas de espejos de falla en cataclasitas dolomíticas de la base del manto de Somiedo (Zona Cantábrica).

Experimental fault mirrors at seismic velocities in dolomitic cataclasites from the base of the Somiedo nappe (Cantabrian Zone).

S. Llana Fúnez[1], N. De Paola[2], G. Pozzi[2,3], M.I. de Paz Álvarez[1] y J.L. Alonso[1]

1 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005 Oviedo. llanasergio@uniovi.es, midepaz@outlook.es, jlalonso@uniovi.es
2 Department of Earth Sciences, Rock Mechanics Laboratory, Durham University, DH1 3LE Durham, RU. nicola-de-paola.@durham.ac.uk
3 Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Rome 00143, Italia. giacomo.pozzi@ingv.it

Palabras clave: experimentos de fricción, cataclasitas, dolomías, terremotos, cabalgamientos cantábricos

Resumen

Este trabajo presenta resultados mecánicos y microestructurales de ensayos de fricción en muestras pulverizadas de cataclasitas dolomíticas. Los ensayos se realizaron con un aparato de torsión de baja a alta velocidad en condiciones de velocidad sísmica (>1 m/s) y a 15-25 MPa de confinamiento. Las muestras proceden de la zona de cizalla basal del manto de Somiedo que, con un desplazamiento estimado de 19 km, constituye uno de los principales cabalgamientos del cinturón de pliegues y mantos del orógeno Varisco en el noroeste peninsular.

En las condiciones experimentales, las muestras desarrollan en el centro una superficie principal de deslizamiento, que concentra el desplazamiento, y que lleva asociada una reducción de tamaño de grano. Durante el movimiento, el coeficiente de fricción dinámico cae a valores de 0,2-0,3 desde el estático de 0,6-0,8. En todas las muestras ensayadas a velocidades de >1 m/s, esta superficie de deslizamiento presenta brillo y surcos de abrasión, también con brillo. La aparición de superficies que reflejen la luz sobre esta superficie de deslizamiento principal requiere, para producirse, de una reducción sustancial de porosidad durante el movimiento. Las propiedades térmicas de las cataclasitas dolomíticas permiten que, durante la fricción a tasas de movimiento elevado, el pico térmico sea de suficiente magnitud como para favorecer la recristalización local y, por tanto, la formación de los espejos de falla experimentales.

Abstract

In this contribution we present mechanical and microstructural results from friction tests in powdered dolomitic cataclasites. The tests were run in a low to high velocity resolved shear apparatus at seismic velocities (>1 m/s) and at 15-25 MPa confining pressure conditions. The samples come from the basal shear zone of the Somiedo nappe which, with an estimated displacement in excess of 19 km, constitutes one of the main thrusts within the foreland fold and thrust belt of the variscan orogen in Western Iberia.

At the experimental conditions, the samples develop a principal slip surface in the middle, which localizes displacement, accompanied by a reduction in grain/fragment size. During the slip, the dynamic friction coefficient drops to 0,2-0,3 from static values of 0,6-0,8. In all samples tested at velocities >1 m/s, the slip surfaces and associated abrasion grooves are shiny. The development of slip surfaces reflecting visible light require a substantial reduction in porosity during the slip. Thermal properties of dolomitic cataclasites during friction at high velocities allow the development of a temperature peak of sufficient magnitude to allow local recrystallization of fault rocks and the formation of observed experimental fault mirrors.

Acortamiento activo simultáneo a un fallamiento normal: la falla de Ventas de Zafarraya.

Active shortening simultaneous to normal faulting: the Ventas de Zafarraya Fault

A. Madarieta-Txurruka[1], L. González-Castillo[1], J.A. Peláez[2], J. GalindoZaldívar[1,3], M. J. Borque[4,5], M.C. Lacy[4,5], A.M. Ruiz-Armenteros[4,5], J. Henares[6], P. Ruano[1,3], A. Sánchez-Alzola[7], M. Avilés[4], G. RodríguezCaderot[8], F.J. Martínez-Moreno[9], V. Tendero-Salmerón[1,3], R. Vinardell-Peña[4], A.J. Gil[4,5]

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, Spain. amadatxu@ugr.es, lgcastillo@ugr.es, jgalindo@ugr.es, pruano@ugr.es, vtendero@ugr.es
2 Departamento de Física, Universidad de Jaén, Jaén, Spain. japelaez@ujaen.es
3 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Granada, Spain
4 Departamento Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, Jaén, Spain. mjborque@ujaen.es, mclacy@ujaen.es, amruiz@ujaen.es, maviles@ujaen.es, vinardellrp@gmail.com, ajgil@ujaen.es
5 Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA), Universidad de Jaén, Spain
6 Universidad Internacional de La Rioja, Logroño, La Rioja, Spain. jesus.henares@unir.net
7 Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Cádiz, Puerto Real, Spain. alberto.sanchez@uca.es
8 Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain. grc@mat.ucm.es
9 Departamento de Geodinámica, Paleontología y Estratigrafía, Universidad Complutense de Madrid, Spain. fjmmoreno@ucm.es

Palabras clave: Redes GNSS, relocalización de terremotos, fallas normales, plegamiento, Cordillera Bética

Resumen

La extensión somera ENE-WSW de la Cordillera Bética central se debe a la actividad del sistema extensional de la Cuenca de Granada (Madarieta-Txurruka *et al.*, 2021). La combinación de datos geofísicos, geodésicos y geológicos revela que el límite suroccidental de este sistema extensional es un frente compresional sísmicamente activo. Los datos GNSS determinan un acortamiento NNE-SSW de hasta 2 mm/año del frente compresional en el polje de Zafarraya. En este contexto, la falla normal de Ventas de Zafarraya se desarrolla como resultado de la extensión por la flexión en el arco externo del pliegue (Li *et al.*, 2018) de Sierra de Alhama y se reactivó por última vez durante el terremoto de Andalucía de 1884 (~ Mw 6.5). El levantamiento en la Cordillera Bética central puede facilitar el colapso gravitacional (Rey *et al.*, 2001) y la corteza heterogénea de la Cordillera Bética generaría el frente compresional.

Abstract

The shallow ENE-WSW extension of the central Betic Cordillera is accommodated by the extensional system of the Granada Basin (Madarieta-Txurruka *et al.*, 2021). The combination of geophysical, geodetic and geological data reveals that the southwestern boundary of this extensional system is a seismically active compressional front. The GNSS data determine a NNE-SSW shortening of up to 2 mm/year of the compressional front in the Zafarraya Polje. In this setting, the Ventas de Zafarraya normal fault develops as a result of the bending-moment extension (Li *et al.*, 2018) of the Sierra de Alhama antiform, being last reactivated during the 1884 Andalusian earthquake (~ Mw 6.5). The uplift in the Central Betic Cordillera may facilitate a gravitational collapse (Rey *et al.*, 2001), and the heterogeneous crust of the Betic Cordillera would generate the compressional front.

Referencias

Li, T., Chen, J., Thompson Jobe, J. A., Burbank, D. W., Cheng, X., Xu, J., *et al.* (2018). *Tectonics*, *37*(8), 2278–2306, doi: 10.1029/2018TC004982

Madarieta-Txurruka, A., Galindo-Zaldívar, J., González-Castillo, L., Peláez, J.A., Ruiz-Armenteros, A.M., Henares, J., *et al.* (2021). *Tectonics*, 40(7), doi: 10.1029/2021TC006715

Rey, P., Vanderhaeghe, O. y Teyssier, C. (2001). *Tectonophysics*, 342(3-4), 435-449, doi: 10.1016/S0040-1951(01)00174-3

Hacia la creación de un catálogo de fallas potencialmente activas para la aplicación práctica de la nueva normativa sismorresistente española (NCSR-23 / Eurocódigo-8)

Towards the creation of a catalogue of potentially active faults for the implementation of the new Spanish seismic-resistant building code (NCSR-23 / Eurocode-8)

R. Martín-Banda[1], A. Madarieta-Txurruka[2], V. Tendero-Salmerón[3], L. González-Castillo[4], J. Galindo-Zaldívar[4], O. Gómez-Novell[5], J. Molins-Vigatà[6], M. Ollé-López[6], M. Ortuño[6], J.J. Martínez-Díaz[5], I. Martín-Rojas[7], A. Echeverria[8], Á. González[9], J.L. Simón[10], J.T. Vázquez[11], F. Martín-González[12] y J. García-Mayordomo[13]

1 Instituto Geológico y Minero de España – CSIC, 41013 Sevilla. r.martin@igme.es
2 Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, UPV/EHU, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa. asier.madarieta@ehu.eus
3 Institut de Ciències del Mar, CSIC, Grupo de Márgenes Continentales, 08003 Barcelona, España. vtendero@icm.csic.es
4 Dpto. Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada. lgcastillo@ugr.es; jgalindo@ugr.es
5 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, 28040, jmdiaz@ucm.es
6 Dept. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, GRC RISKNAT, IR Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028, marc.olle@ub.edu; jmolinsvigata@ub.edu; maria.ortuno@ub.edu
7 Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universitat d'Alacant, Carr. De San Vicente del Raspeig, s/n, 03690, ivan.martin@ua.es
8 Andorra Recerca+Innovació, Av. Rocafort 21-23, AD600 Sant Julià de Lòria, Andorra. aecheverria@ari.ad
9 Centre de Recerca Matemàtica, Campus UAB, Edifici C, 08193 Bellaterra (Barcelona), agonzalez@crm.cat
10 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, jsimon@unizar.es
11 Centro Oceanográfico de Málaga, Instituto Español de Oceanografía - CSIC, 29640 Fuengirola, Málaga. juantomas.vazquez@ieo.csic.es
12 Área de Geología, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, 28933 Madrid, Spain. fidel.martin@urjc.es
13 Instituto Geológico y Minero de España – CSIC, 28760 Tres Cantos, Madrid. Julian.Garcia@igme.es

Resumen: Por primera vez en España, el proyecto de la nueva norma de construcción sismorresistente (NCSR-23), basado en el Eurocódigo-8, contempla la presencia de fallas potencial o sísmicamente activas como condicionante del diseño, y las define como aquellas que presentan una tasa de deslizamiento media ≥ 1 mm/año, evidencia de ruptura en la superficie del terreno en los últimos 129.000 años, o registro sismológico instrumental, histórico, arqueológico o geológico asociado. A partir de la Jornada sobre Fallas Activas y la NCSR-23, celebrada el 18 de septiembre de 2023 en el IGME (Madrid), han surgido cuatro grupos de trabajo con el fin de elaborar el catálogo de fallas para la aplicación práctica de la norma, su representación espacial teniendo en cuenta las distancias horizontales críticas entre las estructuras y las fallas y las recomendaciones para estudios específicos. Adicionalmente, se pretende analizar la coherencia entre el periodo de retorno de diseño de las estructuras y el periodo de recurrencia de terremotos máximos en las fallas activas. El punto de partida es la base de datos de fallas activas en el Cuaternario de Iberia, QAFI. En este trabajo, presentamos la metodología de trabajo empleada y algunos resultados preliminares.

Palabras clave: fallas activas, QAFI, normativa sismorresistente

Abstract: *For the first time in Spain, the draft of the new seismic-resistant building code (NCSR-23), based on Eurocode-8, considers the presence of potentially or seismically active faults as a conditioning factor, and defines them as those with an average slip rate ≥ 1 mm/year, evidence of surface rupture in the last 129,000 years, or associated instrumental, historical, archaeological or geological seismological record. Four working groups have emerged from the Conference on Active Faults and the NCSR-23, held on 18 September 2023 at the IGME (Madrid), with the aim of compiling the catalogue of faults for the application of the code, their spatial representation based on the critical horizontal distances between structures and faults, and recommendations for specific studies. The analysis of the coherence between the design return period of the structures and the maximum earthquake recurrence interval of the active faults is also addressed. The starting point is the database of Quaternary active faults of Iberia, QAFI. This contribution presents the methodology used together with some preliminary results.*

Key words: *active faults, QAFI, seismic-resistant building code*

INTERÉS DE LA TEMÁTICA

La identificación y estudio de las fallas activas presentes en un territorio es un tema fundamental para prever a largo plazo la ocurrencia de fenómenos sísmicos dañinos y prevenir sus consecuencias. En este sentido, las normas de construcción sismorresistente modernas incorporan criterios y parámetros específicos para

considerar la presencia o cercanía de fallas activas a las estructuras.

Estos criterios se refieren fundamentalmente a la consideración de amplitudes del movimiento fuerte del terreno especiales debido a la cercanía a la fuente del terremoto (ej., directividad, efectos de bloque superior), pero también para prever la posible rotura o deformación permanente del terreno en terremotos particularmente grandes (ej., $M_w \geq 6.0$).

En España, la norma sismorresistente vigente no considera los condicionantes relacionados con la presencia de fallas activas. Sin embargo, existe un proyecto de nueva norma, la NCSR-23, fuertemente basada en la norma europea Eurocódigo-8 (UNE-EN, 1998), donde sí se considera la presencia o cercanía de ciertas estructuras críticas, como los puentes, a fallas calificadas como potencialmente o sísmicamente activas.

FALLAS ACTIVAS Y NCSR-23

En el Anejo 1: Reglas Generales de la NCSR-23, se define falla potencialmente activa o sísmicamente activa como aquella que cumple al menos uno de los siguientes tres requisitos: 1) su tasa de deslizamiento media sea igual o superior a 1 mm/año; 2) tenga evidencia de ruptura o deformación cosísmica en la superficie del terreno en los últimos 129.000 años (desde el inicio del Pleistoceno Superior hasta la actualidad); y 3) tenga una actividad sísmica asociada atestiguada por el registro sismológico instrumental o deducida a partir de información histórica, arqueológica o geológica, siempre dentro de los últimos 129.000 años.

La futura aplicación de la NCSR-23, o del Eurocódigo-8, implicará, por tanto, la obligatoriedad de identificar tales fallas y, en su caso, considerarlas en el diseño de las estructuras (en especial en edificación, puentes y tuberías).

GRUPO DE TRABAJO SOBRE EL CATÁLOGO DE FALLAS ACTIVAS

En esta comunicación se presentarán los avances realizados por uno de los cuatro grupos de trabajo que han surgido a partir de la celebración de la Jornada Sobre Fallas Activas y NCSR-23, celebradas el 18 de septiembre de 2023 en el IGME, Madrid. En estas jornadas participaron investigadores expertos en geología de terremotos y tectónica activa de numerosos universidades y centros de investigación españoles.

En concreto, el grupo se está encargando de elaborar un catálogo de fallas activas según la definición aportada en las Reglas Generales de la NCSR-23 (Anejo 1). El punto de partida es la base de datos de fallas activas en el Cuaternario QAFI v.4 (IGME, 2022; García-Mayordomo y Martín-Banda, 2022). La metodología que se está siguiendo comprende: 1) revisar la base de datos QAFI, con objeto de identificar errores y mejoras necesarias; 2) identificar cuáles de las fallas ya incluidas en QAFI cumplen alguno de los tres requisitos provistos en la NCSR-23, y 3) añadir fallas previamente no incluidas en QAFI que también cumplan esa definición, en base a las últimas evidencias científicas disponibles.

Estos trabajos conducirán idealmente a la edición de una versión mejorada de la base de datos QAFI (la versión 5), en la que previsiblemente se incluirá una capa especial dedicada a la presentación del catálogo de fallas activas según la NCSR-23 para que pueda ser consultada on-line por la ciudadanía en general, y especialmente por los usuarios de la norma sismorresistente.

Existe un segundo grupo de trabajo dedicado a estudiar la representación espacial de las fallas activas para su uso práctico en la aplicación de la norma, en concreto para la medida de las distancias horizontales a la falla (parámetro fundamental para la aplicación correcta de la norma en edificación de importancia IV y puentes), y para determinar la distancia mínima a partir de la cual son necesarios estudios especiales para prever deformaciones permanentes del terreno (asociadas a la ruptura cosísmica de la falla en superficie).

Finalmente, existen dos grupos de trabajo adicionales, uno dedicado a elaborar recomendaciones de cómo deberían de ser los estudios especiales que deban ser realizados por situarse la estructura en las proximidades de una falla; y otro, dedicado a analizar la coherencia entre el periodo de retorno de diseño y el periodo de recurrencia de terremotos máximos en las fallas activas.

AGRADECIMIENTOS

La formación de los grupos de trabajo surge de la iniciativa altruista de un nutrido grupo de investigadores en Ciencias de la Tierra, principalmente provenientes de la comunidad Iberfault (https://iberfault.org) y Fault2SHA (https://fault2sha.net). El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) apoya esta iniciativa y alojó la celebración de la Jornada Sobre Fallas Activas y NCSR-23 en su sede de Ríos Rosas (18/09/2023, Madrid).

REFERENCIAS

García-Mayordomo, J. y Martín-Banda, R. (2022) Identificación de fallas activas en España para la aplicación de la próxima norma sismorresistente (NCSR-22): uso de la base de datos QAFI como proxi. 10ª Asamblea Hispanoportuguesa de Geodesia y Geofísica, 28/11 al 01/12/2022, Toledo.

IGME (2022) QAFI: Quaternary Active Faults Database of Iberia. https://info.igme.es/QAFI.

NCSE-02 (2002) Norma de Construcción Sismorresistente Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre.

NCSR-23 (2023) Proyecto de Norma de Construcción Sismorresistente. 6 Anejos.

UNE-EN (1998) Eurocódigo-8: Proyecto para la resistencia al sismo de las estructuras

Estudio sismotectónico de la sismicidad de Laza (Ourense) y su relación con las estructuras sismogénicas.

Seismotectonic study of Laza seismicity (Ourense) and its relationship with the seismogenic structures.

F. Martín-González[1], C. Crespo-Martín[1], P. Farias[2], R. Martín-Banda[3], N. Heredia[3]

1 Área de Geología, Tecvolrisk Research Group, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, Móstoles, 28933 Madrid, Spain. cristina.crespo@urjc.es; fidel.martin@urjc.es
2 Universidad de Oviedo, C /Jesús Arias de Velasco s/n, E33005, Spain. pfarias@uniovi.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Oviedo E 35003, Spain. r.martin@igme.es; n.heredia@igme.es

Palabras clave: Falla de Laza, Sismicidad, Fallas Sismogénicas, Galicia, España.

Resumen

La sismicidad localizada en Laza (Ourense) se agrupa en dos series sísmicas de 191 eventos y numerosos sismos de magnitudes 3.4-3.6 Mw (junio-septiembre/2021). El terremoto principal presenta un mecanismo focal de falla normal de dirección NNW-SSE (Martín-González et al., 2023). La primera serie se subdivide en dos subseries con características sísmicas diferentes. La primera subserie se caracteriza por un b-valor cercano a la unidad (0.96), profundidades inferiores a 8km y sismicidad de tipo secuencia (terremotos-réplicas). La segunda subserie se caracteriza por un b-valor mayor (1.2), mayores profundidades (hasta 15-20km) y por tratarse de sismos independientes con baja producción de réplicas tipo enjambre. La segunda serie vuelve a tener las características de la primera subserie. Este tipo de series sísmicas podría estar relacionado con ruptura de fallas favorecidas por aumento de presión de fluidos que, a su vez, permite la removilización de los mismos por la zona fracturada. Los planos nodales y la localización de esta sismicidad nos permiten proponer la falla de Laza como la falla sismogénica. La falla de Laza se caracteriza por una intensa y amplia zona de daño (>100m) que estaría favoreciendo estos procesos de falla-válvula (Sibson, 1990). La cinemática del mecanismo focal indicaría que la falla se reactiva como falla normal de forma coherente con el tensor de esfuerzos actual.

Abstract

The seismicity in Laza (Ourense) is grouped into two seismic series of 191 events, including numerous earthquakes with magnitudes 3.4-3.6 Mw (2021/May-September). The focal mechanism of the main earthquake shows a normal kinematics and a plane trending NNW-SSE (Martín-González et al., 2023). The first series can be further subdivided into two subseries with distinct characteristics. The first subseries is characterized by a b-value close to one (0.96), depths shallower than 8 km, and sequence seismic activity with mainshock-aftershock patterns. The second subseries is distinguished by a higher b-value (1.2), greater depths (up to 15-20 km), and seismic swarm-like aftershocks. The second series presents the characteristics of the first subseries. Such seismicity could be related to the fault rupture by fluid pressure, allowing fluids mobilization within the fractured zone. The nodal planes and the spatial distribution of this seismicity points the Laza Fault as the seismogenic fault. The Laza Fault is characterized by an extensive and intense damage zone (>100m), which can facilitate fault-valve processes (Sibson, 1990). The focal mechanism kinematics suggest that the fault reactivates as a normal fault, consistent with the present stress tensor.

Referencias

Martín-González, F., Crespo-Martín, C., Cesca, S., González-Muñoz, S., 2023. *Global and Planetary Change* 227. 104177. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104177

Sibson, R.H., 1990. *Geol. Soc. Spec. Publ*, 54: 15–28.

Evidencias cartográficas y de campo del inicio del régimen transpresivo en el sector Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia.

Cartographic and field evidence of the onset of the transpressional regime in the Lorca-Totana sector of the Alhama de Murcia Fault.

J.J. Martínez Díaz[1], J. Alonso-Henar[1], J. A. Álvarez-Gómez[1], C. Canora[2], P. Herrero-Barbero[3], J.M. Insua-Arévalo[1], R. Pérez-López[4], E. Rodríguez-Escudero[4], J.L. Sánchez-Roldán[1] y M. Tsige[1]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, jmdiaz@ucm.es, jahenar@geo.ucm.es, jaalvare@ucm.es, insuarev@geo.ucm.es, jl.sanchez.roldan@ucm.es, meaza@geo.ucm.es.
2 Dpto. Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid, carolina.canora@uam.es
3 Geosciences Barcelona CSIC (GEO3BCN-CSIC). 08028 Barcelona. pherrero@geo3bcn.csic.es.
4 Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23, Madrid 28003, r.perez@igme.es, e.rodriguez@igme.es.

Palabras clave: Falla de Alhama de Murcia, Cartografía Geológica.

Resumen

Se presentan nuevos datos de campo que aportan información al conocimiento de la historia de comportamiento de la Falla de Alhama de Murcia como una falla de desgarre, con una mayor o menor componente transpresiva, originada a partir de un proceso de inversión tectónica (Montenat, 1973). En los últimos años se han propuesto distintos marcos temporales para la implantación de esta cinemática. Conocer cuándo se inició la cinemática actual en la falla, observable a partir de datos geomorfológicos y paleosísmicos, y cuya vigencia puede observarse en la sismicidad actual (mecanismos focales) y en los datos GNSS, es de interés para: 1) entender la evolución tectónica de las Béticas Orientales durante el Mioceno y el Plio-Cuaternario; 2) obtener estimaciones más precisas de las tasas de movimiento a largo plazo; e 3) interpretar correctamente la evolución cinemática y reológica de las fábricas de deformación en las rocas de falla a lo largo de la FAM implicando materiales de muy diversas edades. Se ha actualizado la cartografía de varios tramos del segmento Lorca-Totana en el flanco SE de la sierra de La Tercia cuya interpretación tectónica ha variado en las últimas décadas, con especial interés en la transversal de la Rambla de Lébor y en el dúplex de desgarre compresivo de Matalahuga. Las evidencias revisitadas y analizadas apuntan a un inicio del régimen transpresivo en este sector de la FAM más antiguo que el propuesto en trabajos previos pudiendo llegar a tiempos pre-Tortonienses.

Abstract

New field data are presented that contribute to the knowledge of the kinematic history of the Alhama de Murcia Fault as a strike-slip fault, with transpressional component, preceded by a process of tectonic inversion (Montenat, 1973). During the last decades there have been a few studies in which different time frames have been proposed for the initiation of this kinematics. Knowing when started that transpressive kinematics in the FAM, evidenced during the Quaternary from geomophological and palaeoseismic observations and observed at present from seismic (focal mechanisms) and geodetic data, is of great interest to: 1) to understand the tectonic evolution of the Eastern Betics during the Miocene and Plio-Quaternary; 2) to obtain more precise estimates of long-term slip rate; and 3) to understand the kinematic and rheological evolution of the deformation fabric observed in the fault rocks along the AMF involving materials of very different ages. We present an update of the detailed mapping of several sections of the Lorca-Totana segment on the SE flank of the La Tercia range, whose tectonic interpretation has varied in last decades. Special interest was focused in the cross section along the Rambla de Lébor and in the Matalahuga compressional strike-slip duplex. The evidence supports a pre-Tortonian onset of the transpressive regime in this sector of the FAM.

Referencias

Montenat, C. (1973). Les Formations Néogènes du Levant Espagnol. Ph.D. Thesis, Orsay, France, University of Paris. 950 p.

Estudio preliminar de la prolongación de la falla de Alhama de Murcia al NE del valle del río Segura como fuente sismogenética.

Preliminary study of the extension of the Alhama de Murcia Fault to the NE of the Segura River Valley as a seismogenic source.

J. J. Martínez Díaz[1], J. A. Álvarez-Gómez[1], P. Herrero-Barbero[2] , O. Gómez-Novell[3] , A. Staller[4] y J. Portela[4]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, 28040, jmdiaz@ucm.es
2 Geociencias Barcelona CSIC (GEO3BCN-CSIC). 08028 Barcelona pherrero@geo3bcn.csic.es
3 Vicerectorat de recerca, Universitat de Barcelona. 08028 Barcelona, octgomez@ub.edu
4 *Universidad Politécnica de Madrid. Res. Gr. TERRA: Geomatics, Natural Hazards and Risks. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía C/ Mercator, 2, 28031 Madrid, Spain*, jj.portela@upm.es

Palabras clave: Falla de Alhama de Murcia, Escenario sismogénico, Peligrosidad Sísmica.

Resumen

La continuidad de la falla de Alhama de Murcia (FAM) al este del Río Segura, ya propuesta por Gauyau *et al.* (1977), tiene implicaciones importantes para la peligrosidad sísmica de la zona en caso de presentar actividad sismogenética. Se presenta un análisis preliminar de la región caracterizada por un suave anticlinal de 18 km de longitud afectando a materiales messinienses y pliocuaternarios, y que estructura la loma de Los Cuadros-Los Ásperos (LCA), al norte de la ciudad de Murcia. Flanqueando esta estructura por el NO, la prolongación del segmento Alhama-Alcantarilla de la FAM deforma los depósitos messinienses (Garcés *et al.* 2001) a lo largo del eje Molina de Segura-Fortuna. Algunas evidencias de desvíos y antecedencias en la red fluvial sobre la LCA en el sector de Rambla Salada apoyan el carácter cuaternario de estas deformaciones. Escenarios deterministas de ruptura cosísmica de toda la longitud de la FAM (~ 84 km) estiman una magnitud máxima de Mw ~ 7.4 (Herrero-Barbero *et al.*, 2023). La adición de un segmento sismogénico Molina-Fortuna implicaría una longitud máxima total de 104 km y plantea nuevos escenarios sismogénicos que deberían ser considerados en los estudios de peligrosidad sísmica.

Abstract

The continuity of the Alhama de Murcia Fault (FAM) beyond the Segura River towards the northeast, already proposed by Gauyau *et al.* (1977), may have important implications for the seismic hazard of the area. A preliminary analysis of the region is presented, showing a gentle 18 km long antiform oriented NE-SW affecting Messinian and Plio-Quaternary materials that structures the Los Cuadros-Los Ásperos hills (LCA), located to the north of the city of Murcia. Flanking this structure to the NW, the extension of the Alhama-Alcantarilla segment of the FAM deforms the Messinian deposits (Garcés et al. 2001) along the Molina de Segura-Fortuna axis. Some evidence of diversions and antecedent features affecting the fluvial network implanted on the LCA in the Rambla Salada sector support the Quaternary character of these deformations. Deterministic scenarios of seismic rupture along the entire current length of the FAM (~ 84 km) give a maximum magnitude Mw ~ 7.4 (Herrero-Barbero *et al.*, 2023). The definition of a new Molina-Fortuna seismogenic segment of the FAM would imply a maximum length of 104 km for this fault and poses new seismogenic scenarios that should be investigated and considered in seismic hazard analyses.

Referencias

Gauyau, E.; Bayer, R.; Bousquet, J.C.; Lachaud. J.C. (1977). *Bull. Soc. Geol. France*. 19: 623-629.

Garcés, M., Krijgsman, W. And Agustí, J. (2001). *Basin Research*, 13 (2), 199-216.

Herrero-Barbero, P.; Álvarez-Gómez, J.A.: Tsige, M.; Martínez-Díaz, J.J. (2023) *Engineering Geology*, 327, 107364

Estudio paleosismológico integral mar-tierra de la Falla de Carboneras (Mar de Alborán).

Comprehensive offshore-onshore paleoseismological analysis of the Carboneras Fault (Alboran Sea).

S. Martínez-Loriente[1], H. Perea[1], A. Canari[1,2], O. Gómez[2], X. Moreno[1,2], R. Pallàs[2], R. Bartolome[1], M. Ortuño[2], G. Khazaradze[2], J. Escartín[3], E. Masana[2], y E. Gràcia[1]

1 ICM - CSIC, 08003 Barcelona, Spain. smartinez@icm.csic.es, hperea@icm.csic.es, acanari@icm.csic.es, rafael@icm.csic.es.
2 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain. octgomez@ub.edu, raimonpallas@ub.edu, maria.ortuno@ub.edu, gkhazar@ub.edu, eulalia.masana@ub.edu.
3 Laboratoire de Géologie (CNRS UMR8538), Ecole Normale Supérieure de Paris, Paris, France. escartin.javier@gmail.com.

Palabras clave: tectónica activa, paleosismología, geomorfología submarina, trincheras paleosísmicas, perfiles sísmicos, margen sureste de Iberia.

Resumen

La lenta convergencia (4-5 mm/año) entre las placas Africana y Euroasiática junto con la presencia de una amplia zona de actividad sísmica de baja a moderada magnitud caracterizan el margen SE de Iberia. Una parte importante del acortamiento se acomoda a través de un sistema de fallas de dirección lateral sinestral conocido como la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (EBSZ). La Falla de Carboneras es una de las estructuras de mayor longitud dentro de la EBSZ, extendiéndose 50 km en tierra y más de 100 km en mar con orientación NE-SO. En este trabajo, presentamos un estudio paleosismológico integrado tierra-mar realizado a lo largo de la Falla de Carboneras. Combinamos cartografía batimétrica y perfiles sísmicos multiescala en mar, junto con resultados de trincheras paleosísmicas y geocronología en tierra, para documentar la actividad cuaternaria en la falla. Los parámetros sísmicos obtenidos indican tasas de deslizamiento lateral de 1.3 a 1.5 mm/año para el Cuaternario, la ocurrencia de al menos cinco eventos sísmicos en los últimos 130 mil años, con un periodo de recurrencia medio de 13.8 mil años, y un desplazamiento máximo por evento de 1.5 m, una magnitud máxima Mw de 7.4 si rompe la falla completa, y un tiempo transcurrido desde el último terremoto de menos de 772 años. La comparación con el catálogo de terremotos históricos sugiere que este último evento podría corresponder al terremoto que destruyó la ciudad de Almería en 1522 (I_0=IX). Estos resultados indican que, aunque la Falla de Carboneras ha permanecido sísmicamente silenciosa durante el periodo instrumental, sigue representando un peligro sísmico y tsunamigénico para la zona densamente poblada del SE de la Península Ibérica.

Abstract

The slow convergence (4-5 mm/yr) between the African and Eurasian plates, along with a wide zone of low to moderate magnitude seismicity, characterize the SE Iberian margin. A large portion of the shortening occurs through a left-lateral strike-slip fault system known as the Eastern Betics Shear Zone (EBSZ). The NE-SW-trending Carboneras Fault is one of the longest structures within the EBSZ, stretching over 50 km onshore and more than 100 km offshore. Here, we present an integrated offshore-onshore paleosismological study conducted along the Carboneras Fault. We combine swath-bathymetric mapping and multi-scale seismic imaging offshore with results from paleoseismic trenches and geochronology onland to document Quaternary activity on the fault. The seismic parameters obtained indicate strike-slip rates of 1.3 to 1.5 mm/yr for the Quaternary, the occurrence of at least five seismic events since 130 kyr BP, with a mean recurrence period of 13.8 kyr, and a maximum slip per event of 1.5 m, a maximum magnitude Mw of 7.4 if the entire fault ruptures, and an elapsed time since last earthquake < 772 years. The comparison with the historical earthquakes catalog suggests that this last event may correspond to the earthquake that destroyed the town of Almeria in 1522 (I_0=IX). These results indicate that although the Carboneras Fault has remained seismically silent during the instrumental period, it still represents a significant seismic and tsunami hazard for the densely populated SE Iberian Peninsula.

Análisis de la influencia de los parámetros de falla en la modelización de tsunamis para fallas direccionales en la costa SO de Iberia.

Analysis of the influence of fault parameters on tsunami modeling for strike-slip faults off the SW Iberian coast.

S. Martínez-Loriente[1], M. Prada[1], J. Macías[2], C. Sánchez-Linares[2], B. Gaite[3], L.C. Puertas[3], I. Diéguez[1,4] y H. Perea[1]

1 Institut de Ciències del Mar - CSIC, 08003 Barcelona, España. smartinez@icm.csic.es, mprada@icm.csic.es, hperea@icm.csic.es
2 EDANYA Research Group, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29080 Málaga, España. jmacias@uma.es, csl@uma.es.
3 Instituto Geográfico Nacional (IGN), E-28003 Madrid, España. bgaite@mitma.es, lcpuertas@mitma.es.
4 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona 08028 Barcelona, España. inadieguez14@gmail.com.

Palabras clave: terremotos, fallas de deslizamiento lateral dextra, simulaciones de tsunamis, costa española occidental, amenaza de tsunamis.

Resumen

El margen suroeste de la península ibérica, una región altamente sísmica y tsunamigénica en Europa occidental, ha experimentado eventos catastróficos históricos e instrumentales como los terremotos de Lisboa en 1755 y Horseshoe en 1969. Debido a la convergencia de las placas africana y euroasiática, la deformación tectónica ocurre principalmente a través de fallas inversas y direccionales, formando la Zona de Falla del Margen Suroeste de Iberia (SWIM), que se extiende a lo largo de 600 km de longitud y 300 km de ancho. Estudios previos que analizaban la sensibilidad en la modelización de tsunamis ante la variación de la geometría de la falla y la distribución del deslizamiento a lo largo del plano de falla, revelaron que las fallas direccionales SWIM representan una amenaza significativa de tsunamis para las costas españolas. Este estudio se focaliza en las dos fallas direccionales más destacadas de la Zona de Falla SWIM, la Lineación Norte (LNF) y la Lineación Sur (LSF), evaluando los efectos de la variación de parámetros de falla en la modelización de tsunamis. Los parámetros analizados incluyen buzamiento de la falla, dirección de deslizamiento, profundidad sismogénica y deslizamiento, con rangos de variación derivados de un conjunto de datos que abarca perfiles sísmicos multicanal a diferentes escalas, batimetría de alta resolución, secciones sísmicas de gran ángulo y datos de sismicidad regional. Esta investigación tiene como objetivo profundizar en la comprensión de cómo diversos parámetros de falla influyen en la modelización de tsunamis, utilizando un conjunto de datos integral. Los resultados tienen el potencial de perfeccionar metodologías de evaluación de riesgos y mejorar estrategias de prevención ante el peligro de tsunamis en la costa suroeste de la península ibérica.

Abstract

The southwestern Iberian margin, a highly seismogenic and tsunamigenic region in Western Europe, has experienced historical and instrumental catastrophic events like the 1755 Lisbon and 1969 Horseshoe earthquakes. Due to the convergence of the African and Eurasian plates, tectonic deformation occurs predominantly through thrusts and strike-slip faults, forming the 600 km-long and 300 km-wide SWIM Fault Zone. Previous studies on tsunami impact sensitivity to the fault geometry and slip distribution for local earthquakes revealed that the SWIM strike-slip faults represent a significant tsunami threat to the Spanish coasts. This study focuses on the two most prominent strike-slip SWIM faults, the Lineament North (LNF) and Lineament South (LSF), evaluating varying fault parameters' effects on tsunami modeling. Analyzed parameters include fault dip, rake, seismogenic depth, and slip, with ranges derived from a dataset comprising multiscale multichannel seismic profiles, high-resolution bathymetry, wide-angle seismic sections, and regional seismicity data. This research aims to deepen understanding of how diverse fault parameters influence tsunami modeling, using a comprehensive dataset. The outcomes have the potential to refine risk assessment methodologies and improve prevention strategies for tsunami hazards on the southwestern Iberian coast.

Caracterización de las fallas del Golfo de Valencia a partir de perfiles sísmicos.

Characterization of the Valencian Gulf faults from seismic lines.

I. Martin-Rojas[1], E. Santamaría-Pérez[1], A. Ramos[1], M. De Ruig[2], I. Medina-Cascales[1], P. Alfaro[1]

1 Dpto. de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Campus San Vicente s/n, 03690, San Vicente del Raspeig, Alicante. ivan.martin@ua.es, eva.santamaria@ua.es, adria.ramos@ua.es, ivan.medina@ua.es, pedro.alfaro@ua.es
2 Oropesa BV, Van Bleiswijkstraat 183, 2582 LD The Hague, Netherlands. menno.deruig@gmail.com

Palabras clave: Fallas activas, peligrosidad símica, tectónica salina.

Resumen

El Golfo de Valencia es una región con una sismicidad moderada, con hasta cuatro eventos de magnitud mayor de 4 en el periodo instrumental (IGN, 2024). En esta zona se han definido varias fallas normales activas como fuentes sismogénicas más probables (Perea, 2006; Roca, 1996). En este trabajo hemos analizado varios perfiles sísmicos que han permitido reconocer nuevas fallas y establecer una geometría mucho más detallada de las fallas que ya se conocían. Hemos identificado varias fallas con una cinemática normal y una orientación NNE-SSO. Alguna de ellas tiene más de 60 km de longitud y un salto total que supera los 1500 m. Además, hemos identificado una falla, con orientación NO-SE y posible cinemática de salto en dirección. Estas fallas desplazan a las unidades estratigráficas pliocenas y cuaternarias. Alguna de ellas, según estudios previos, incluso corta el fondo marino actual. En los perfiles símicos se observa un cierto desacople entre la cobertera sedimentaria y el basamento, debido a la presencia de una capa de materiales salinos de edad triásica. Este desacople debe ser tenido en cuenta a la hora de cuantificar la peligrosidad símica, ya que parte de la deformación se debe a la tectónica regional y parte a la tectónica salina.

Abstract

The Valencia Gulf is a region with a moderate seismicity, where up to four events of magnitude over 4 have taken place during the instrumental period (IGN, 2024). Several active normal faults have been defined in this region (Perea, 2006; Roca, 1996). These faults are likely the seismogenic sources of the above-mentioned seismicity. We analyzed several seismic lines from this region. These lines allow us to identify new faults and to better characterize the geometry of those faults previously described. We identified several normal faults striking NNW-SSW, some with a total throw of more than 1500 m and over 60 km long. We also identified a NW-SE fault, probably acting as a lateral transfer with a strike-slip component. These faults offset Pliocene and Quaternary units and, according to previous studies, locally even the seabed. A partial decoupling between the sedimentary cover and the basement is observed in the lines. This decoupling is related to a salt layer Triassic in age. This decoupling must be included in seismic hazard assessment, as part of the observed deformation would be related to regional tectonics and part to salt tectonics.

Referencias

IGN, Instituto Geográfico Nacional (última consulta, 2024). Catálogo de terremotos. https://doi.org/10.7419/162.03.2022

Perea, H. (2006). *Falles actives i perillositat sísmica al marge nord-occidental del solc de València*, Tesis Doctoral Univ. de Barcelona, Barcelona, 382 pp.

Roca, E. (1996). *Acta Geol. Hispanica* 29 (1994), 3-26.

Evidencias de dislocación Holocena en la traza sur de la falla de Carboneras en La Serrata (Zona de Cizalla de las Béticas Orientales)

Evidence of Holocene surface rupture at the southern trace of the Carboneras fault at La Serrata (Eastern Betic Shear Zone)

E. Masana[1], M. Ortuño[1], O. Gómez-Novell[2], R. López[1], S. Baize[3], T.K. Rockwell[4], J.M. Insua-Arévalo[2], G. Khazaradze[1], J. García-Mayordomo[5], R. Pallàs[1]

1 RISKNAT Research Group, GEOMODELS Research Institute, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona: eulalia.masana@ub.edu; maria.ortuno@ub.edu; eulalia.masana@ub.edu; raimonpallas@ub.edu
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, insuarev@geo.ucm.es
3 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 92260 Fontenay-aux-roses, France, Stephane.baize@irsn.fr
4 Department of Geological Sciences, San Diego State University, San Diego, CA 92182, USA; trockwell@sdsu.edu
5 Instituto Geológico y Minero de España – CSIC, Madrid, Spain. julian.garcia@igme.es

Palabras clave: Falla Carboneras, Paleosismología, Terremoto de Almeria 1522, parámetros sísmicos, ruptura holocena

Resumen

La Falla de Carboneras (Zona de Cizalla Béticas Orientales), levógira y de dirección NE-SO, presenta poca sismicidad instrumental e histórica, pero ha demostrado ser sismogénica en estudios paleosísmicos realizados en la traza norte de La Serrata, dúplex contractivo de 12 km de largo y limitado por dos trazas de la falla. La zona estudiada está ubicada en la traza sur de La Serrata, en el vértice de un abanico aluvial del Pleistoceno superior. El estudio consistió en 13 trincheras y 12 catas. El abanico consta de dos grandes sistemas de canales que inciden en una superficie de abanico más antigua con un caliche en la parte superior. El relleno de esos grandes canales está formado por una alternancia de canales más pequeños de grava y niveles extensos de *mud flows* y *debris flows*. En las trincheras excavadas perpendicularmente a la falla, se observaron evidencias de 4 a 5 eventos definidos por fallas fosilizadas por diferentes niveles. El evento más reciente afecta toda la secuencia estratigráfica incluyendo el suelo actual. Las trincheras excavadas paralelamente a la falla mostraron hasta 16 canales, ocho de los cuales se utilizaron como líneas de referencia para mediciones del desplazamiento. El desplazamiento incremental de los diferentes canales sugiere que la falla tuvo actividad recurrente durante el Pleistoceno superior. La datación preliminar (14C) permite estimar tasas de deslizamiento entre 0,2 y 0,5 mm/año en los últimos 3 Ka en esta traza de falla. El canal más joven está dislocado 3,5 metros y tiene una edad de 514+-86 años BP. Se sugiere que el histórico terremoto de Almería de 1522 (EMSIX) es el responsable de dicha deformación holocena.

Abstract

The left-lateral, NE-SW, 150 km long Carboneras Fault belongs to the Eastern Betics Shear Zone in southeastern Iberia. Even though it shows very low instrumental and historical seismicity it is a seismogenic fault owing to paleoseismic results at the northern trace of the fault at La Serrata, a 12 km long contractive duplex bounded by two fault traces. This study focusses in the southern trace of La Serrata in the apex of a Late Pleistocene alluvial fan and ais to characterize the most recent seismic activity of such trace by means of a paleoseismic study. The survey consisted in 13 trenches and 12 slices. The stratigraphy of the fan consists of two large and wide channel systems that incise into an older fan surface that has a carbonate caliche crust on top. An alternation of loose gravel channels, and wide layers of debris and mud flows forms the filling of those large channels. In the trenches dug perpendicular to the fault, evidence for 4 to 5 events were found defined by capped faults, with the youngest fault trace affecting the topsoil layer. The trenches dug parallel to the fault evidenced up to 16 channels, eight of which were used as piercing lines for offset measurements. The incremental offset of the different channels suggests surface-rupture fault activity throughout the Late Pleistocene. The preliminary radiocarbon dating yielded slip-rates ranging between 0.2 and 0.5 mm/yr at this fault traces since 3Ka. The youngest observed channel is offset by the fault for 3.5 meters. It is 514+-86 yr BP in age. The historical 1522 Almeria earthquake (EMSIX) is suggested to be the responsible for such an offset.

Venturas y desventuras de la datación por luminiscencia para el estudio de fallas activas en Nueva Zelanda.

The sorrow of luminescence dating when applied to the study of fault activity in New Zealand.

A. Medialdea[1], M. Gonzalez-Santos[1], P. Villamor[2], K. Clark[2], D.J. Lowe[3]

[1] Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, España. alicia.medialdea@cenieh.es
[2] GNS Science/Te Pū Ao, PO Box 30-368, Lower Hutt 5040, Nueva Zelanda.
[3] School of Science/Te Aka Mātuatua, University of Waikato, Hamilton, Nueva Zealand

Palabras clave: datación por luminiscencia, Nueva Zelanda, origen del material sedimentario

Resumen

Disponer de una cronología robusta es crucial para entender la evolución tectónica en Nueva Zelanda. Los intentos por aplicar la datación por luminiscencia en esta región han sido numerosos en los últimos años. En muchos casos, el método se ha visto comprometido por la naturaleza volcánica de los minerales a estudio (cuarzo y feldespato) que presenta, a menudo, una respuesta inestable a partir de la cual, no es posible estimar una edad. En este trabajo, las medidas de luminiscencia de cuarzo y feldespato de tamaño superior a 90 µm confirman la imposibilidad de utilizar ese material para obtener una datación fiable; sin embargo, los granos minerales finos (4-11 µm) tienen una respuesta luminiscente estable y reproducible a partir de la que estimar una edad de depósito precisa. Este comportamiento ha sido observado anteriormente por otros autores (Avram et al., 2022). La diferencia en la respuesta entre el material grueso y el fino sugiere que éstos pueden ser sedimentos transportados desde depósitos con cuarzo y feldespato de origen no volcanico.

A partir de la medida de la luminiscencia de granos finos se ha podido establecer un registro cronológico de secuencias de sedimentos afectados por la falla de Te Puninga (Villamor et al., 2024) permitiendo entender su actividad en los últimos 45 ka.

Abstract

Establishing robust chronologies is crucial to understand tectonic evolution in New Zealand. There have been attempts to do so through the application of luminescence dating but the complexity of the luminescence response, related to the volcanic origin or minerals within relevant sediments, has hampered the application of this method. In this study, the luminescence measurements of coarse (>90 µm) quartz and feldspar grains confirms the instability of the signal and its unsuitability for dating. In contrast, fine (4-11 µm) grains show a stable and reproducible luminescence response, making it possible to estimate reliable burial ages of this material. This different response between the coarse and finer fractions has also been reported by other authors (Avram et al., 2022). This difference suggests that the fine grains may be sediment transported from deposits where quartz and feldspar have a non-volcanic origin.

Based on the luminescence signal of those fine grains within sediments, it has been possible to estimate burial ages of a sedimentary sequence affected by the activity of the Te Puninga fault (Villamor et al., 2024), covering the last 45 ka.

Referencias

Avram, A., Kabacinska, Z., Micallef, A., Timar-Gabor, A., 2022. *Radiation Measurements* 155, 106788.

Villamor, P., Clark, K., Coffey, G., Hughes, J.W., Lowe, D.J., Hogg, A.G., Moon, V.G., Moratalla, J., Thingbaijam, K. 2024. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*.

Caracterización de la Falla de las Moreras (Cordillera Bética Oriental).

Characterization of the Moreras Fault (Eastern Betic Cordillera, SE Spain).

I. Medina-Cascales[1], I. Martín-Rojas[1], F.J. García-Tortosa[2], A. Borrego, P. Alfaro[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03080, Alicante, España; ivan.medina@ua.es, pedro.alfaro@ua.es, ivan.martin@ua.es
2 Departamento de Geología, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071, Jaén, España; gtortosa@ujaen.es

Palabras clave: Falla de las Moreras, Arco tectónico de Águilas, falla de desgarre, tectónica activa.

Resumen

En el SE de la península Ibérica se acomoda actualmente parte de la convergencia de 4-6 mm/año entre Nubia y Eurasia (1.6 - 2.7 ± 0.6 mm/año, Serpelloni *et al*., 2007). Una de las estructuras principales es la Zona de Cizalla de la Bética Oriental. En la parte interna de esta zona de cizalla se encuentra el Arco Tectónico de Águilas (Coppier *et al*., 1989). La Falla de las Moreras es una de las principales estructuras que conforman este arco interno. En superficie se extiende unos 35 km en dirección N100E, desde la Sierra de la Almenara hasta Cabo Tiñoso (Murcia), desde donde continua bajo el Mediterráneo hacia el SE. La zona de falla está formada por dos ramas principales, subparalelas y de alto buzamiento, que delimitan un bloque levantado de rocas de las Zonas Internas Béticas, dando las sierras de las Moreras y Cabo Tiñoso. El levantamiento de estos relieves delimita las cuencas neógenas de Mazarrón y Ramonete. Además del salto vertical, los indicadores cinemáticos a mesoescala y la geometría de la zona de falla a macroescala indican una componente principal de salto en dirección dextrosa. La falla deforma intensamente las rocas neógenas que rellenan las cuencas. Además, se observa deformación en abanicos aluviales recientes que han sido asignados al Pleistoceno mediante criterios geomorfológicos (Bardají *et al*., 1999).

Abstract

Part of the convergence of 4-6 mm/year between Nubia and Eurasia is currently accommodated in the SE of the Iberian Peninsula (1.6 - 2.7 ± 0.6 mm/year, Serpelloni *et al*., 2007). One of the main structures is the Eastern Betics Shear Zone, which internal part is the Águilas Tectonic Arc (Coppier *et al*., 1989. The Moreras Fault is one of the structures conforming this arc. On the surface, the fault extends about 35 km in the N100E direction, from the Sierra de la Almenara to Cabo Tiñoso (Murcia), from where it continues under the Mediterranean towards the SE. The fault zone is formed by two main, subparallel, highly dipping strands delimiting an uplifted block to the north and south. This block, formed by rocks from the Internal Betics Zones, forms the reliefs of Sierra de las Moreras and Cabo Tiñoso. The uplift of these reliefs delimits the Mazarrón and Ramonete Neogene basins. Despite the vertical slip component, mesoscale kinematic indicators and the macroscale geometry of the fault zone suggest a main right-lateral slip component. The fault affects Neogene rocks of the basin-fill. Moreover, the deformation affects recent alluvial fans, Pleistocene in age according to geomorphological criteria (Bardají et al., 1999).

Referencias

Bardají, T. (1999). *Evolución geodinámica de las cuencas neógenas del litoral de Murcia y Almería durante el cuaternario*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 457 p

Coppier, G., Gravead, P., de Larouziere, F.D., Montenat, C., Ott d'Estevou, P.O. (1989) *Geodinamica Acta*, 3:1. doi: https://doi.org/10.1080/09853111.1989.11105173

Serpelloni, E., Vannuci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi, P., Gasperini, P. (2007) *Geophysical Journal International* 169, doi: https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03367.x

Análisis morfotectónico de la falla de Palomares sobre modelos digitales de elevación procedentes de fotogrametría aérea histórica.

Morphotectonic analysis of the Palomares Fault on digital elevation models from historical aerial photogrammetry.

J. Molins-Vigatà[1], X. Blanch[2], J.M. Insua-Arévalo[3], R. Martín-Banda[4], M. Ortuño[1], J. J. Gallego-Montoya[1], S. Baize[5], E. Masana[1] y R. Pallàs[1]

1 RISKNAT Research Group, GEOMODELS Research Institute, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, jmolinsvigata@ub.edu; maria.ortuno@ub.edu; jj.gallego.montoya@ub; eulalia.masana@ub.edu; raimonpallas@ub.edu
2 Geosensor Systems Group, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany, xabier.blanch@tu-dresden.de
3 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, insuarev@geo.ucm.es
4 Instituto Geológico y Minero de España - CSIC, 41013 Sevilla, r.martin@igme.es
5 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 92260 Fontenay-aux-roses, France, Stephane.baize@irsn.fr

Palabras clave: Fotogrametría, morfotectónica, falla de salto en dirección, falla de Palomares

Resumen

La fotogrametría SfM (S*tructure from Motion*) es cada vez más utilizada en los diferentes campos de las ciencias de la Tierra. Esta técnica permite reconstruir modelos de superficies en 3D a partir de un grupo de imágenes que se solapan entre sí. En este trabajo se han realizado dos Modelos Digitales de Elevaciones (MMDDE) a lo largo de la falla de Palomares a partir de imágenes aéreas históricas, uno de 1956 (vuelo Americano) y otro de 1977 (vuelo interministerial). Este tipo de modelos son de especial interés si se quiere estudiar la geomorfología de un área que esté modificada, ya que permiten analizar rasgos morfológicos del terreno previos a la antropización actual.

La actividad agrícola ha destruido significativamente la expresión en superficie de la falla de Palomares. Gracias al análisis de estos MMDDE históricos, a lo largo de la falla se han podido reconocer diversas estructuras morfotectónicas que derivan de su principal movimiento en dirección, como lomas de presión y obturación, pliegues, así como anomalías en la red de drenaje y en las superficies de abanicos aluviales afectados por la falla. Además, incorporando estos MMDDE históricos en el flujo de trabajo, se ha podido cartografiar con mucho más detalle las diferentes trazas en superficie de la falla, identificando las zonas donde afecta materiales más recientes. Con toda esta información se han localizado sitios de interés para hacer trincheras paleosismológicas y se han estudiado diversos afloramientos donde se ha podido caracterizar la falla con más detalle.

Abstract

The Structure from Motion (SfM) photogrammetry is widely used in the different fields of Earth Sciences; this technique enables the reconstruction of 3D surface models from a set of overlapping images. In this study, two Digital Elevation Models (DEMs) along the Palomares Fault have been generated from historical aerial images, one from 1956 (known as American flight), and another from the 1977 (known as interministerial flight). These models are particularly useful when studying the geomorphology of an extensively modified area since they allow to analyze morphological features of the terrain prior to the current anthropization.

Agricultural activity has significantly blurred the surface expression of the Palomares Fault. Through the analysis of these historical DEMs, several tectonic structures resulting from the main strike-slip movement of the fault have been recognized, such as shutter-ridges, push-ups and folds, as well as anomalies in the drainage network and in the alluvial fan surfaces affected by the fault. By incorporating these historical DEMs into the workflow, it has also been possible to map in detail the different strands of the fault, identifying areas where more recent materials are affected. With all this information, specific locations of interest for paleoseismological trenching have been identified and several outcrops have been studied to characterize the fault in more detail.

Estudio paleosismológico en la falla de Palomares (SE península Ibérica): Nuevas evidencias de tectónica activa.

Paleoseismological study of the Palomares Fault (SE Iberia): New evidences of active tectonics.

J. Molins-Vigatà[1], J.M. Insua-Arévalo[2], R. Martín-Banda[3], M. Ortuño[1], J. J. Gallego-Montoya[1], S. Baize[4], E. Masana[1] y R. Pallàs[1]

1 RISKNAT Research Group, GEOMODELS Research Institute, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, jmolinsvigata@ub.edu; maria.ortuno@ub.edu; jj.gallego.montoya@ub; eulalia.masana@ub.edu; raimonpallas@ub.edu
2 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, insuarev@geo.ucm.es
3 Instituto Geológico y Minero de España - CSIC, 41013 Sevilla, r.martin@igme.es
4 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 92260 Fontenay-aux-roses, France, Stephane.baize@irsn.fr

Palabras clave: Paleosísmologia, trincheras peleosismológicas, Falla de Palomares, Béticas Orientales.

Resumen

La falla de Palomares es una de las fallas principales de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), un sistema transpresivo que absorbe gran parte de la convergencia NO-SE (4-5 mm/año) entre la placa Euroasiática y de Nubia. Esta falla presenta una orientación general N-S y limita por el sureste las cuencas neógenas y cuaternarias de Vera, Pulpí, la Depresión del Guadalentín y la Cuenca de Hinojar, enlazando la Falla de Carboneras con la de Carrascoy.

Hasta la fecha se han realizado muy pocos estudios paleosísmicos en esta falla, en comparación a las otras fallas de la ZCBO, dónde diferentes estudios y trincheras han permitido mostrar su potencial sismogénico. Esta escasez de estudios puede estar relacionada con que la falla de Palomares presenta una componente lateral mucho más pronunciada que la vertical, además de una zona de deformación realmente ancha, de hasta unos 6km en algunos casos; esto hace que la expresión en superficie no sea tan clara, lo que dificulta su estudio.

Con la integración de diversas metodologías, se ha realizado una cartografía detallada de la falla y se han localizado las principales trazas de ramas activas donde realizar estudios paleosismológicos. Las trincheras realizadas, junto con el estudio de diversos afloramientos naturales, han permitido caracterizar la cinemática de la falla y empezar a obtener datos paleosísmicos esenciales para evaluar la peligrosidad sísmica de la zona.

Abstract

The Palomares Fault is one of the main faults within the Eastern Betic Shear Zone (EBSZ), a transpressional system that accommodates a large part of the NW-SE convergence (4-5 mm/year) between the Eurasian and the Nubian plates. The Palomares Fault borders to the southeast the Neogene and Quaternary basins of Vera, Pulpí, the Guadalentín Depression and the Hinojar Basin, linking the Carboneras Fault with the Carrascoy Fault.

To date, few paleoseismic studies have been done on this fault, in comparison with the other faults of EBSZ, where several studies and trenches have shown its seismogenic potential. Such a scarcity of studies may be related to fact that the Palomares Fault shows a main lateral component, besides a much wider deformation zone, up to about 6km in some cases; this makes the surface expression not as clear, complicating its study.

Through the integration of various methodologies, a detailed mapping of the fault has been performed, identifying the main active fault traces where palaeoseismological studies can be developed. The dug paleoseismological trenches, together with the study of various natural outcrops, have allowed us to characterize the kinematics of the fault and begin to obtain essential paleoseismic data to assess the seismic hazard in the region.

Análisis de ruido sísmico para el despliegue de estaciones de la Red Sísmica de la Comunidad Valenciana.

Seismic noise analysis for the deployment of stations of the Seismic Network of the Valencian Community.

B.Y. Nassim-Benabdeloued [1], J.A. Jornet-Monteverde [2], J.J. Galiana-Merino [2], J. Delgado-Marchal [1], S. Molina-Palacios [3], J.L. Soler-Llorens [1]

1 Dpto. CC. de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03080. nassim@ua.es, jose.delgado@ua.es, jl.soler@ua.es
2 Dpto. de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, 03080, Alicante. jj.galiana@ua.es
3 Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Alicante, 03080, Alicante. sergio.molina@ua.es

Palabras clave: ruido sísmico, redes sísmicas, densidad espectral de potencia, Peterson, SISCOVA

Resumen

El despliegue de sensores de una red sísmica requiere una serie de estudios previos, especialmente la evaluación del nivel de ruido sísmico característico del emplazamiento. La capacidad de una red sísmica para la detección de terremotos y el registro de formas de onda de interés están condicionadas por el ruido sísmico típico del lugar de instalación de las estaciones (Trnkoczy, 2012).

En este trabajo, se presentan los estudios de ruido realizados con vistas a la selección de emplazamientos para las estaciones de la Red Sísmica de la Comunidad Valenciana (SISCOVA). Para este propósito, se adquirieron registros de ruido sísmico de entre 7 y 30 días de duración con sismógrafos de banda ancha en diversos emplazamientos. Los registros obtenidos fueron analizados utilizando el software ObsPy, con librerías para el procesamiento de datos sísmicos. Para todos los registros, se calculó la densidad espectral de potencia (Power Spectral Density, PDS) en ventanas temporales variables, siguiendo las indicaciones de McNamara and Buland (2004). Se compararon las curvas PDS obtenidas, con los modelos de Peterson (1993): New High-Noise Model (NHNM) y New Low-Noise Model (NLNM), utilizados como referencia en la caracterización del nivel de ruido sísmico. Los resultados obtenidos mediante este análisis de datos han permitido seleccionar los emplazamientos con menor nivel de ruido para la instalación de varias estaciones permanentes de la Red Sísmica de la Comunidad Valenciana.

Abstract

The deployment of sensors for a seismic network requires several preliminary studies, especially the evaluation of the characteristic seismic noise level of the site. The seismic network's ability to detect earthquakes and record waveforms of interest is conditioned by the typical seismic noise at the station installation sites (Trnkoczy, 2012).

In this study, a revision of the study performed to selection of sites for the stations of the Valencian Seismic Network (SISCOVA) is presented. For this purpose, seismic noise was recorded from 7 to 30 days using broadband seismographs at different locations. The obtained records were analysed using ObsPy software, a framework for seismic data processing. For all records, Power Spectral Density (PSD) was calculated in variable time windows, following the McNamara and Buland (2004) guidelines. The obtained PSD curves were compared with Peterson's (1993) models: New High-Noise Model (NHNM) and New Low-Noise Model (NLNM), used as a reference for characterizing the seismic noise level. The results obtained through this data analysis have allowed the identification of sites with lower noise levels for the installation of several permanent stations of the Seismic Network of the Valencian Community.

Referencias

Trnkoczy, A., Bormann, P., Hanka, W., Holcomb, L. G., & Nigbor, R. L. (2009). *Bormann, P.(Ur.)*, *1*(August), 1–108. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP_R1_CH7

Peterson, J. and others. (1993). *U.S. Geological Survey Technical Report*. https://doi.org/10.3133/ofr93322

McNamara, D. E. and Buland, R. P. (2004). *Bulletin of the Seismological Society of America*, *94*(4), 1517–1527. https://doi.org/10.1785/012003001

Actualización del estado de esfuerzos y de la deformación en Iberia

An update on the stresses and strain in Iberia

A. Olaiz[1], J.A. Álvarez-Gómez[2], G. de Vicente[2,3], A. Muñoz-Martín[2,3], J.V. Cantavella[4], S. Custódio[5], D. Vales[6] y O. Heidbach[7]

1 Repsol Exploración. Dir. de Bajas Emisiones en Carbono. C/ Méndez Álvaro 44, 28045, Madrid antoniojose.olaiz@repsol.com
2 GEODESPAL, Universidad Complutense de Madrid
3 Instituto de Geociencias, IGEO, CSIC-UCM, Madrid
4 Instituto Geográfico Nacional, Madrid
5 Instituto Dom Luiz, Facultade de Ciências, Universidade de Lisboa
6 Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Lisboa
7 Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Postdam,

Palabras clave: mecanismos focales, esfuerzos, deformación, Iberia

Resumen

El análisis de 533 mecanismos focales calculados mediante el tensor de momento sísmico (TMS) en Iberia permite inferir las deformaciones tectónicas activas y los esfuerzos asociados. Se han utilizado diversas metodologías para el análisis de la deformación, que incluyen el diagrama de clasificación FMC, mecanismos focales compuestos con un tensor promedio, estimaciones del ángulo de rotación, el diagrama de Flinn, la composición de diedros rectos, el análisis del modelo de deslizamiento (MD) y metodologías clásicas de inversión de esfuerzos. Utilizando los resultados del MD como punto de partida y considerando las restricciones tectónicas de la deformación cenozoica en Iberia, el área de estudio se ha dividido en zonas con características similares. Los resultados indican regímenes de esfuerzos de cabalgamientos activos en la zona de Horseshoe y de Gorringe y en el este del Tell Atlas. En las regiones del sur, la mayoría de las situaciones muestran contextos transpresivos, especialmente en el área suroeste de Iberia, excepto en la cuenca de Granada, donde prevalece un régimen de esfuerzos de fallas normales, casi radial. Además, los regímenes de esfuerzos por fallas normales predominan en los Pirineos y en el borde del Mediterráneo, al norte de las Béticas. En el sector central de los Pirineos, σ_3 resulta perpendicular a la cordillera, sugiriendo que los esfuerzos locales prevalecen sobre los regionales. La orientación de σ_1 a lo largo de las poblaciones próximas al límite de placas permanece relativamente constante cerca de N154E, excepto en áreas específicas de las Béticas. En el centro de la península y en el Atlántico, σ_1 gira ligeramente en sentido antihorario a N140E, alineándose con el polo de rotación entre Nubia y Eurasia.

Abstract

Analyzing 533 moment tensor focal mechanisms in Iberia has uncovered active tectonic deformations and stresses, utilizing diverse methodologies to analyze the deformation, encompassing the FMC diagram, composed focal mechanism with the average moment tensor, rotation angle estimation, the Flinn diagram, Right Dihedra focal mechanism composition, Slip Model (SM) analysis, and classical stress inversion methods. Using the SM results as a starting point and considering the tectonic constraints of Cenozoic deformation in Iberia, the study area has been divided into zones. The results indicate active thrust faulting in the Gorringe-Horseshoe area and the easternmost Tell Atlas. In southern regions, most situations display transpressive tectonic stress, particularly in the southwestern Iberia. An exception is observed in the Granada Basin, where an almost radial extensional stress regime prevails. Additionally, normal faulting with extensional stresses dominates in the Pyrenees and the Mediterranean, north of the Betics. In the central Pyrenees, a maximum horizontal extension perpendicular to the range suggests that local stresses prevail over regional tectonic stress. The maximum horizontal compression along the plate boundary populations remains relatively constant near N154E, except in specific areas of the Betics. In the Central Ranges and offshore Atlantic, the maximum horizontal compression slightly anticlockwise rotates to N140E, aligning with the rotation pole between Nubia and Eurasia.

Caracterización de nuevos escarpes tectónicos en el margen occidental del surco de Valencia.

Characterisation of new tectonic escarpments on the western margin of the Valencia Trough.

M. Ollé-López[1, 2], J. García-Mayordomo[3] y E. Masana[1, 2]

1 Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, GRC RISKNAT, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Martí i Franqués s/n, 08028 Barcelona, España; marc.olle@ub.edu, eulalia.masana@ub.edu
2 Institut de Recerca GEOMODELS, Universitat de Barcelona, Martí i Franqués s/n, 08028 Barcelona, España.
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), C/ La Calera, 1, Tres Cantos, Madrid-28760, España; julian.garcia@igme.es

Palabras clave: Tectónica activa, Surco de Valencia, Geomorfología, Geofísica, Extensión Neógena

Resumen

La región este de la Península Ibérica, desde la cuenca del Baix Ebre hasta la depresión de Valencia, constituye un margen pasivo con sistemas de fallas normales orientadas NNE-SSW, formadas durante la apertura del surco de Valencia en el Neógeno. Estudios previos han demostrado que algunas de ellas, como la Falla de El Camp, todavía son activas, con tasas de deslizamiento muy lentas de aproximadamente 0,02 m/ka (Masana, 2001). Recientemente, el análisis de modelos digitales de elevaciones de alta resolución ha revelado nuevos escarpes morfológicos en abanicos aluviales cuaternarios de la región, desde el Pla de Sant Jordi, hasta la cuenca de La Salzadella. Estos escarpes tienen la misma orientación que el sistema de fallas neógenas, sugiriendo un posible origen tectónico. Se ha llevado a cabo un análisis geomorfológico detallado para detectar indicadores de actividad neotectónica en dichos abanicos. Además, estudios geofísicos en el sector norte han confirmado la existencia de fallas bajo los escarpes. Próximamente se excavará una trinchera en uno de estos escarpes con el objetivo de poder analizar su actividad durante el cuaternario. Este trabajo presenta los resultados preliminares de la investigación en curso.

Abstract

The eastern region of the Iberian Peninsula, from the Baix Ebre Basin to the Valencia Depression, constitutes a passive margin with NNE-SSW-oriented normal fault systems formed during the opening of the Valencia Trough in the Neogene. Previous studies have demonstrated that some of them, such as the El Camp Fault, are still active, with slip rates as low as 0.02 m/kyr (Masana, 2001). Recently, the analysis of high-resolution digital elevation models has revealed new morphological escarpments in Quaternary alluvial fans in the region, from the Pla de Sant Jordi to the La Salzadella Basin. These escarpments share the same orientation as the Neogene fault system, suggesting a possible tectonic origin. A detailed geomorphological analysis has been conducted to identify indicators of neotectonic activity in these alluvial fans, and geophysical studies in the northern sector have confirmed the presence of faults below the escarpments. Soon a trench will be dug in one of these escarpments in order to analyse its activity during the Quaternary. This work presents the preliminary results of the ongoing research.

Referencias

Masana, E., Villamarín, J.A. y Santanach, P. (2001). *Acta Geológica Hispánica* 36 (3-4), 329-354.

Edades de exposición del escarpe de la falla de Coronas (Pirineo Central) e implicaciones en su actividad reciente.

Exposure ages of the Coronas fault scarp (Central Pyrenees) and implications in its recent activity.

M. Ortuño[1], T. Briceño-Sarmiento[1,2], M. Tompkins[3], A. Rodés[4,5], P. Figueiredo[6], M., Monterrubio-Velasco[7], P. Lacan[8], M. Guinau[1], R., Pallàs[1] y E. Masana[1]

1 RISKNAT Research Group, GEOMODELS Research Institute, Universitat de Barcelona, maria.ortuno@ub.edu.
2 Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, tamycbs@gmail.com
3 Department of Geography, Univ. of Manchester, UK. matthew.tomkins@manchester.ac.uk
4 Universidad de Santiago de Compostela, Dep. Xeografia. angel.rodes@usc.gal
5 Center for the Isotope Sciences (SUERC), Scottland
6 Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh, USA. paula_figueiredo@ncsu.edu
7 Barcelona Supercomputer Center (Spain) marisol.monterrubio@bsc.es
8 Centro de Geociencias CGEO (UNAM), México, placan@geociencias.unam.mx

Palabras clave: Bedrock paleoseismology, Schmidt Hammer ages, ^{10}Be ages, 1373 earthquake

Resumen

La falla de Coronas es una falla normal que se extiende a lo largo de, al menos, 11 km en la vertiente sur del macizo de la Maladeta (Pirineo Central). Se encuentra dentro de la zona epicentral del catastrófico terremoto de Ribagorçana de 1373 (M ~ 6,2) y ha sido considerada la fuente de la crisis sísmica que afectó a la zona en agosto-diciembre de 2023 (evento máximo de la crisis M 4,1). Su desplazamiento acumulado ha provocado el desplazamiento de la ladera del valle, que localmente alcanza un desnivel de 155 ± 1 m. Debido a este gran desplazamiento, interpretaciones previas de la falla consideraban que el movimiento de la falla podría reflejar parcialmente un colapso gravitacional del macizo hacia el norte. En este trabajo presentamos los primeros resultados de las edades de exposición del escarpe de falla contenidas con dos técnicas diferentes: las edades de Schmidt Hammer (SH), obtenidas a partir de curvas calibradas regionalmente y medidas de SH en la base del escarpe, y las edades de ^{10}Be (edades de cosmogénicos), obtenidas de su concentración en el cuarzo del material del escarpe expuesto (3 cm superficiales, granito). Presentamos tres edades SH y seis edades ^{10}Be, todas ellas procedentes de muestras del mismo perfil en un escarpe de 50 m de altura situado en un paso de montaña (Brecha de Llosás, 2850 m). Los resultados proporcionan la primera estimación sobre la historia de exposición del escarpe de falla y se discuten en clave metodológica.

Abstract

The Coronas fault is a normal fault extending for at least 11 km along the southern side of the Maladeta massif (Central Pyrenees). It is located within the epicentral area of the damaging 1373 Ribagorçana earthquake (M ~ 6.2) and has been considered the source of the seismic crisis affecting the area in August-December 2023 (maximum event of the crisis M 4.1). Its accumulated displacement has led to the offset of the valley-side, which locally reaches a 155 ± 1 m thrown. Due to this large offset, previous interpretations considered that the fault movement could partially reflect a gravitational collapse of the massif towards the north. In this work, we present the first results for the exposure ages of the fault scarp derived from two different techniques: the Schmidt Hammer (SH) ages, derived from regional calibrated curves and SH measurements along the scarp, and ^{10}Be cosmogenic exposure ages, collected from the exposed scarp material (surficial 3 cm) and measured from quartz. We present three SH ages and six ^{10}Be ages, all of them along the same 50 m high scarp profile in a granitic bedrock located in a mountain pass *(Brecha de Llosás, 2850 m).* These results provide the first insights on the exposure history of the fault scarp, and are discussed here from a methodological perspective.

Modelo de zonas sismogénicas para cálculos de peligrosidad sísmica en el Mar de Alborán: Una modificación del modelo ZESIS-2015.

Seismogenic zones model for seismic hazard calculations in the Alboran Sea: A modification of the ZESIS-2015 model.

H. Perea[1], J. García Mayordomo[2], M.J. Jiménez[3], M. García-Fernández[3], S. Martínez Loriente[1] y A. Canari[1,4]

1 BSCI, Institut de Ciències del Mar-CSIC. Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49. 08003 Barcelona. hperea@icm.csic.es, smartinez@icm.csic.es, acanari@icm.csic.es
2 Instituto Geológico y Minero de España-CSIC, C/ Calera 1, Tres Cantos, 28760 Madrid. julian.garcia@igme.es
3 Museo Nacional de Ciencias Naturales -CSIC, C/ José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid. mj.jimenez@csic.es, mgarcia@csic.es
4 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona.

Palabras clave: ZESIS-2015, Mar de Alborán, Zonas sismogénicas, Peligrosidad sísmica, Iberia.

Resumen

En 2015 se publicó el modelo de zonas sismogénicas de la Península Ibérica (ZESIS), que cubre toda la península y las regiones costeras adyacentes (http://info.igme.es/zesis/). Desarrollado a partir de la información disponible hasta ese momento, el modelo se convirtió en una referencia en los estudios de peligrosidad sísmica. Sin embargo, desde su publicación en 2015 han tenido lugar avances significativos en la adquisición de datos y también la aparición de nuevas publicaciones que han contribuido a una mejor comprensión de la región. Esta gran cantidad de información reciente brinda la oportunidad de refinar y caracterizar mejor los límites de las zonas sismogénicas, particularmente en el Mar de Alborán. El objetivo de este estudio es evaluar y actualizar el modelo de zonas sismogénicas dentro del Mar de Alborán. Para definir nuevos límites, empleamos la misma metodología utilizada en la creación del modelo ZESIS original, considerando tipos similares de información (por ejemplo, espesor de la corteza, flujo de calor, tensión horizontal o fallas QAFI). Además, incorporamos nuevos datos, como velocidades GNSS, un catálogo de terremotos actualizado, mapeamos fallas activas en el Mar de Alborán, límites de dominios de la corteza terrestre y mapas de compilación de la profundidad de la Moho. Las fuentes sismogénicas resultantes exhiben cambios que van desde sutiles a sustanciales en comparación con el modelo ZESIS en la región. Este modelo actualizado para el Mar de Alborán está preparado para integrarse perfectamente en futuras revisiones de ZESIS, mejorando su precisión y relevancia.

Abstract

In 2015, the Iberian Peninsula's seismogenic source zone model (ZESIS) was published, covering the entire peninsula and adjacent offshore regions (http://info.igme.es/zesis/). Developed from the information available up to that point, the model became a reference in seismic hazard studies. However, since its publication in 2015 there have been significant advances in data acquisition and the appearance of new publications that have contributed to a better understanding of the region. This wealth of new information provides the opportunity to refine and better characterize the boundaries of seismogenic zones, particularly in the Alboran Sea. The objective of this study is to evaluate and update the model of seismogenic zones within the Alboran Sea. To define new boundaries, we employ the same methodology used in creating the original ZESIS model, considering similar types of information (e.g., crustal thickness, heat flow, horizontal stress, or QAFI faults). Additionally, we incorporate new data such as GNSS velocities, an updated earthquake catalog, the mapped active faults in the Alboran Sea, crustal domain boundaries, and build maps of Moho depth. The resulting seismogenic sources exhibit changes ranging from subtle to substantial compared to the ZESIS model in the region. This updated model for the Alboran Sea is prepared to be seamlessly integrated into future revisions of ZESIS, improving its accuracy and relevance.

Modelización cinemática de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales a partir de datos GNSS.

Kinematic modelling of the Eastern Betic Shear Zone using GNSS data.

J. Portela[1], A. Staller[1], M. Béjar-Pizarro[2], J.J. Martínez-Díaz[3], J.A. Álvarez-Gómez[3] y G. Khazaradze[4]

1 Universidad Politécnica de Madrid. Res. Gr. TERRA: Geomatics, Natural Hazards and Risks. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía C/ Mercator, 2, 28031 Madrid, Spain. jj.portela@upm.es; a.staller@upm.es
2 IGME-CSIC C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003. m.bejar@igme.es
3 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain jmdiaz@geo.ucm.es; jaalvare@geo.ucm.es
4 RISKNAT Group, GEOMODELS, Dept. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. gkhazar@ub.edu

Palabras clave: GNSS, tectónica, Zona de Cizalla de las Béticas Orientales, modelización cinemática.

Resumen

La Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), ubicada en la región sísmicamente activa de las Béticas Orientales (sureste de España), consiste en una serie de fallas activas y de movimiento lento que absorben parcialmente la convergencia de ~5 mm/año entre las placas de Eurasia y Nubia. Las bajas tasas de deslizamiento y la distribución de la deformación en toda la región dificultan la caracterización cinemática de estas fallas.

Aquí presentamos un campo de velocidades GNSS densificado para la ZCBO central, que incluye todas las estaciones continuas disponibles en la región, junto con observaciones continuas y de campaña realizadas en el marco del proyecto GeoActiva. Utilizamos estos resultados para caracterizar las principales fallas dentro de la ZCBO.

Además, las velocidades GNSS alimentan un nuevo modelo cinemático de bloques de la región, para el cual se emplea el software TDEFNODE, contribuyendo al conocimiento de la deformación tectónica en las Béticas Orientales.

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos SARAI (PID2020-116540RB-C22), GeoActiva (CGL2017-83931-C3-3-P) y NSOURCES (PID2020-119772RB-I00), financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, y de la ayuda FPU19/03929 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el programa "FSE invierte en tu futuro".

Abstract

The Eastern Betic Shear Zone (EBSZ), located within the seismically active area of the Eastern Betics (SE Spain), consists of a series of active, slow-moving faults that partially absorb the ~5 mm/yr convergence between the Eurasian and Nubian tectonic plates. The slow slip rates and the distributed strain across the region makes the kinematic characterisation of these faults challenging.

Here, we present a densified GNSS velocity field for the central EBSZ, including all available continuous stations in the region, along with continuous and campaign observations conducted under the GeoActiva project. We use these results to characterise the main faults within the EBSZ.

Additionally, the GNSS velocities feed a new kinematic block model of the region, built using the TDEFNODE software, helping us assess the tectonic deformation in the Eastern Betics.

This work has been developed in the framework of the projects SARAI (PID2020-116540RB-C22), GeoActiva (CGL2017-83931-C3-3-P) and NSOURCES (PID2020-119772RB-I00), funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033, as well us under the Grant FPU19/03929 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by "FSE invests in your future".

Análisis de la influencia del manto serpentinizado en la dinámica de terremotos de fallas inversas en el SO de Iberia.

Analysis of the influence of serpentinized mantle on thrust-fault earthquake dynamics offshore SW Iberia.

M. Prada[1], S. Martínez-Loriente[1], J.B. Ruh[1], V. Sallarès[1]

1 IMC-CSIC, 08003 Barcelona, Spain. mprada@icm.csic.es, smartinez@icm.csic.es, jruh@icm.csic.es, vsallares@icm.csic.es.

Palabras clave: peridotitas, comportamiento friccional, grandes terremotos, Lisboa 1755.

Resumen

La convergencia entre Eurasia y África en el SO de Iberia forma un límite de placa difuso con fallas litosféricas inversas y de deslizamiento. Aquí, el Horseshoe Abyssal Plain Thrust (HAT) desempeña un papel clave en la acomodación de la convergencia, generando terremotos profundos y de gran magnitud, y ha sido propuesto como la fuente del terremoto de Lisboa de 1755. Su geometría y las propiedades físicas de las rocas circundantes se determinaron mediante modelos tomográficos. Los grandes terremotos del HAT ocurren a profundidades significativas dentro del manto peridotítico, y no a profundidades inferiores donde la falla atraviesa manto serpentinizado. Mientras que la peridotita muestra un comportamiento *rate-weakening* (favorable a la propagación de la ruptura sísmica) a cualquier velocidad de deslizamiento en la falla, el comportamiento friccional de la peridotita serpentinizada depende de la presión, el contenido de agua, la temperatura y el deslizamiento. Las mediciones de laboratorio indican que la serpentinita pasa de un comportamiento *rate-strengthening* (desfavorable a la propagación de la ruptura sísmica) a tasas de velocidad de tectónica de placas a *rate-weakening* a tasas de deslizamiento sísmico. Este doble comportamiento sugiere que los grandes terremotos profundos, originados en peridotita prístina, podrían propagarse sísmicamente a través de la peridotita serpentinizada más débil, pero es difícil que nucleen. Aunque este mecanismo se ha propuesto para explicar el potencial del HAT para generar grandes terremotos, aún no se ha probado. En este estudio, utilizamos simulaciones numéricas de ruptura dinámica para investigar el papel de la peridotita serpentinizada en el proceso de ruptura y evaluar el potencial tsunamigénico. Exploramos varios escenarios de fricción para determinar el deslizamiento de la falla necesario para reproducir el levantamiento tsunamigénico estimado asociado al terremoto de 1755.

Abstract

The Eurasia-Africa plate convergence offshore SW Iberia forms a diffuse plate boundary with reverse and strike-slip lithospheric faults. Here, the Horseshoe Abyssal Plain Thrust (HAT) plays a key role in accommodating plate convergence, generating deep and large-magnitude earthquakes, and has been proposed to be the source of the 1755 Lisbon earthquake. Its geometry and the physical properties of surrounding rocks were determined through tomographic models. Large HAT earthquakes occur at significant depths within the peridotitic mantle, not at shallower depths where the fault intersects serpentinized mantle. While peridotite exhibits rate-weakening behavior (favorable for seismic rupture propagation) at any slip rate on the fault, the frictional behavior of serpentinized peridotite depends on pressure, water content, temperature, and slip. Laboratory measurements indicate that serpentinite transitions from rate-strengthening behaviour (unfavorable to seismic rupture propagation) at plate tectonic rates to rate-weakening at seismic slip rates. This dual behavior suggests that large deep earthquakes, originating in pristine peridotite, could rupture seismically through the weaker serpentinized peridotite, but nucleation is unlikely. Although this mechanism has been proposed to explain the HAT's potential to generate large earthquakes, it remains untested. In this study, we use dynamic rupture numerical simulations to investigate the role of serpentinized peridotite in the rupture process and assess the tsunamigenic potential. We explore various frictional scenarios to determine the required slip to explain the previously estimated tsunamigenic uplift associated with the 1755 Lisbon earthquake.

Modelización de la posible ruptura de la falla del Henares y escenarios sísmicos resultantes para el Terremoto de *Complutum*, s. IV CE (Madrid, España).

Modelling of the possible rupture of the Henares Fault and resulting shakemaps from the Roman earthquake of Complutum, 4th Century CE (Madrid, Spain).

M.A. Rodríguez-Pascua[1], J. Elez[2], P. G. Silva[2], M.A. Perucha[1], J. L. Giner-Robles[3], E. Roquero[4], T. Bardaji[5], R. Pérez-López[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. ma.rodriguez@igme.es, , ma.peucha@igme.es, r.perez@igme.es
2 Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad Salamanca. Ávila. j.elez@usal, pgsilva@usal.es
3 Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. jorge.giner@uam.es
4 Dpto. Edafología, E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. elvira.roquero@upm.es
5 Dpto. Geología. Fac. Ciencias, Universidad de Alcalá de Henares. Madrid. teresa.bardaji@uah.es

Resumen: La antigua ciudad romana de *Complutum* (Alcalá de Henares, Madrid), fundada en el s. I CE, fue una de las ciudades más importantes de *Hispania*. *Complutum* fue fuertemente dañada por un terremoto en el s. IV CE, resultó abandonada bruscamente, y tuvo que ser reconstruida y reubicada en un nuevo lugar. El efecto geológico de origen sísmico más importante presente en el registro arqueológico del yacimiento de La Magdalena es la licuefacción: diques de arena y cráteres de gravas por explosión afectando a instalaciones romanas, como cisternas, casas o tumbas en el mencionado yacimiento. De forma casi coetánea a la destrucción de La Magdalena y *Complutum* también fueron abandonadas de forma brusca varias villas romanas a lo largo del valle del Henares, lo que sugiere una afección sísmica regional. En este trabajo se propone a la falla del Henares como la fuente sismogenética más probable y se modelan posibles escenarios sísmicos (ShakeMaps) con la distribución espacial de aceleraciones. El modelo más conservador, con valores empíricos para la ruptura de la falla del Henares, como falla normal de 15,5 km de longitud, con dirección NE-SW buzando al NW, resulta en un terremoto de magnitud 6,2 Mw, con PGA_{max} de 0,55 – 0,45g (I ≥ VIII EMS) en todo el entorno urbano e industrial de la actual ciudad de Alcalá de Henares.

Palabras clave: Teremoto de *Complutum*, Falla del Henares, Efectos Arqueosismológicos de Terremotos (EAEs), licuefacción, ShakeMaps.

Abstract: *The ancient Roman city of Complutum (Alcalá de Henares, Madrid) was founded in the first century AD and it was one of the most important cities of Hispania. Complutum was severely damaged by an earthquake, giving place to its abrupt abandonment, relocation and rebuilt in a different place during the 4th Century CE. The most important earthquake geological effect (EAE) affecting the site is the occurrence of liquefaction processes (sand dikes and gravel blow craters) affecting roman facilities in La Magdalena site, such as water tanks, houses or tombs. Several other archaeological Roman sites were also abruptly abandoned along the Henares valley during the same period suggesting a more regional affection of this ancient earthquake. This work identifies the Henares Fault as the most probable seismogenic source for this ancient earthquake and potential seismic scenarios (ShakeMaps) are presented with the spatial distribution of accelerations. The most conservative model, with empirical values for the rupture of the Henares Fault, as a 15.5 km long normal fault, with NE-SW direction dipping to the NW, results in an earthquake of magnitude 6.2 Mw, with PGA_{max} of 0.55 - 0.45g (I ≥ VIII EMS) affecting to the urban and industrial sectors of the present-day city of Alcalá de Henares.*

Key words: *Complutum earthquake, Earthquake Archaeological Effects (EAEs), Liquefaction, ShakeMaps.*

INTRODUCCIÓN

Los principales efectos del terremoto de Complutum (s. IV CE; Rodríguez-Pascua *et al*., 2016 y Silva *et al*., 2019) se concentran en el yacimiento arqueológico de "La Magdalena". Éste se localiza en el término municipal de Alcalá de Henares, antigua *Complutum* en época romana y su lugar de emplazamiento presenta hasta siete fases diferenciadas de ocupación, que se iniciarían con una necrópolis calcolítica con cerámica campaniforme, dos periodos de ocupación industrial de época romana altoimperial que dan paso a una gran necrópolis de inhumación bajoimperial, que culminan en un proceso de ruralización del territorio con inhumaciones dispersas, tanto en el siglo VI como en el VII e inicios del VIII AD.

A mediados del siglo IV de nuestra era se produce un terremoto, posiblemente de ámbito local, que deja

claras evidencias en el registro arqueológico, no solo del yacimiento, sino del entorno próximo (Rodríguez-Pascua *et al*., 2016). Estos autores asignan una Mw entre 5,0 y 6,6.

SITUACIÓN GEOGRÁFICA, GEOLÓGICA Y CONTEXTO ARQUEOLÓGICO

El yacimiento arqueológico de La Magdalena se encuentra localizado en la Cuenca del Tajo, asentado sobre la llanura de inundación del río Henares a 4-6 m por encima del cauce actual del río, sobre un meandro de este (Fig.1). Los materiales del Holoceno que componen esta llanura de inundación son arenas y canales de gravas, con limos arcillosos a techo de la serie, con más de 10 m de potencia en su conjunto.

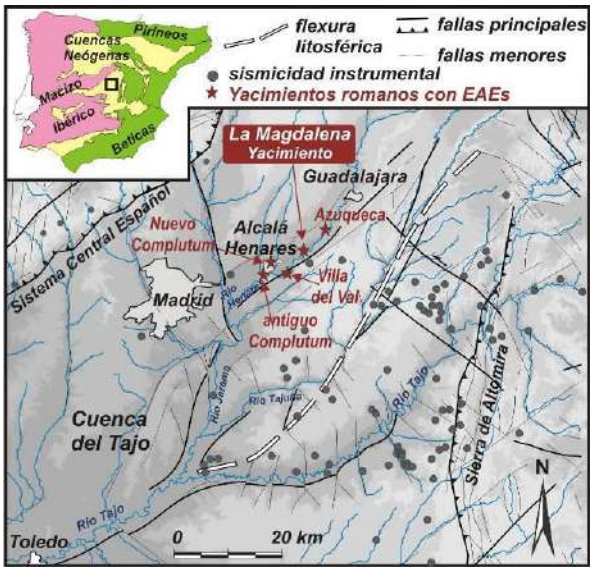


FIGURA 1. *Situación geográfica del yacimiento arqueológico de La Magdalena, antigua ciudad romana de Complutum (Alcalá de Henares, Madrid).*

ESTRUCTURAS DE LICUEFACCIÓN

Los restos de época altoimperial romana excavados en este yacimiento de La Magdalena presentan evidencias de deformaciones asociadas a fenómenos de licuefacción, clasificados como EAEs dentro de la categoría de efectos geológicos primarios según la clasificación de Rodríguez-Pascua et al., (2011). A continuación, se enumeran y describen brevemente este tipo de deformaciones:

Fracturas abiertas en el sustrato y licuefacciones afectando a construcciones: estas grietas son de carácter métrico con aperturas que superan los 30 cm. En uno de los casos afectan directamente a una cisterna construida mediante mortero hidráulico (Fig. 2). Las grietas cortan la base de la cisterna y son penetrativas, continuando en el sustrato sobre el que asienta la cisterna. Este tipo de mortero es muy resistente a las cargas y compresiones, por lo que estas grietas no pueden explicarse por la simple ruina de la construcción. En el fondo de la cisterna se han observado dos marcas de impacto, que podrían ser debidas al colapso de los muros laterales. Algunas de estas grietas también se producen por "*lateral spreading*" como consecuencia de los procesos de licuefacción que producen el colapso de las estructuras de varias construcciones. En el caso de la cisterna, el hundimiento producido por la extrusión de arenas en superficie genera su agrietamiento y una adaptación de los materiales plásticos infrayacentes (limos arcillosos), que actúan como capas confinantes. En la zona NE del yacimiento se han podido observar construcciones que contaban con escalones de sillería, "hundidos" 3 m con respecto a la cota media del yacimiento, a causa de la pérdida de cohesión del sustrato durante la licuefacción.

Cráteres por explosión de arenas y gravas: este tipo de estructuras se pueden observar principalmente en la zona N-NW del yacimiento. Esto se debe a que la capa que actúa como confinante en los procesos de licuefacción son las barras de gravas y suelos arcillosos que hay en esta zona. Algunos de estos cráteres afectan a construcciones romanas, concretamente a una cisterna hidráulica (Fig.3A). Dentro de este cráter, en el conducto de alimentación, aparecieron 48 herramientas metálicas, como cuchillos, podones, hachas, etc., de época romana. En otros casos es posible identificar estos cráteres de forma aislada repartidos por el yacimiento (Fig.3B y C), donde la morfología del cráter genera un anillo sobreelevado alrededor del mismo. Esta elevación generó sistemas de fracturas radiales y concéntricas alrededor del cráter, para acomodar la deformación generada por el ascenso de los materiales licuefactados. Este fenómeno también fue observado y documentado durante el terremoto de Calabria de 1783, donde los grabados de época muestran estos cráteres con los sistemas de fracturas descritos (Fig.3D). En otro de los cráteres aislados fueron extraídas 77 herramientas y restos metálicos romanos de la zona del conducto de alimentación (Rodríguez-Pascua *et al*., 2016).

Tumbas deformadas: gran parte de la necrópolis situada en la zona norte del yacimiento se encuentra alterada con respecto a lo que debió de ser su disposición original. Se ha podido constatar durante la fase de excavación del yacimiento que parte de las tumbas se encuentran basculadas y algunos de los cuerpos tenían la pelvis desplazada hasta la altura del tórax. Este basculamiento se produjo después de que los huesos perdiesen cohesión muscular entre si y permitiese su desplazamiento dentro del ataúd (se han encontrado restos de la madera de los mismos, así como de los clavos que habían empleado en su construcción). Estos basculamientos se debieron a intrusiones de arena (diques de arena) que produjeron el movimiento de los ataúdes que llegaron a "flotar" sobre este material fluido, generando el desplazamiento



FIGURA 2. *Cisterna de mortero hidráulico fracturada por fenómenos de "lateral spreading" producidos durante la licuefacción del sustrato arenoso.*

de los restos óseos contenidos en los ataúdes (Rodríguez-Pascua *et al*., 2023).

Aparte de los daños en el yacimiento de La Magdalena, tal y como se indica en el trabajo de Rodríguez Pascua *et al.*, (2016), durante la segunda mitad del siglo IV CE se produce el abandono brusco y reubicación en su posición actual de *Complutum* (Gómez-Pantoja, 2013), así como una serie de abandonos repentinos, incendios y/o cambios bruscos de uso de determinadas construcciones. Este es el caso de las Cass de Hypolito y Los Grifos en Alcalá, y l*a Villa del Val* o yacimientos en Azuqueca a lo largo del valle del Henares (Rascón Marqués *et al*., 1991; Cardín y Cuadrado, 2013).

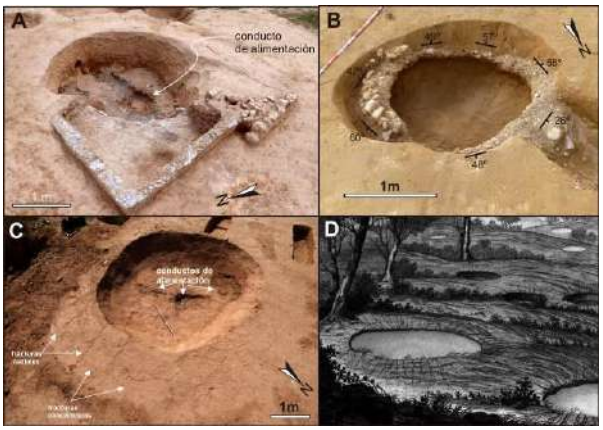


FIGURA 3. *Cráteres de arena/grava por explosión: A) Cráter afectando a cisterna hidráulica B) Cráter de arenas con forma de burbuja de la capa de gravas que actuó como capa confinante. C) Cráter de arenas/gravas donde se puede observar el anillo elevado alrededor del cráter con desarrollo de fracturas radiales y concéntricas. D) Cráteres de arena del terremoto de Calabria de 1783 (Figura modificada de Rodríguez-Pascua et al., 2016).*

MODELIZACIÓN DE LA FALLA DEL HENARES Y SHAKEMAP DEL TERREMOTO DE COMPLUTUM

Se ha realizado una modelización tipo ShakeMap (Fig. 4) de la distribución espacial de las aceleraciones horizontales máximas (PGA) que generaría la activación de la falla del Henares como responsable del evento histórico descrito. Para ello se han realizado de forma iterativa hasta 10 modelos de ShakeMap siguiendo una metodología adaptada del USGS (Worden *et al.*, 2020) a los terremotos históricos (Silva *et al.* 2017). Las evidencias arqueosismológicas expuestas apuntan de forma clara a que la intensidad mínima de evento se sitúa en IX (ESI07, Rodríguez-Pascua *et al*., 2016). Sobre la localización cartográfica de la falla normal se ha definido el tamaño de la fuente del modelo siguiendo los valores empíricos expuestos por Wells y Coppersmith (1998). Se ha validado el mejor modelo en el que la PGA máxima se acerca al límite inferior de intensidad IX ya que la zona del yacimiento tiene valores por encima del umbral inferior de intensidad VIII. Con esto por un lado aseguramos que el modelo es conservador y además lo adaptamos a la distribución de las formaciones superficiales dominantes, ya que entendemos que la zona afectada, dominada en superficie por materiales no consolidados y probablemente con un nivel freático muy superficial, debió sufrir fenómenos de amplificación importantes.

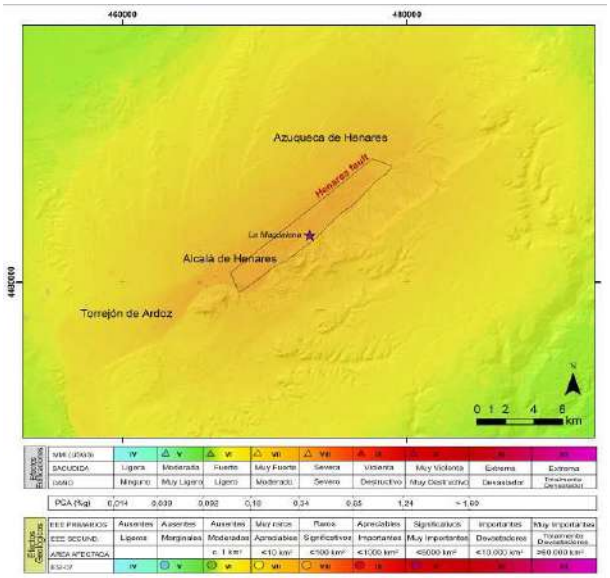


FIGURA 4. *ShakeMap indicando la distribución de aceleraciones a lo largo del valle del Henares con localización de algunas de las poblaciones actuales más relevantes. Se ha localizado con un punto el yacimiento arqueológico de La Magdalena. Como se observa una parte importante del valle amplifica los valores de PGA, haciendo que las aceleraciones superiores a 0.20g (amarillos oscuros y naranjas) se encuentren a kilómetros de la zona macrosísmica.*

Para este modelo seleccionado (falla normal con Mw 6,2), la longitud de la ruptura de falla se situaría en 15,5 km, con un área total de ruptura cercana a los 100 km^2 y un buzamiento relativamente alto, entorno a los 70º. Aun así, en el modelo seleccionado gran parte del área macrosísmica, que incluye ciudades con poblaciones tan importantes hoy

día como Alcalá de Henares o Torrejón de Ardoz, se sitúa en aceleraciones que superan ampliamente PGAs de 0,25 g, con muchos lugares por encima claramente de 0,35g. Este modelo, que insistimos es muy conservador, arroja valores de aceleración altos, en torno a 0.46g para la zona ocupada por el yacimiento de La Magdalena, pero también para todo el entorno urbano e industrial de Alcalá de Henares, incluyendo el yacimiento arqueológico de *Complutum*. Estos valores nos sitúan dentro de un rango de intensidad VIII EMS y justifican la destrucción y efectos geológicos de grado VIII-IX ESI-07 identificados mediante análisis arqueosísmicos (Silva *et al.*, 2019). El modelo indica que a lo largo del relleno Cuaternario del valle del Henares se debieron producir amplificaciones importantes paralelas al valle y a la falla en dirección NE-SW. Como se observa en el modelo resultante (Fig. 4), el conjunto del valle presenta aceleraciones relevantes incluso a largas distancias (fuera de la zona Macrosísmica s.s.). Estos valores superan en amplios sectores los 0,20g, valores por encima del límite de intensidad VII (Silva *et al.*, 2017)

CONCLUSIONES

Las deformaciones del sustrato observadas en el yacimiento altoimperial romano de La Magdalena, próximo a la ciudad de *Complutum* (actual Alcalá de Henares), están asociadas a fenómenos de licuefacción sísmica (siglo IV CE). Las licuefacciones observadas afectan a las construcciones romanas y se podrían generar con terremotos de Mw= 5,0-6,6 (Rodríguez-Pascua *et al*., 2016), para efectos en campo cercano. El modelo que mejor se ajusta a las características geológicas de la zona afectada apunta como causante a un terremoto de Mw 6,2 generado por la falla del Henares, con una ruptura de mas de 15 km de longitud y que generaría PGAs máximas de 0,55g y amplios sectores con aceleraciones superiores a 0,20g. La zona afectada se encuentra hoy en día densamente poblada, y no presentan ninguna regulación sobre protección sísmica de las edificaciones, ya que queda fuera de la Norma Sismoresistente vigente (NCSE-02). En caso de actividad recurrente de la falla del Henares los daños esperables serían catastróficos. La falla del Henares, es un accidente mal caracterizado y tan solo aparece representado en algunos de los cortes geológicos de la cartografía MAGNA de la zona. Este trabajo pone de manifiesto que los rasgos geomorfológicos indicados en los trabajos de Rodríguez-Pascua *et al*. (2016) y Silva *et al.* (2019) identifican este accidente tectónico como una potencial falla activa en uno de los entornos más densamente poblados de la Región de Madrid.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación I+D+i PID2021-123510OB-I00 (USAL) del MICIN AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

Cardín, I. y Cuadrado, M.A (2013): Yacimiento del Polígono UG XVI de Azuqueca de Henares. En: *La romanización en Guadalajara, arqueología e historia.* (M.L. Cerdeño, E. Gamo y T. Sagardoy, Eds.). Ed. La Ergástula, Madrid (España), 137-144.

Gómez-Pantoja, J. (2013): Complutum y su territorio. En: *La romanización en Guadalajara, arqueología e historia.* (M.L. Cerdeño, E. Gamo y T. Sagardoy, ed.). Ed. La Ergástula, Madrid (España), 63-72.

Rascón Marqués, S., Méndez Madariaga, A. y del Río Español, P.D. (1991): La Reocupación del mosaico del Auriga Victorioso en la villa romana del Val (Alcalá de Henares). Un estudio de microespacio. *Arqueología, paleontología y etnografía*,1: 181-200.

Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H. y Reicherter, K. (2011): A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology, *Quaternary International*, 242: 20-30.

Rodríguez-Pascua, M.A., Silva, P. G., Perucha, M.A., Giner-Robles, J.L., Heras, C., Bastida, A.B., Carrasco, P., Roquero, E., Lario, J., Bardaji, T., Pérez-López, y R., Elez, J. (2016): Seismically induced liquefaction structures in La Magdalena archaeological site, the 4th century AD Roman Complutum (Madrid, Spain). *Sedimentary Geology*, 344: 34-46.

Rodríguez-Pascua, M.A., Silva, P.G., Perucha, M.A., Giner-Robles, J.L., Heras, C., Bastida, A.B., Gómez Moreno, F., Pérez-López, R., Bardají, T., Elez, J., Roquero, E., Sánchez-Sánchez, Y., (2023): Forensic archeoseismology: using disturbed and liquefied earthquake graves to unravel past seismic events. *INQUA Congress*, Abstract Vol.

Silva, P.G., Elez, J., Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Roquero, E., Bardají, T. y Martínez-Graña, A.M. (2017). ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. *Quaternary International*, 451: 185-208.

Silva, P.G., Rodríguez-Pascua, M.A., Giner-Robles, J.L., Pérez-López, R.E., García-Tortosa, F.J., Gómez Vicente, P., Bardají, T., Perucha, M.A., Huerta, P., Lario, J.J. (2019): *Catálogo de los Efectos Geológicos de los Terremotos de España*, 2nd Ed.; Revisada y Ampliada; Riesgos Geológicos y Geotecnia 6; IGME: Madrid, Spain, 804 p.

Wells, D.L. y Coppersmith, K.J. (1998): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84: 974–1002.

Worden, C.B., Thompson, E.M., Hearne, M. y Wald, D.J. (2020): ShakeMap Manual Online: technical manual, user's guide, and software guide, U. S. Geological Survey.

Evidencias de un posible nuevo paleoterremoto en la ciudad de Cástulo (Alto Guadalquivir) en época tardorromana.

Evidence of a possible new paleoearthquake in the city of Cástulo (Alto Guadalquivir) in late Roman times.

M. Sánchez-Gómez[1], y J. Donaire-Ávila[2]

1 Dpto. Geología, CEACTEMA, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas 23071 Jaén. msgomez@ujaen.es
2 Dpto. Ing. Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, Campus Científico Tecnológico de Linares 23700 Jaén. jdonaire@ujaen.es

Palabras clave: Cástulo, Arqueosismología, paleoterremoto, Alto Guadalquivir.

Resumen

El valle del Alto Guadalquivir ha sido una región considerada de bajo riesgo sísmico hasta que, en la pasada década, varias series sísmicas, algunas de ellas con más de 6000 eventos, han hecho que se replantee esta valoración. Esta comunicación presenta evidencias de un posible paleoterremoto registrado en la ciudad romana de Cástulo, en las proximidades de la actual Linares (Jaén). Las excavaciones arqueológicas de 2023, financiadas por la Junta de Andalucía y dirigidas por Y. Jiménez Morillas, han registrado caídas direccionales de una columna y varios muros ocurridas en la segunda mitad del siglo V. Los muros colapsados cubrían objetos y utensilios cotidianos en buen uso, por lo que se descarta una ruina por abandono. La tipología de las construcciones afectadas y las formas de caída sugieren un sismo relativamente cercano posiblemente impulsivo. Aparte de las mencionadas series sísmicas, en la región se conocía sólo un evento histórico destructivo en 1170 y dos terremotos en 1951 de magnitudes > 5 M_s que no causaron grandes daños. De confirmarse, el evento aquí descrito completaría por tanto el catálogo de terremotos del Alto Guadalquivir y confirmaría que se trata de un área con capacidad para producir terremotos catastróficos. Dada la precisión de la reconstrucción arqueológica, podría ser posible evaluar el comportamiento de la construcción sometida al terremoto que causo tal colapso, y apuntar a algunas de las posibles fuentes sísmicas conocidas más próximas (p. ej. Sánchez-Gómez y Pérez-Valera, 2018).

Abstract

The Upper Guadalquivir valley has been considered a region of low seismic risk until, in the last decade, several seismic series, some of them with more than 6000 events, have made us reconsider this assessment. In this communication we present evidence of a possible paleoearthquake recorded in the Roman city of Cástulo, in near present-day Linares (Jaén). Archaeological excavations carried out during the year 2023, financed by the Junta de Andalucía and directed by Y. Jiménez Morillas, have documented directional collapses of a column and several walls in a dwelling during the second half of the 5th century. The collapsed walls covered profitable everyday objects and utensils, so that ruin due to abandonment can be ruled out. The typology of the affected buildings and the forms of collapse suggest a relatively near-fault earthquake, perhaps of the pulse-like ground motion type. Apart from the aforementioned seismic series, in the region only one historical destructive event in 1170 was known, and two instrumental earthquakes in 1951 with magnitudes > 5 M_s that did not cause major damage. If confirmed, the event described here would therefore complete the catalogue of earthquakes in the Upper Guadalquivir and confirm that this is an area with the capacity to produce catastrophic earthquakes. Given the accuracy of the archaeological reconstruction, it may be possible to seismically assess the building subjected to the earthquake that caused such a collapse, and to point out some of the closest known possible seismic sources (e. g. Sánchez-Gómez and Pérez-Valera, 2018).

Referencias

Sánchez-Gómez, M., y Pérez-Valera, F. (2018). *III Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología*. Volumen de resúmenes, 107–110.

Obtención de catálogos de terremotos mediante "*machine learning"* y aplicación al estudio de series sísmicas.

Creation of earthquake catalogs through machine learning and application to the study of seismic series.

J.L. Sánchez Roldán[1], J.A. Álvarez-Gómez[1] y J.J. Martínez-Díaz[1]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid. jl.sanchez.roldan@ucm.es; jaalvarez@ucm.es; jmdiaz@geo.ucm.es.

Palabras clave: Machine-learning, Sismotectónica, Cuenca del Guadalquivir.

Resumen

Durante los últimos años, las investigaciones sobre sismicidad y peligrosidad sísmica han ido introduciendo progresivamente técnicas de "*machine learning"* basadas en modelos de redes neuronales, especialmente aquellos pre-entrenados en la detección e identificación de terremotos (Mousavi y Beroza, 2022). En este trabajo, se plantea una metodología que persigue conseguir catálogos sísmicos lo más completos y precisos posible en la región Íbero-Maghrebí. Para ello, se emplean modelos de detección de terremotos sobre las estaciones sísmicas de la Red Sísmica Nacional (IGN, 2023) y una posterior relocalización con un modelo de velocidad 3D. A pesar de ciertas limitaciones, en los resultados preliminares se obtiene un catálogo sísmico de baja incertidumbre que permite realizar un análisis sismotectónico de una serie sísmica ocurrida en el extremo oriental de la cuenca del Guadalquivir durante el año 2018, con un terremoto máximo de Mw 3.9. Se interpreta como una secuencia compleja en la que se distinguen dos periodos de actividad separados espaciotemporalmente, cuyo origen podría estar parcialmente relacionado con variaciones de esfuerzos provocados por un episodio de lluvias particularmente intenso.

Abstract

During the last few years, research on seismicity and seismic hazard has progressively introduced machine learning techniques based on neural network models, especially those pre-trained in earthquake detection and identification (Mousavi and Beroza, 2022). In this work, we propose a methodology for obtaining seismic catalogues as complete and accurate as possible in the Ibero-Maghreb region. For this purpose, we use earthquake detection models on the National Seismic Network seismic stations (IGN, 2023) and a subsequent relocation with a 3D velocity model. Despite certain limitations, our preliminary results, obtained from a seismic catalogue of low uncertainty, allow us to perform a seismotectonic analysis of a seismic series that occurred in the easternmost part of the Guadalquivir basin during 2018, with a maximum earthquake of Mw 3.9. We interpret it as a complex sequence with two different spatiotemporal periods of activity, whose origin could be partially related to stress variations caused by a particularly intense rainfall episode.

Referencias

Instituto Geográfico Nacional (IGN), Spain. (2023). *Spanish Digital Seismic Network* [SEED data]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/ES

Mousavi, S. M., & Beroza, G. C. (2022). Deep-learning seismology. *Science*, 377(6607), eabm4470. https://doi.org/10.1126/science.abm4470

La falla de Alcoy: caracterización estructural y actividad reciente.

Structural characterization of the Alcoy Fault and evidences of recent activity.

E. Santamaría-Pérez[1], I. Medina-Cascales[1], P. Alfaro[1], M. De Ruig[2], I. Martin-Rojas[1]

1 Dpto. de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Campus San Vicente s/n, 03690, San Vicente del Raspeig, Alicante. eva.santamaria@ua.es, ivan.medina@ua.es, pedro.alfaro@ua.es, ivan.martin@ua.es
2. Oropesa BV, Van Bleiswijkstraat 183, 2582 LD The Hague, Netherlands. menno.deruig@gmail.com.

Palabras clave: fallas activas, falla salto en dirección, Cordillera Bética Oriental

Resumen

La cuenca de Alcoy (Cordillera Bética oriental) es una zona de sismicidad moderada. Los terremotos más significativos son el terremoto de Alcoy de 1620 y la serie sísmica de Muro de 1644 (Mezcua y Martínez-Solares, 1983). Una de las posibles fuentes sismogénicas de estos terremotos es la falla de Alcoy (García-Mayordomo, 1998). Esta falla tiene 15 km de longitud y tiene una orientación media N045E. En su bloque septentrional afloran rocas mesozoicas del basamento de la cuenca y rocas cenozoicas del relleno marino. En el bloque meridional afloran materiales del Plioceno al Holoceno pertenecientes al relleno continental de la cuenca (Pierson, 1987).

Los indicadores cinemáticos indican una componente principal de salto en dirección y una componente menor de salto normal. La cartografía de detalle de la zona de falla muestra una traza en patrón anastomosado, con planos verticalizados y *horses* de tipo *pop-up* con rotación sinistrosa. Se han observado varias evidencias de deformación reciente como la presencia de pliegues suaves de escala hectométrica en el bloque hundido, que provocan que abanicos aluviales del Plio-Pleistoceno bucen a contrapendiente. Además, depósitos coluviales que asignamos al Cuaternario muestran desplazamientos verticales centimétricos.

Abstract

The Alcoy Basin (Eastern Betic Range) is a late orogenic intramontane basin which presents a moderate seismicity as evidenced by the Alcoy earthquake of 1620 or the seismic series of Muro in 1644 (Mezcua and Martínez-Solares, 1983). One of the possible seismogenic sources of this seismicity is the Alcoy Fault (García-Mayordomo, 1998). Here, we present a structural characterization of this fault and evidence of its recent activity. The Alcoy Fault is a 15km-long fault with an average orientation of N045E. The northern block comprises Mesozoic basement rocks as well as Cenozoic marine deposits. In the southern block, thick Pliocene-Holocene continental deposits form the basin fill (Pierson, 1987).

Kinematic indicators on the fault plane display a major left-lateral component, and minor normal component. Detailed mapping of the Alcoy Fault shows an anastomosing pattern along strike, with steep fault planes and sinistral pop-up structures. Evidence of recent deformation is observed, such as hectometric-scale smooth folding in the downthrown block, where Plio-Pleistocene alluvial fans dip counter to the topographic slope direction. Colluvial deposits, assigned to the Quaternary, exhibit centimetric-scale vertical displacements.

Referencias

Mezcua, J., y Martínez-Solares, J., M. (1983). En: *Sismicidad del Area Ibero-Mogrebi*. IGN, Madrid, 299 p.

García-Mayordomo, J. (1998). *Riesgo Sísmico en la Cuenca de Alcoy (Alicante), Tesis de Máster*. Univ. Complutense de Madrid, 102 p.

D'Autrey, P. (1987). *Sedimentation et structuration synsedimentaire dans le bassin neogene d'Alcoy, Tesis Doctoral.* Univ. de Paris-sud, 315 p.

Análisis Arqueosismológico del Yacimiento Fenicio (Siglo VIII BCE) del *Cabezo Pequeño del Estaño* en Guardamar del Segura (Alicante, SE España).

Archaeoseismological analysis of the Phoenician Settlement (8th Century BCE) of Cabezo Pequeño del Estaño in Guardamar del Segura (Alicante, SE Spain).

P.G. Silva[1] y F. Prados Martínez[2]

1 Departamento de Geología, Universidad Salamanca, Escuela Politécnica Superior de Ávila, 05003-Ávila España. pgsilva@usal.es
2 Instituto Universitario de Investigación en Arqueología y Patrimonio Histórico. Univ. de Alicante. 03690 Alicante. fernando.prados@ua.es

Resumen: El presente trabajo analiza los efectos arqueosismológicos de un terremoto que afectó al yacimiento fenicio del "Cabezo Pequeño del Estaño" (Guardamar del Segura, Alicante) durante el siglo VIII a.C. Las evidencias sísmicas incluyen muros desplazados, plegados y derrumbados en construcciones de mampostería en hueso trabada con limo, incluyendo la muralla perimetral de la fortificación. En muchos casos se observan caídas orientadas, y el análisis de daños muestra una orientación con una dirección consistente E-W. No obstante, la mayor evidencia arqueosísmica es la importante fase de reparación de los daños con la construcción de anchos y contrafuertes trabados con barro y limo datados en el 740-700 a.C. El asentamiento constituía una antigua factoría fortificada para el comercio metalúrgico en el Mediterráneo y se asentaba en el margen sur de la antigua bahía del "Sinus Ilicitanus" (Bajo Segura). Se sitúa sobre la Zona de Falla del Bajo Segura responsable de fuertes terremotos como los de Orihuela (1048), Guardamar (1523) y Torrevieja (1829) de intensidad superior a VIII EMS y magnitudes ≥ Mw 6.5. El análisis de este terremoto antiguo aporta importantes datos para establecer la recurrencia de grandes terremotos en el mencionado accidente tectónico.

Palabras clave: Arqueosismología, Falla Bajo Segura, Cabezo del Estaño, Terremoto Antiguo, Alicante

Abstract: *This paper analyses the archaeoseoseismological effects of an earthquake that affected the Phoenician site of "Cabezo Pequeño del Estaño" (Guardamar, Alicante) during the 8th century BC. The seismic evidence includes displaced, folded and collapsed walls in constructions of dry-set masonry locked with silt, including the city-walls. In many cases, oriented falls of masonry blocks are observed and damage orientation shows a consistent E-W direction. However, the most important archaeological evidence is the important phase of damage reparation with the construction of wide stone buttresses locked with clays dated in 740-700 BC. The settlement was a fortified factory for the metallurgical trade in the Mediterranean and was located on the southern margin of the antique embayment of the "Sinus Ilicitanus" (Lower Segura Basin). It is placed just above the Bajo Segura Fault Zone responsible for the strong earthquakes of Orihuela (1048), Guardamar (1523) and Torrevieja (1829) with intensity above VIII EMS and magnitude ≥ Mw 6.5. This seems be the case of the studied ancient event and their analysis provides important data to establish the recurrence of strong earthquakes in the mentioned tectonic accident.*

Key words: *Archaeoseismology, Bajo Segura Fault, Cabezo del Estaño, Ancient Earthquake, Alicante.*

CONTEXTO GEOLÓGICO Y SISMOTECTÓNICO

El terremoto más antiguo evidenciado por registros arqueológicos en la Península Ibérica hasta la fecha es el del yacimiento argárico de La Tira del Lienzo (Totana, Murcia) fechado alrededor del año 1550 a.C., en la fase final de la Edad de Bronze (Ferrater *et al.*, 2015). Ese yacimiento situado sobre la Zona de Falla de Lorca-Alhama de Murcia (LAF), es uno de los más antiguos estudiados en la cuenca Mediterránea en la que los restos arqueosismológicos más antiguos analizados hasta la fecha corresponden a los inicios de la Edad de Bronce (c. 1900 - 1700 a.C.) en Oriente próximo (Nur y Burgess, 2008). El yacimiento arqueológico analizado en el presente trabajo es una fortificación fenicia del siglo VIII a.C. (770 – 750 a.C.) dedicada al comercio metalúrgico en el Mediterráneo (García Menárguez y Prados Martínez, 2014). Se encuentra situada en la margen sur de la antigua bahía del *"Sinus Ilicitanus"* (Bajo Segura) descrita en la *"Ora Maritima de Avieno"* (siglo IV a.C.) a escasos dos kilómetros de la actual Guardamar del Segura (Alicante). Según distintas reconstrucciones paleogeográficas de la depresión del Bajo Segura (Silva et al., 2015; Ferrer y Blázquez, 2022) este asentamiento fenicio se encontraba situado en una pequeña península en la mencionada bahía, resguardado del mar abierto por la flecha litoral de Guardamar (García Menárguez y Prados Martínez, 2014).

El Yacimiento del Cabezo Pequeño del Estaño (CPE) se encuentra situado sobre la Zona de Falla del Bajo Segura (BSF). Se trata de una las estructuras tectónicas

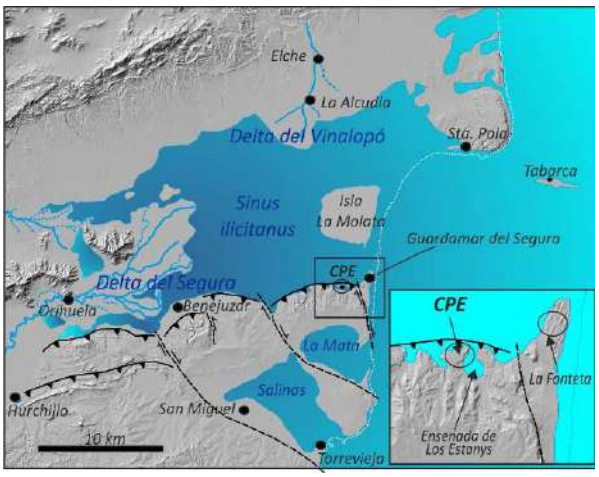


FIGURA 1. *Contexto paleogeográfico del Yacimiento del Cabezo Pequeño del Estaño (CPE) en la cuenca del Bajo Segura (antiguo Sinus Ilicitanus) durante los siglos VIII – V BCE. Se indican las poblaciones actuales, los antiguos deltas (Segura y Vinalopó), las diferentes estructuras tectónicas que definen la zona de Falla Bajo Segura (BSF) y la posición de la línea de costa actual.*

de la Península Ibérica con mayor actividad sísmica asociada durante el periodo histórico e instrumental con potencial para generar terremotos de una magnitud máxima 7,1 Mw (Alfaro et al., 2012). Se trata de una falla inversa ciega dirección principal ENE-WSW (N80ºE) que buza entre 60 a 30º hacia el Sur. La actividad de esta falla ciega ha generado varios pliegues activos en las formaciones de edad comprendida entre el Mioceno Superior y el Pleistoceno. Uno de estos marcadores de la deformación es la Formación "*Conglomerados del Segura",* que tiene buzamientos subverticales en su sector más occidental. En el área de estudio, dominan las margas (Hurchillo) y calcarenitas (Rojales) del Plioceno inferior. Estas formaciones plegadas son las que definen los pequeños entrantes y salientes a lo largo de la zona de falla en forma de relieves en cuesta facetados buzando hacia el norte. Estas formaciones plegadas se encuentran biseladas por la formación de una más o menos potente calcreta (Fm. Sucina) que se adapta al relieve marcando los replanos sobre los relieves facetados.

La BSF ha sido la responsable de varios terremotos históricos de intensidad ≥ VIII y magnitud estimada entre 6,6 y 6,9 Mw (Silva *et al*., 219), como son los terremotos de Orihuela (1048 AD), Guardamar (1533 AD) y fundamentalmente Torrevieja (1829 AD). En la zona de falla se diferencian tres segmentos de entre 12 y 8 km de longitud (Hurchillo, Benejúzar y Guardamar; Fig. 1). Estos se encuentran delimitados por fallas dextrales NW-SE que hacia el sur definen las pequeñas cuencas litorales ocupadas por las actuales Lagunas de La Mata y las Salinas de Torrevieja (Fig. 1). El yacimiento analizado se encuentra concretamente sobre su segmento más oriental (Guardamar) de 8 km de longitud y con potencial para generar terremotos de magnitud 6,6 – 6,8 Mw (Alfaro *et al*., 2012). Las estructuras murarias de la fortificación fenicia se encuentran construidas directamente sobre la calcreta cuaternaria (Fm. Sucina) con escasa o nula cimentación (García Menárguez y Prados Martínez, 2014). La ausencia de cimentaciones aumenta su vulnerabilidad ante acciones sísmicas lo que ya se ha puesto de manifiesto en yacimientos más antiguos de la Edad de Bronce (Ferrater *et al*., 2015).

ARQUEOLOGÍA

El yacimiento CPE constituía un pequeño asentamiento costero situado sobre una antigua península definida por un pequeño relieve en cuesta del flanco norte del pliegue de asociado a la BSF, constituida por margas y calcarenitas plio-cuaternarias en la zona de Guardamar del Segura. Estas se encuentran biseladas por la calcreta sobre la que se cimientan s.s. las construcciones. La llanura adyacente se encuentra situada en la cota actual de encauzamiento del río Segura o incluso 1 m por debajo de ella, y todavía se inunda con facilidad (Ferrer y Blázquez, 2022). Esta situación convertía a la depresión de los Estayns (Estaños o lagunas) situada inmediatamente al este de la península del CPE en una pequeña ensenada (Fig. 1) que pudo funcionar como puerto natural en el siglo VIII BCE. Esta situación prácticamente se mantiene hasta comienzos del siglo XVIII CE (1701 AD) cuando comienza el relleno artificial de las marismas y zonas lagunares existentes por parte del Obispado de Cartagena (Silva *et al.*, 2019; Ferrer y Blazquez, 2022). El yacimiento excavado ocupa unos 1500 m^2 y está constituido por una fortificación con almacenes, viviendas y talleres asociados, rodeados por una muralla defensiva perimetral que bordea la península a cota de la curva de nivel de 20 m (Fig. 3). Por el sur, el cuello de acceso a la antigua península se encuentra defendido por un foso. La Muralla perimetral se encuentra conformada por torres huecas y muros dobles huecos compartimentados en casamatas o casernas con accesos laterales. Estos compartimentos rectangulares se encontraban separados por muros o tirantes perpendiculares que sujetaban los muros dobles de la muralla (Fig. 3). El asentamiento posee dos fases constructivas bien diferenciadas que han sido fechadas mediante cerámica y otros elementos arqueológicos (García Menárguez y Prados Martínez, 2014). La primera fase (770 -750 BCE) en mampostería en hueso de bloques irregulares de calizas, calcarenitas y calcretas locales fue trabada con limo de marisma, rico en conchas.

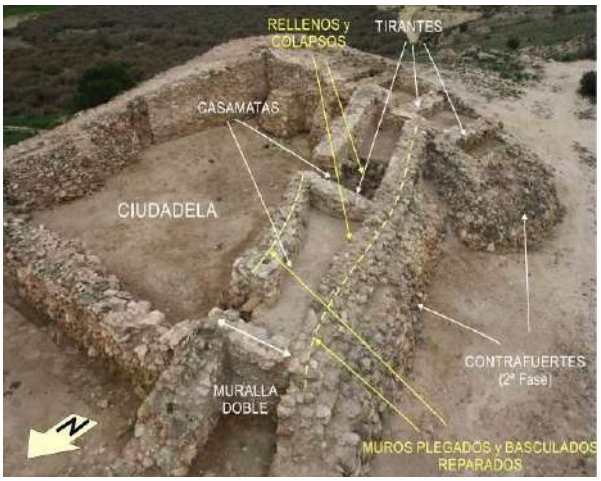


FIGURA 2. *Vista de la Ciudadela y Murallas del CPE identificando los diferentes elementos constructivos y reparaciones de estos.*

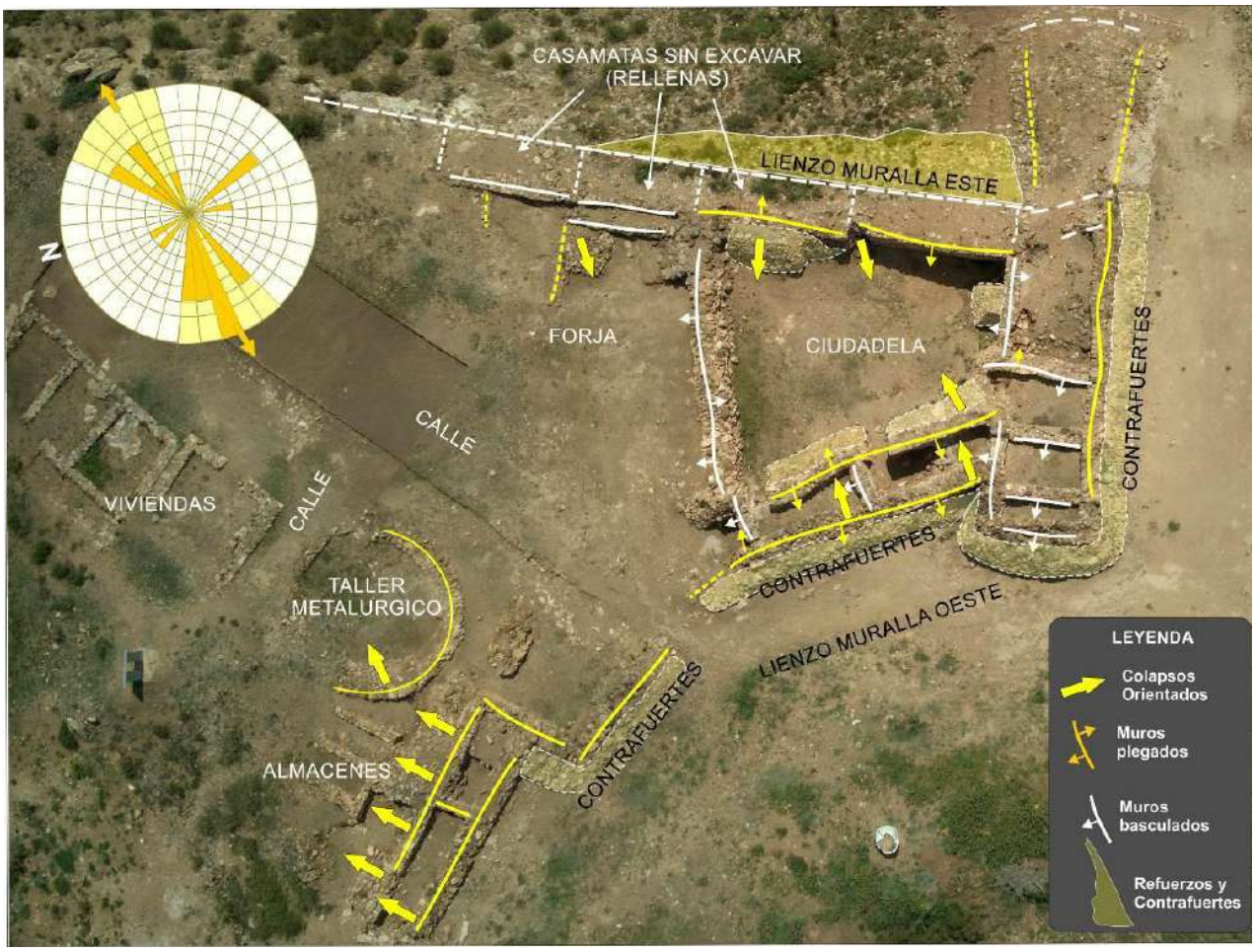


FIGURA 3. *Mapa de las deformaciones de posible origen sísmico y posteriores reparaciones (contrafuertes) registradas las estructuras murarias del Yacimiento fenicio del Cabezo Pequeño del Estaño.*

La segunda fase (740 – 700 BCE) consiste en reparaciones y anchos contrafuertes (~1 m) trabados con barro y limo trabajado a lo largo de la parte basal de las murallas. Los estudios arqueológicos indican que entre ambas fases constructivas ocurrió un terremoto que derribó parcialmente las murallas y que obligó a su reconstrucción y refuerzo (García Menárguez y Prados Martínez, 2014, Arteaga *et al.*, 2016). El asentamiento es finalmente abandonado en el año 650 BCE y se traslada a *"La Fonteta"*. Este es un asentamiento Fenicio más moderno situado unos 2 km al este en el cordón dunar de la actual Guardamar de Segura (Fig. 1).

ANÁLISIS ARQUEOSISMOLÓGICO

Las deformaciones registradas en el yacimiento corresponden fundamentalmente al basculamiento, plegamiento, desplazamiento y colapso de estructuras murarias. Los plegamientos y desplazamientos afectan fundamentalmente a los lienzos Norte y Oeste de la muralla alrededor de la ciudadela con dimensiones de algo más de una decena de centímetros (Fig. 3). Los basculamientos (fundamentalmente hacia el W) son más frecuentas en el lienzo oriental de la muralla. Por último, los colapsos se registran en el lienzo oeste de la de la Muralla hacia el interior de las Casamatas, pero también en las zonas de los almacenes adyacentes al Talle, donde poseen caídas orientadas hacia el NNE (Fig. 3). Estos niveles de colapso incluyen diferentes bloques desiguales que entierran y quiebran elementos cerámicos y niveles de incendio que permiten fechar arqueológicamente el evento destructivo. En diferentes zonas también se observan sillares desplazados y fracturados como consecuencia de la destrucción. En la zona de almacenes se observan caídas orientadas "en dominó" de los sillares de la muralla (Fig. 4A). Algunas casamatas y calles fueron parcialmente cubiertas por los derrumbes y no se repararon o vaciaron tras la destrucción (Fig. 4B y C).

Otros efectos arqueosísmicos consecuencia de la dinámica de la deformación son las marcas de impactos (Fig.4) y los sillares o bloques fracturados, similares a los descritos en yacimientos más antiguos en la Península construidos en mampostería en hueso (Ferrater et al., 2015). No obstante, el elemento más distintivo de este yacimiento son las reparaciones y contrafuertes que se adosaron a la muralla perimetral para su refuerzo (Fig. 3). Estos constituyen elementos arqueosísmicos post-sísmicos construidos para evitar el derrumbe definitivo de las murallas y testifican el importante estado de ruina en que quedaría esta. En la actualidad se conservan los primeros 1 -1,5 m de la base de la muralla y otras estructuras murarias, pero hay que tener en cuenta que estas murallas se levantaban al menos unos 6 m de altura. Esto junto a la nula cimentación de estas aumentarían su vulnerabilidad.

Dataciones C^{14} (Beta Analytics) en los niveles de incendios, maderas o restos orgánicos (conchas) situados bajo los derrumbes arrojan edades que permiten fechar el evento en la segunda mitad del siglo VIII a.C. (740 – 700 BCE). Estas cronologías son totalmente compatibles con la tipología y factura de los elementos cerámicos también enterrados bajo los derrumbes (García Menárguez y Prados Martínez, 2014). Estos datos junto con la construcción de los refuerzos y contrafuertes permiten asegurar que se trata de un evento que afectó a las construcciones en época fenicia y siguieron siendo funcionales durante algún tiempo más. La marcada direccionalidad E-W de las deformaciones permiten proponer su origen sísmico.



FIGURA 4. *Vista de distintos aspectos relacionados con el derrumbe de estructuras murarias en el yacimiento de CPE.*

CONCLUSIONES

Las deformaciones observadas indican un movimiento preferente del terreno en dirección E-W subparalelo a la dirección de la Falla del Bajo Segura sobre la que se asienta el yacimiento. Por tanto, las deformaciones son compatibles con una sacudida sísmica de dirección preferente E-W ocasionada por la propagación de ondas superficiales de componente horizontal ENE-WSW (Fig. 3). No obstante, los colapsos y derrumbes hacia el NNE (zona de almacenes) también son relevantes. El conjunto de las deformaciones orientaciones marcaría una dirección preferente del movimiento del terreno SSW-ENE compatible con el carácter inverso de este accidente tectónico, aunque no se le puede excluir la existencia de un comportamiento direccional NNE subsidiario tal y como indican análisis geodésicos en la cuenca del Bajo Segura (Sánchez-Alzola *et al*., 2014). Esta pequeña componente secundaria oblicua podría explicar las desviaciones sobre la dirección general E-W de la falla.

Dada la tipología de las deformaciones y la existencia de nulas cimentaciones en las construcciones afectadas puede proponerse una intensidad ≥ VIII EMS/MSK. De la misma forma, estos valores serían compatibles con el potencial sísmico de los diferentes segmentos de esta falla, capaces de generar terremotos de magnitud 6,4 a 6,8 Mw (Alfaro et al., 2012). El derrumbe generalizado de las murallas y paredes alrededor de la ciudadela apoyarían estos registros de tamaño sísmico. Dada la historia sísmica de la Falla del Bajo Segura es lógico asociarla al evento antiguo aquí analizado. Este, constituiría el terremoto más antiguo que puede relacionarse con esta falla a día de hoy.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto de investigación I+D+i PID2021-123510OB-I00 (USAL) del MICIN AEI/10.13039/501100011033/

REFERENCIAS

Arteaga, C., García Menárguez, A., Prados Martínez, F. y Baaudot, E. (2016): El Cabezo del Estaño de Guardamar (Alicante, España): Avance Preliminar de Evidencias Arqueosísmicas en un asentamiento Fenicio del Siglo VIII a.C. Mundo Investigación, 2 (1): 146-154.

Alfaro, P., Bartolomé, R, Borque, R.J.; Estévez, A., García-Mayordomo, J., García-Tortosa, F.J., Gil, A.J., Gràcia, E., Lo Iacono, C., Perea, H. (2012): The Bajo Segura Fault Zone: Active blind thrusting in the Eastern Betic Cordillera (SE Spain). *Journal of Iberian Geology* 38 (1): 271-284.

Ferrater, M., Silva, P.G., Ortuño, M., Rodríguez-Pascua, M.A. y Masana, E. (2015): Archaeoseismological Analysis of a Late Bronze Age Site on the Alhama de Murcia Fault, SE Spain *Geoarchaeology*, 30: 151–164.

Ferrer, C. y Blázquez, A.M. (2022): Evolución geomorfológica del litoral del Baix Vinalopó y Baix Segura en época histórica. En: *Carta Arqueológica Subacuática De Alicante II: El Sinus Ilicitanus* (Azuar, R. e Inglese, O. Coord.) Museo Arqueológico de Alicante (MARQ). 43-64.

García Menárguez, A. y Prados Martínez, F. (2014): La presencia fenicia en la península Ibérica: El Cabezo Pequeño del Estaño (Guardamar del Segura, Alicante). *Trabajos de Prehistoria* 71: 113-133.

Nur, A., Burgess, D. (2008). *Apocalypse: Earthquakes, Archaeology and the Wrath of God*. Princeton University Press. Princeton and Oxford. 309 p.

Sánchez-Alzola, A., Borque, M. J., Martín-Rojas, I., Garcia-Tortosa, F. J., Alfaro, P., Estévez, A., & Gil, A. J. (2014): Tasas de deformación GPS en la Cuenca del Bajo Segura (Cordillera Bético-Oriental). *Geogaceta*, 56, 3–6.

Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Elez, J., Roquero, E., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Bardají, T. y Perucha M.A. (2019): Historical earthquakes in the Lower Segura basin (SE Spain): geological and archaeological evidence from pre-roman to modern times. *Z. F. Geomorphologie*, 62 (2): 247–269.

Evidencias de reactivación de grandes paleo-deslizamientos cosísmicos en El Salvador.

Evidence of coseismic landslide reactivation in El Salvador.

M. Tsige[1], J. Garzón[1], M. Rodríguez-Peces[1], V. Jiménez[1], J.J. Martínez-Díaz[1] I. García- Flores[1]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, meaza@ucm.es, jmdiaz@ucm.es, julgarzo@ucm.es, martinjr@ucm.es

Palabras clave: Deslizamientos co-sísmicos, Reactivación, El Salvador.

Resumen

Los deslizamientos son uno de los fenómenos naturales que causan más daño económico y social en El Salvador, incluyendo la pérdida de miles de vidas humanas. Estos fenómenos se dan en todo el país teniendo como factores detonantes las precipitaciones y los sismos de origen tectónico. La distribución de los deslizamientos producidos por la precipitación se extiende por todo el país afectando prácticamente todas las litologías y aspectos topográficos. Sin embargo, la gran mayoría de los deslizamientos cósismicos se producen en una franja estrecha, localizada en la parte central del país, independientemente de la fuente (zona de subducción o cadena volcánica), distancia o magnitud del seísmo. Los análisis geomorfológicos y cartográficos en esta zona evidencian la existencia de deslizamientos de varias generaciones (todos ellos cosísmicos), que se pueden haber producido en distintas etapas y reactivados con los eventos sucesivos. Este hecho ha sido también confirmado mediante el análisis del Desplazamiento de Newmark (DN), comparando las aceleraciones críticas de las laderas originales (pre-inestabilidad), con la aceleración máxima de los movimientos fuertes del terreno (PGA) de 4 terremotos producidos entre 1982 y 2001. Los PGAs, para los 4 sismos se han obtenido empleando ecuaciones empíricas (Cepeda *et al., 2004* y Schmidt, *2010*). Los resultados del análisis del DN indican posibles reactivaciones de varios grandes deslizamientos que pueden haber sido producidos por los sismos 1982 y 1986 (Mw 7.3 y 5.7 respectivamente) y reactivados por los dos sismos posteriores, del 13 de enero y el 13 de febrero de 2001 (Mw, 7.7 y 6.6 respectivamente). Esto puede deberse al estado de las laderas compuestas por materiales ya propensos a la rotura por haber sufrido deformaciones internas (fatiga) con los sismos anteriores. El resultado de este trabajo ayuda a el análisis de las zonas de mayor susceptibilidad de inestabilidades y con ello los riesgos asociados.

Abstract

Landslides are one of the natural phenomena that cause the most damage, both economically and socially, in El Salvador, including the loss of thousands of human lives. These phenomena occur throughout the country, triggered by both rainfall and seismic activities. The distribution of landslides caused by precipitation extends throughout the country, affecting practically all type of lithology and topographic aspects. However, the vast majority of catastrophic landslides occurred in an area located in the central part of the country regardless of the source (subduction or volcanic arc), distance, or magnitude of the earthquake. Geomorphological and cartographical analyses in the area reveals landslides of various generations which may have triggered and reactivated by several successive events. This has been confirmed through Newmark Displacement (DN) analysis, comparing the critical acceleration obtained on the original slopes (pre-instability), with the peak ground accelerations (PGA) estimated for four earthquakes occurring between 1982 and 2001. The PGAs have been obtained using empirical equations (Cepeda *et al., 2004*, Schmidt, *2010*). The results of the DN analysis indicate possible reactivations of several large landslides that may have been triggered by the 1982 and 1986 earthquakes (Mw 7.3 and 5.7, respectively) and re-activated by the two subsequent earthquakes, January 13th and February 13th, 2001 (Mw 7.7 and 6.6, respectively). This is likely due to the weakening of the geological materials on the slopes due to previous earthquakes, which are prone to failure. The result of this work can help refine the analysis of coseismic landslide susceptibility and associated risks.

Referencias

Cepeda, J.M., Benito, M., Burgos, E.A., (2004), *Geological Society of America Special Paper*, 375.
Schmidt, V., (2010), *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 307pp.

Evidencias paleosísmicas de clustering entre rupturas de falla y erupciones volcánicas en el rift de Taupō, Nueva Zelanda, e implicaciones para la evaluación de la peligrosidad sísmica y volcánica.

Paleoseismic evidence for clustering of prehistoric fault ruptures and volcanic eruptions in the Taupō Rift, New Zealand, and implications for seismic and volcanic hazards.

P. Villamor[1], K. Berryman[2], N. Litchfield[1], D. Gomez-Ortiz[3], F. Martin-González[3], B. Alloway[4], K. Clark[1]

1 GNS Science, PO Box 30-368, Lower Hutt 5040, New Zealand p.villamor@gns.cri.nz, n.litchfield@gns.cri.nz, k.clark@gns.cri.nz
2 Berryman Research and Consulting, 18 Cluny Road, Plimmerton, Porirua 5026, New Zealand kelvin@brc.nz
3 ESCET- Area de Geologia, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipan s/n, 28933 Madrid, Spain david.gomez@urjc.es fidel.martin@urjc.es
4 Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Palabras clave: paleosismicidad, interacción falla-volcán, peligrosidad, rift volcánico.

Resumen

El centro volcánico de Okataina (Okataina Volcanic Centre, OVC) es un segmento magmático del rift de Taupō, situado en la Zona Volcánica de Taupō en la Isla Norte de Nueva Zelanda. El OVC está formado por dos lineaciones de volcanes activos situados dentro de calderas anidadas y con escasas fallas activas. Los grábenes de Whakatāne y Ngakuru, adyacentes al OVC, son segmentos del rift dominados por procesos tectónicos con numerosas fallas activas. Estudios de paleosismicidad en fallas cercanas a la OVC muestran que se han producido roturas de la falla al mismo tiempo que, o en proximidad temporal con, erupciones volcánicas principalmente riolíticas (Berryman et al., 2022; Villamor et al., 2022). Por ejemplo, durante la erupción de Rotoma (~9.400 años AP) rompieron tres fallas y alguna lo hizo más de una vez. En este estudio presentamos: los modos de rotura de falla posibles en relación con la inestabilidad volcánica y procesos magmáticos, si estas roturas fueron sismogénicas o no y cuáles son las implicaciones para la evaluación de la peligrosidad sísmica y volcánica.

Abstract

The Okataina Volcanic Centre (OVC) is a magmatic segment of the Taupō Rift, embedded within the Taupō Volcanic Zone of the North Island, Aotearoa New Zealand. The OVC contains two active volcanic lineaments embedded in large, nested caldera structures and with few active faults. The Whakatāne and Ngakuru grabens, adjacent to the OVC, are dominated by tectonic processes with numerous active faults. Paleoseismic studies of faults close to the OVC shows that individual fault ruptures have occurred at the same time, or in close temporal association with large volume, often rhyolitic, eruptions (Berryman et al., 2022; Villamor et al., 2022). For example, during the ~9.4 cal. ka Rotoma eruption, three faults ruptured, some more than once. Here we discuss possible modes of fault rupture in association with volcanic unrest and magmatic processes; whether these prehistoric ruptures were seismotectonic or not, and what and what the implications are for volcanic and seismic hazard.

Referencias

Berryman, K., Villamor, P., Nairn, I., Begg, J., Alloway, B.V., Rowland, J., Lee, J. y Capote, R. (2022). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 427, p.107552. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107552

Villamor, P., Litchfield, N.J., Gómez-Ortiz, D., Martin-González, F., Alloway, B.V., Berryman, K.R., Clark, K.J., Ries, W.F., Howell, A. and Ansell, I.A. (2022). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 427, p.107478. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107478

Interacción entre las fallas de las Béticas Orientales a partir del modelado de transferencia de esfuerzos de terremotos históricos

Fault interaction in the Eastern Betics; insights from stress transfer modelling of historical earthquakes

P. Yazdi[1], J. García-Mayordomo[2]

1 ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Mercator 2, Madrid 28031, España. pouye.yazdi@upm.es
2 Dpto. Riesgos Geológico y Cambio Climático, Instituto Geológico y Minero de España - CSIC, Calle la Calera 1, Tres Cantos 28760 España. Julian.garcia@igme.es

Palabras clave: EBSZ, Terremotos históricos, Interacción entre fallas, Transferencia de esfuerzos.

Resumen

Analizar la interacción entre las fallas de la corteza terrestre en zonas con una deformación tectónica lenta y ausencia de registros instrumentales de terremotos de gran magnitud es un desafío. Sin embargo, la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (EBSZ), siendo de las mismas características, ha experimentado grandes terremotos destructivos durante el último milenio, algunos ocurriendo en un corto período de una o dos décadas y a menos de 100 km entre sí. Ampliando los resulta-dos de Yazdi et al. (2023), que sugieren una conexión desencadenante de esfuerzos entre importantes eventos históricos del siglo XVI en la parte suroeste de la EBSZ, investigamos la posibilidad de interacción entre las fallas más importantes en la parte noreste de la EBSZ: Alhama de Murcia, Carrascoy y Bajo Segura.

Aplicamos el método de relajación viscoelástica multicapa y la estimación de los esfuerzos de Coulomb para examinar las hipótesis de desencadenamiento durante una secuencia de terremotos históricos significativos con magnitudes superiores a Mw5.0 que afectaron a esta zona entre los siglos XVII y XIX.

Nuestros hallazgos contribuyen a comprender el alcance de la interacción entre las fallas activas en esta zona y las posibles fallas causantes de la sismicidad pre-instrumental, que continuó hasta principios del siglo XX en el área de estudio.

Abstract

Exploring the crustal fault interaction in areas with slow tectonic deformation and the absence of instrumental records of large-magnitude earthquakes is challenging. Being of the same character, the Eastern Betic Shear Zone (EBSZ), however, has seen large destructive earthquakes during the last millennium, and some occurred within a short period of one or two decades and at a distance of less than 100 km. Expanding upon the results from Yazdi et al. (2023), suggesting a stress-triggering connection among important historical events in the 16th century in the southwestern part of the EBSZ, we investigate the possibility of interaction between the most significant faults in the northeastern part of the EBSZ: Alhama de Murcia, Carrascoy and Bajo Segura.

We apply the multilayered viscoelastic relaxation method, and the estimation of Coulomb failure stress to examine assumptions of earthquake triggering during a sequence of significant historical earthquakes with magnitudes greater than Mw5.0 hitting this zone between the 17th and 19th centuries.

Our findings contribute to understanding the extent of the main active fault interaction in this area and the possible causative faults for the pre-instrumental seismicity that continued to the beginning of the 20th century in the study area.

Referencias

Yazdi, P., García-Mayordomo, J., Álvarez-Gómez, J. A., Gaspar-Escribano, J. M., y Masana, E. (2023). *Tectonics*, *42* doi:10.1029/2023TC007917

Ejemplo actual de formación de un cañón en roca (La Cazuela de Ricobayo, NW de España)

Present day example of bedrock canyon formation (La Cazuela de Ricobayo, NW Spain).

L. Antón [1]

1 Departamento de Ciencias Analíticas. Facultad de Ciencias. UNED. Urbanización Monte Rozas, Avenida de Esparta s/n. Carretera de Las Rozas al Escorial km 5 28232 Las Rozas-Madrid. lanton@ccia.uned.es

Palabras clave: erosión fluvial, incisión, knickpoint, aliviadero, presa.

Resumen

En la presente comunicación mostramos un ejemplo sin precedentes de una serie de episodios de erosión fluvial que ocurrieron en los años 30 en el aliviadero de la presa de Ricobayo. El ejemplo demuestra que en condiciones de desequilibrio la erosión fluvial puede ser extremadamente rápida, incluso en rocas mecánicamente competentes y con caudales moderados.

La presa y el aliviadero se construyeron simultáneamente entre 1929 y 1933. El embalse se llenó a finales de 1933 y entre enero de 1934 y marzo de 1936 se vertieron caudales pequeños a moderados (~100-1000 m^3/s) a través del aliviadero en roca situado en la margen izquierda de la presa. Los caudales evacuados desencadenaron sucesivos eventos erosivos, que dieron lugar a la formación de un nuevo cañón con cabecera en forma de anfiteatro. La formación del cañón se produjo mayoritariamente en cinco grandes episodios erosivos e implicó un retroceso de la cabecera de más de 270 m, una incisión de ~100 m y un ensanchamiento del cañón entre 100~160 m, en seis años. Los grandes volúmenes erosionados no muestran relación con los caudales evacuados por el aliviadero, y las características geomecánicas y estructurales de la roca (granito) no indican una especial debilidad asociada a la misma. Sin embargo, el patrón de fracturación si parece ejercer un importante control en la evolución y la morfología del nuevo cañón (Antón et al., 2015).

Abstract

We present unprecedented evidence for a series of fluvial erosion events that occurred in the 30s in the Ricobayo dam's spillway. The example demonstrates the potential for extremely rapid transient fluvial erosion, even in mechanically strong rocks and with moderate flood discharges.

The dam and spillway were simultaneously constructed between 1929 and 1933. The reservoir filled with water by the end of 1933, and from January 1934 to March 1936 a series of moderate spillway overtopping events occurred (100 to ~1000 m^3/s). The flows overtopping the unlined rock spillway induced successive scour events forming a new amphitheatre-headed gorge. The gorge formation occurred mostly in five main scour events, which led to periods of large and rapid headcut (>270 m), incision (~100 m) and widening (~160 m) over 6 years. The amount of erosion demonstrates no relationship with flood magnitude, and the granitic bedrock demonstrates mechanically strong. Instead, the fracture pattern of the bedrock appears to be the primary control on the evolution and morphology of the new gorge (Antón et al., 2015).

Referencias

Antón, L., Mather, A., Stokes, M., Muñoz-Martín, A. and De Vicente, G. (2015). Nature Communications 6, 7963. https://doi.org/10.1038/ncomms8963

Herramientas para analizar e interpretar de forma automática los productos del European Ground Motion Service: nueva versión mejorada de las ADATools.

Tools for automatically analyzing and interpreting products from the European Ground Motion Service: new and improved version of the ADATools.

A. Barra[1], M. Cuevas-González[1], J. Navarro[1], P. Ezquerro[2], R. Palamà[1], M. Béjar Pizarro[2], R.M. Mateos[2], J. López-Vinielles[2], J. Rivera-Rivera[2,3], F. de-Urmeneta[1], C. Guardiola-Albert[2], O. Monserrat[1].

1 Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya-CERCA (CTTC-CERCA), Castelldefels, 08860 Barcelona, España. abarra@cttc.cat, mcuevas@cttc.cat, jnavarro@cttc.cat, rpalama@cttc.cat, furmeneta@cttc.es, omonserrat@cttc.cat

2 IGME-CSIC C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003, España. p.ezquerro@igme.es, m.bejar@igme.es, rm.mateos@igme.es, j.lopez@igme.es, js.rivera@igme.es, c.guardiola@igme.es

3 Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía. Campus Sur, 28031 Madrid.

Resumen: La aplicación de técnicas de interferometría satelital SAR Multi-Temporal (MT-InSAR) ha experimentado un notable aumento desde el lanzamiento de los satélites Copernicus Sentinel-1 en 2014. Este avance ha permitido la generación de mapas de desplazamiento detallados gracias a una política de acceso de datos abierta y gratuita. El European Ground Motion Service (EGMS) proporciona miles de millones de puntos de medición de desplazamiento gratuitos anualmente desde 2022, cubriendo gran parte de Europa. Sin embargo, su potencial no se ha explotado por completo. Proyectos como RASTOOL y SARAI están desarrollando herramientas automatizadas, como las ADATools, diseñadas para simplificar y facilitar la extracción, análisis e interpretación de los datos proporcionados por el EGMS. En este trabajo se presentan algunas de las herramientas clave desarrolladas, que incluyen desde la detección automática de Áreas de Deformación Activa (ADAs) hasta la identificación de los procesos responsables y la caracterización temporal. Esta última herramienta permite determinar si cada ADA está experimentando una aceleración, una desaceleración o si permanece sin cambios significativos de velocidad en su período más reciente. Estas herramientas ofrecen información crucial para la gestión del territorio y la evaluación de riesgos potenciales.

Palabras clave: EGMS, InSAR, Áreas a Deformación Activa, ADA.

Abstract: *The use of Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Interferometry (MT-InSAR) techniques has grown since the launch of the Copernicus Sentinel-1 satellites in 2014. This has enabled the creation of detailed displacement maps thanks to a policy of open and free data. The European Ground Motion Service (EGMS) provides billions of free displacement measurement points annually since 2022, covering much of Europe. However, these data are still not fully utilized. Projects like RASTOOL and SARAI are developing automated tools, such as ADATools, to simplify the extraction, analysis, and interpretation of EGMS information. This paper presents some of the key tools developed, ranging from automatic detection of Active Deformation Areas (ADAs) to the identification of the responsible processes, along with temporal characterization to determine if each ADA is accelerating, decelerating, or showing no significant changes in velocity in the most recent period. These aspects provide crucial information for land management and the assessment of potential risks.*

Key words: *EGMS, InSAR, Active Deformation Areas, ADA.*

INTRODUCCIÓN

La detección y el monitoreo de los movimientos del suelo a gran escala, abarcando áreas nacionales y continentales, es actualmente posible mediante técnicas avanzadas de Interferometría Satelital Multi Temporal (MTInSAR) que se benefician de la disponibilidad de la extensa colección de imágenes del satélite Copernicus Sentinel-1 y el lanzamiento del Servicio Europeo de Movimiento del Terreno (EGMS, por sus siglas en inglés). Ante esta realidad, se ha convertido en una prioridad desarrollar soluciones automatizadas que permitan realizar un análisis e interpretación integrados de este extenso conjunto de datos interferométricos.

El EGMS ofrece miles de millones de Puntos de Medición (MPs) para el análisis de deformaciones a nivel nacional, ofreciendo un mapa de desplazamiento de Europa de acceso gratuito, derivado de datos de PSI (Interferometría de Puntos Persistentes) de Sentinel-1 (Costantini et al., 2021; Crosetto et al., 2020, 2021). Dado el vasto volumen de datos, el examen manual de las áreas de deformación del suelo se torna laboriosa, y es imperativo automatizar el proceso de "interpretación de los datos radar" (Farina et al., 2007), especialmente para

identificar y analizar las miles de áreas de movimiento activo.

El conjunto de herramientas ADATools (Navarro et al., 2019, 2020; Tomás et al., 2019), desarrollado en el marco de proyectos como MOMIT (H2020 – 777630), Safety (ECHO/SUB/2015/718679/Prev02), y U-Geohaz (CPM-2017-PP-AG – 783169), tiene como objetivo facilitar el uso y la interpretación de mapas de desplazamientos sobre zonas extensas derivados mediante MTInSAR. Compuesta por dos módulos principales –ADAFinder y ADAClassifier–, estas herramientas cumplen distintos propósitos. ADAFinder realiza la detección automática de Áreas de Deformación Activa (ADAs) a partir de mapas de desplazamiento derivados de MTInSAR. ADAClassifier va un paso más allá clasificando el tipo de proceso de deformación experimentado por cada ADA, incluyendo deslizamientos, subsidencia, levantamiento, procesos kársticos, y asentamientos constructivos. Inicialmente diseñadas para proyectos localizados o regionales, la disponibilidad de datos EGMS ha permitido expandir la aplicación de ADATools a nivel continental. En el marco de los proyectos RASTOOL (DG-HECHO, UCPM-PJG-101048474) y SARAI (MCIN/AEI), las ADATools se han mejorado y adaptado para su utilización y aplicación masiva a los productos del EGMS, con la potencialidad de ser aplicadas a nivel continental.

Adicionalmente, se han integrado nuevos módulos de análisis para complementar las herramientas ADATools. Uno de estos módulos es el TSClassifier, que se encarga de clasificar temporalmente los MPs analizando sus series temporales (TS) de desplazamiento para definir si el movimiento muestra aceleración, deceleración, o permanece sin cambios significativos de velocidad en el último periodo medido. Leyendo el output del TSClassifier, ADAClassifier es capaz de añadir este atributo temporal a las ADAs.

EXTRACCIÓN DE AREAS ACTIVAS (ADAs)

ADAFinder permite detectar y extraer las ADAs más significativas, reduciendo sustancialmente el tiempo requerido para el análisis de mapas de desplazamiento extensos. Esta herramienta proporciona un mapa de ADAs que cumple un doble propósito: ofrece una visión global que permite una rápida visualización y localización de áreas activas detectadas, y resume información clave como la velocidad anual media, la deformación acumulada y un Índice de Calidad (QI) que evalúa la fiabilidad de cada ADA detectada. Para obtener una descripción completa del algoritmo implementado por ADAFinder, se recomienda consultar Barra et al. (2017).

ADAFinder permite a los usuarios filtrar los datos de entrada (opcionalmente) y extraer polígonos de ADA, mediante el ajuste de unos pocos parámetros definidos por el usuario, mejorando la flexibilidad y usabilidad de la herramienta.

Cuando el enfoque se centra específicamente en la extracción de ADAs, sin considerar el filtrado, los principales parámetros a configurar son:

1. Umbral de velocidad. Este parámetro establece el valor mínimo de velocidad (en valor absoluto) requerido para considerar cada MP como activo. Es importante tener en cuenta que los MPs que no alcancen este umbral no se consideran inherentemente estables, pero se excluyen de la categorización activa.
2. Radio de vecindad. Este parámetro establece la distancia entre dos puntos necesaria para que se consideren vecinos, formando un grupo.
3. Número mínimo de MPs activos y vecinos. Este parámetro dicta el recuento mínimo de MPs activos y vecinos esenciales para designar un área como ADA.

Estos parámetros guían colectivamente el proceso de extracción, identificando áreas como polígonos de ADA donde, como mínimo, converge un número mínimo especificado de MPs activos y vecinos.

CLASSIFICACIÓN DE AREAS ACTIVAS

ADAClassifier utiliza como dato de entrada las ADAs generadas por ADAFinder y realiza una serie de pruebas para determinar, para cada una de estas ADAs, el tipo de proceso que podría estar generando el desplazamiento. Con la utilización de entradas auxiliares, se verifican hasta cinco procesos diferentes: subsidencia, asentamiento, levantamiento, procesos kársticos y deslizamiento.

Las entradas auxiliares incluyen mapas de pendiente y aspecto derivados del Modelo Digital del Terreno (MDT), mapas geológicos, inventarios (para cada uno de los procesos considerados), valores de componentes horizontales y verticales de velocidad (VV y VH). Como se ilustra en la Figura 1, estos inputs son obligatorios u opcionales, dependiendo del fenómeno específico, y van a completar la información de las ADAs, como la velocidad media en la línea de visión del satélite (LOS). Si bien algunas entradas como la pendiente y el aspecto derivados del MDT, los polígonos de ADA y los MPs que pertenecen a las ADAs son siempre obligatorios, otras, como los inventarios, son opcionales ya que pueden no estar disponibles para todas las áreas.

Con respecto a la antigua herramienta (Navarro et al., 2019, 2020; Tomás et al., 2019), el nuevo ADAClassifier presenta un algoritmo con un enfoque totalmente nuevo. Esta nueva metodología emplea un sistema de puntuación para categorizar las ADAs en fenómenos de deformación específicos, ya sean confirmados o potenciales. Al igual que en la versión anterior, se utilizan diversas entradas temáticas y auxiliares en el proceso de cribado, pero en este caso cada entrada se analiza con un árbol de decisión separado e independiente. La Figura 2 muestra como ejemplo uno de los cuatro subárboles, dedicado a la clasificación de deslizamientos, el cual comprueba si la intersección de un ADA con un polígono del inventario supera un determinado umbral (THLA02) establecido por el usuario. En este caso se examinan dos condiciones (Fig. 2): la existencia de un inventario de deslizamientos y, de ser así, si el porcentaje de intersección supera el umbral THLA02. En función de las respuestas se asignan diferentes puntuaciones (SCLA03, SCLA04 Y SCLA05 en la Figura 2). Además de este

subárbol, hay otros tres que evalúan otros aspectos relacionados a los deslizamientos. A través de estos subárboles se suman o restan puntos que influyen en la decisión final, determinando con qué nivel de confianza se puede atribuir cada ADA a un proceso específico. Este procedimiento se repite para cada uno de los procesos que ADAClassifier puede identificar, asignando a cada ADA una puntuación por proceso. Finalmente, se determina la clasificación final de cada ADA, atribuyéndole el proceso con la puntuación más alta.

La Figura 3 muestra un ejemplo de ADAs extraídas y clasificadas en un área de aproximadamente 4600 km^2 en la Cuenca del Alto Guadalentín (España). Esta región es particularmente susceptible a la subsidencia causada principalmente por la sobreexplotación de aguas subterráneas.

CLASSIFICACIÓN SERIES TEMPORALES

El TSClassifier es una herramienta desarrollada en Python, diseñada con el objetivo de clasificar las TSs del EGMS, permitiendo detectar rápidamente la tendencia del movimiento de los datos ya sea acelerando, manteniéndose constante o desacelerando. Esta herramienta procesa el archivo CSV de puntos generado por ADAFinder.

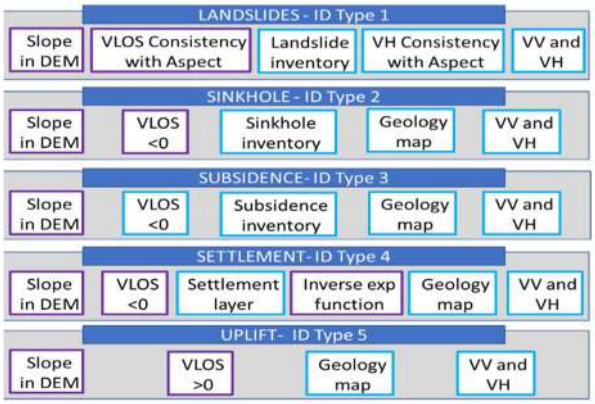


FIGURA 1. *Listado de los inputs auxiliares analizados por cada proceso. En color lila los inputs obligatorios, en azul los opcionales.*

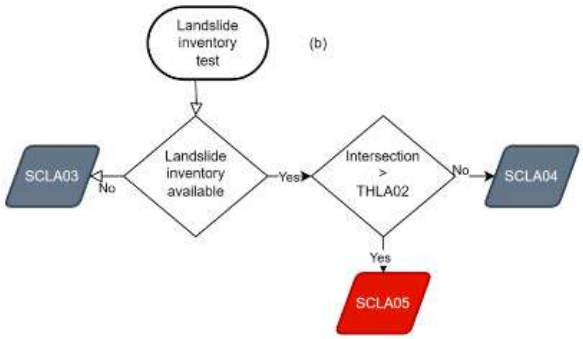


FIGURA 2. *Ejemplo de subárbol de decisión que utiliza ADAClassifier para analizar el input del inventario en la evaluación del proceso de deslizamientos. SCL0X: puntos asignados según las diferentes respuestas. THLA0X: umbral de porcentaje de intersección con un polígono del inventario de deslizamientos.*

TSClassifier permite a los usuarios realizar análisis en cada TS individual o agregar y analizar el TS promedio de los MPs activos pertenecientes a cada ADA, lo que permite una clasificación temporal de cada ADA basada en su comportamiento temporal promedio.

La Figura 4 muestra un ejemplo de TSs medias de dos ADAs diferentes, clasificadas automáticamente con las clases de deceleración (arriba, TSClass=1) y aceleración (abajo, TSClass=3).

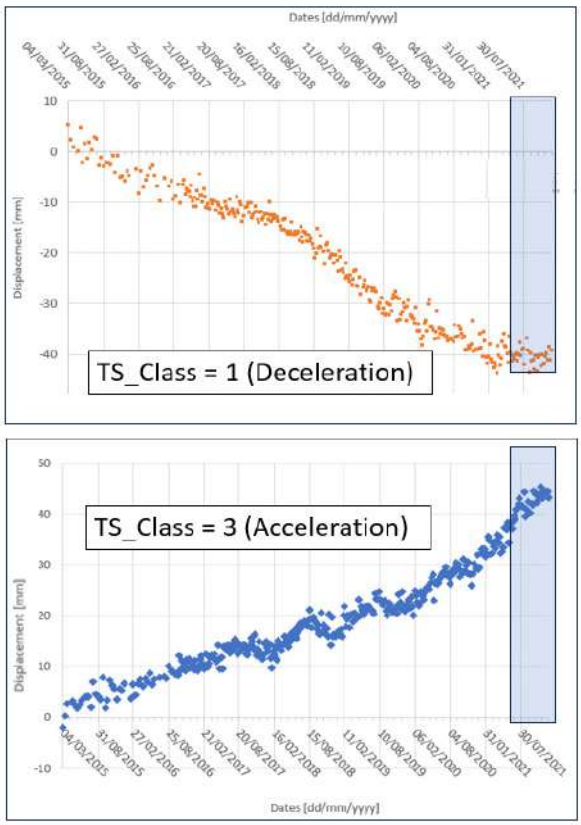


FIGURA 4. *Ejemplo de TS clasificadas con el TS_Classifier, arriba se ha clasificado como desaceleración y la de abajo como aceleración. El rectángulo azul indica el último periodo utilizado para determinar la clase (6 meses).*

CONCLUSIONES

Las herramientas ADATools desarrolladas en proyectos como MOMIT, RASTOOL y SARAI, son claves para facilitar el uso de los productos EGMS en las actividades prácticas como la gestión del territorio y evaluación de riesgos. Su aplicación a escalas reducidas permite la gestión de una gran cantidad de información de forma eficiente e inteligente. Un enfoque selectivo, basado en el tipo de proceso de deformación de interés, las ADAs de mayor velocidad o aquellas en proceso de aceleración, o que impactan infraestructuras críticas, ejemplifica su versatilidad. Concebidas para abordar extensas áreas geográficas, estas herramientas están diseñadas para un aprovechamiento intensivo de los productos EGMS. El primer resultado de esta aplicación a gran escala es la publicación del European ADA Web Map (https://groundmotionadas.com/), generado con la herramienta ADAFinder.

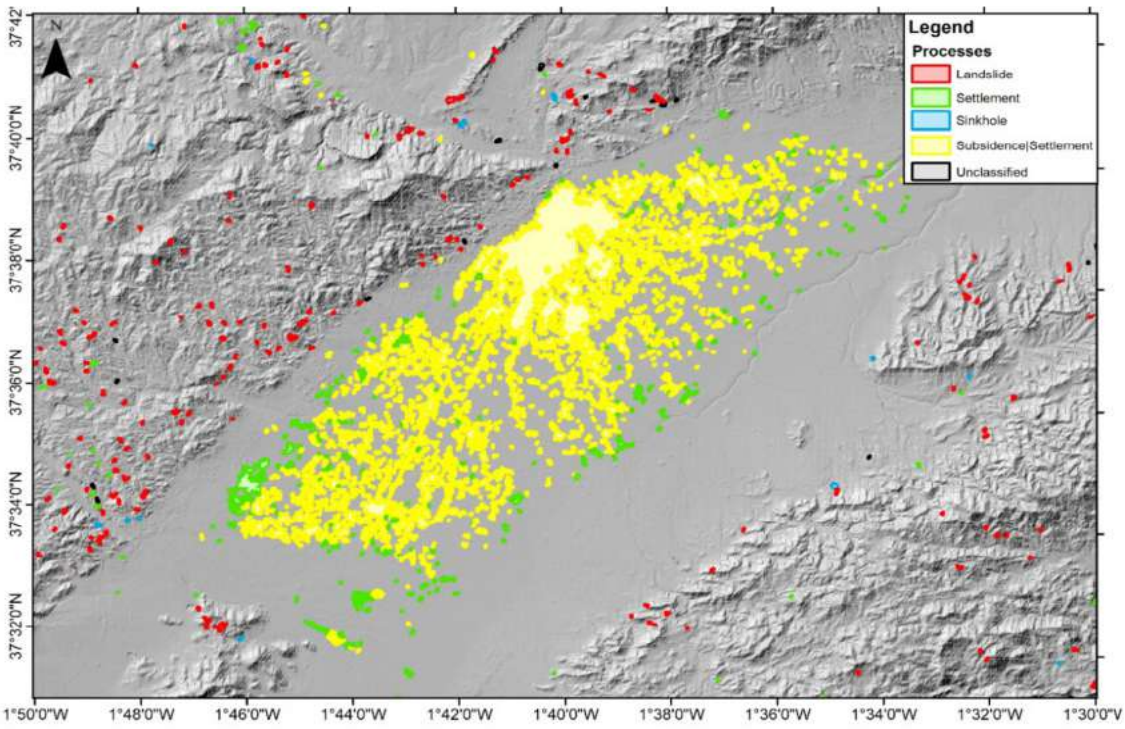


FIGURA 3. *Ejemplo de ADAs clasificadas sobre la región del Alto Guadalentín*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto SARAI (PID2020-116540RBC22), financiado por el (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y EGMS RASTOOL (GA 101048474), financiado por la Comisión Europea, Directorate General Humanitarian Aid and Civil Protection (DG-ECHO).

REFERENCIAS

Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., Crosetto, M., Sarro, R., González-Alonso, E., Mateos, R. M., Ligüerzana, S., López, C., & Moretti, S. (2017). *A methodology to detect and update active deformation areas based on Sentinel-1 SAR images*. Remote Sensing, 9, 10, 1002.

Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Novali, F., Passera, E., Dehls, J., Larsen, Y., Marinkovic, P., Eineder, M., Brcic, R., Siegmund, R., Kotzerke, P., Probeck, M., Kenyeres, A., Proietti, S., Solari, L., & Andersen, H. S. (2021). *European Ground Motion Service (EGMS)*. In IEEE, International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 3293–3296.

Crosetto, M., Solari, L., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., & Moldestad, D. A. (2020). *Ground deformation monitoring at continental scale: The european ground motion service*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 43: 293–298.

Crosetto, M., Solari, L., Balasis-Levinsen, J., Bateson, L., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D. A., & Mróz, M. (2021). *Deformation monitoring at european scale: The copernicus ground motion service*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 43: 141–146.

Farina, P., Casagli, N., Ferretti, A., 2007. *Radar-interpretation of InSAR measurements for landslide investigations in civil protection practices*. First North American Landslide Conference 272–283

Navarro, J. A., Cuevas, M., Tomás, R., Barra, A., & Crosetto, M. (2019). *Automating the Detection and Classification of Active Deformation Areas—A Sentinel-Based Toolset*. Proceedings of The II Geomatics Engineering Conference, 19(1), 15.

Navarro, J. A., Tomás, R., Barra, A., Pagán, J. I., Reyes-Carmona, C., Solari, L., Vinielles, J. L., Falco, S., & Crosetto, M. (2020). *ADAtools: Automatic detection and classification of active deformation areas from PSI displacement maps*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(10).

Tomás, R., Pagán, J. I., Navarro, J. A., Cano, M., Pastor, J. L., Riquelme, A., Cuevas-González, M., Crosetto, M., Barra, A., Monserrat, O., Lopez-Sanchez, J. M., Ramón, A., Ivorra, S., del Soldato, M., Solari, L., Bianchini, S., Raspini, F., Novali, F., Ferretti, A., … Casagli, N. (2019). *Semi-automatic identification and pre-screening of geological-geotechnical deformational processes using persistent scatterer interferometry datasets*. Remote Sensing, 11(14).

Caracterización de procesos geológicos activos mediante datos InSAR, utilidad del servicio EGMS de Copernicus

Characterization of active geological processes through InSAR Data, utility of Copernicus EGMS

M. Béjar-Pizarro[1], J. Rivera-Rivera[1,3], P. Ezquerro[1], G. Bru[1], D. Alfonso[1], J. López-Vinielles[1], C. Guardiola-Albert[1], H. Aguilera[1], R.M. Mateos[1], J.C. García-Davalillo[1], R. Sarro[1], M. Martínez-Corbella[1], O. Monserrat[2], A. Barra[2], M. Cuevas-González[2], J. Portela[3], A. Staller[3]

1 IGME-CSIC C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003. m.bejar@igme.es, js.rivera@igme.es, p.ezquerro@igme.es, g.bru@igme.es, d.alfonso@igme.es, jc.garcia@igme.es, j.lopez@igme.es, c.guardiola@igme.es, h.aguilera@igme.es, rm.mateos@igme.es, r.sarro@igme.es, m.martinez@igme.es
2 Centre Tecnològic de les Telecomunicacions de Catalunya-CERCA (CTTC-CERCA), Castelldefels, 08860 Barcelona. omonserrat@cttc.cat, abarra@cttc.cat, maria.cuevas@cttc.e
3 Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía. Campus Sur, 28031 Madrid. jj.portela@upm.es, a.staller@upm.es

Palabras clave: Deformación del terreno, InSAR, Sentinel-1, Copernicus.

Resumen

Los datos de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) permiten detectar y caracterizar la deformación del terreno producida por diferentes procesos naturales y antrópicos. En la actualidad, hay diferentes satélites que permiten medir la deformación asociada a estos procesos, como el satélite Sentinel-1A de la ESA. Para facilitar la accesibilidad y promover la utilización de estos datos, el programa Copernicus ha creado el Servicio Europeo de Movimientos del Terreno (EGMS), que proporciona gratuitamente y a escala europea el dato Sentinel-1 ya procesado, en forma de medidas de velocidad media y series temporales de deformación del terreno. Aquí mostramos algunos resultados que hemos obtenido mediante el análisis de datos InSAR de deformación del terreno asociada a diferentes procesos: actividad volcánica, extracción de agua, movimientos de ladera, actividad minera y asentamientos constructivos, entre otros. Discutimos en qué casos son útiles los datos del EGMS para caracterizar el fenómeno causante de la deformación, ventajas e inconvenientes de este servicio y algunas recomendaciones a tener en cuenta para su uso. Esta investigación es parte de los proyectos SARAI (PID2020-116540RB-C22), financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033 y EGMS RASTOOL (GA 101048474), financiado por la Comisión Europea.

Abstract

Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) data allows for the detection and characterization of ground deformation caused by various natural and anthropogenic processes. Currently, there are different satellites that enable the measurement of deformation associated with these processes, such as the Sentinel-1A satellite from the ESA. To facilitate accessibility and promote the use of these data, the Copernicus program has created the European Ground Motion Service (EGMS), which provides processed Sentinel-1 data free of charge and on a European scale, in the form of average velocity measurements and temporal series of terrain deformation. Here, we present some results obtained through the analysis of InSAR data on ground deformation associated with different processes: volcanic activity, groundwater extraction, slope movements, mining activity, and construction settlements, among others. We discuss the cases in which EGMS data is useful for characterizing the underlying phenomenon causing the ground deformation, the advantages and disadvantages of this service, and some recommendations to consider for its use. This research is part of the projects SARAI (PID2020-116540RB-C22), funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033, and EGMS RASTOOL (GA 101048474), funded by the European Commission.

Clasificación regional de acantilados costeros de Cantabria, España.

Regional classification of Coastal Cliffs of Cantabria, Spain.

V. Bruschi[1], A. Rueda[2] y A. Costales Llata[3]

1 Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. 39005 Santander. viola.bruschi@unican.es
2 Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. 39005 Santander. anacristina.rueda@unican.es
3 Instituto de Hidráulica Ambiental. Universidad de Cantabria. 39011 Santander. andrea.costales@unican.es

Palabras clave: acantilado costero, Cantabria, clasificación no supervisada, k-medias.

Resumen

El retroceso de los acantilados costeros es el resultado de un proceso natural derivado de la interacción entre agentes atmosféricos y marinos, y está controlado por las características litológicas de los acantilados mismos. Se han realizado varios intentos a diferentes escalas para cuantificar y clasificar los diversos parámetros que influyen en las tasas de erosión (Premaillon et al., 2018) y la mayoría de ellos coinciden en que el retroceso de los acantilados está gobernado por sus características litológicas, aunque, debido a la gran cantidad de parámetros involucrados, no existe un consenso claro.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar los acantilados de la costa cantábrica a partir de una clasificación no supervisada de sus propiedades físicas y litológicas, analizando el retroceso a escala regional (Costa *et al.*, 2004; Marques *et al.*, 2006).

Los primeros resultados indican que los acantilados costeros del Cantábrico muestran una tasa media de retroceso relativamente baja (0.042 m/año), con un máximo de hasta 0.4 m/año en dos ubicaciones concretas. La metodología propuesta es escalable a áreas costeras más grandes.

Abstract

The retreat of coastal cliffs is a natural process that occurs due to the interaction of different forcing that can be marine and atmospheric, and conditioned by the lithological properties of the coastal cliff.

Several attempts have been done at different scales to quantify and rank the various parameters that influence erosion rates (Premaillon et al., 2018), most of them agreeing that cliff retreat is governed by the lithological properties of the cliffs. Although, due to the large number of parameters involved there is not a clear consensus.

The present study aims to characterize the cliffs along the Cantabrian coast based on an unsupervised classification of their physical and lithological characteristics, analysing their retreat behaviour (Costa *et al.*, 2004; Marques *et al.*, 2006).

The methodology proposed is scalable to larger coastal areas. Cantabrian coastal cliffs have been found to have relatively low mean retreat rate (0.042 m/year), with maximum up to 0.4 m/year in two locations.

Referencias

Costa, S., Delahaye, D., Freiré-Diaz, S., Di Nocera, L., Davidson, R., and Plessis, E. (2004). *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 20, 139–148.

Marqués, F. M. S. F. (2006). *Geomorphology* 144, 231–257.

Prémaillon, M., Regard, V., Dewez, T. J. B., and Auda, Y. (2018). GlobR2C2. Earth Surf. Dynam., 6, 651–668, https://doi.org/10.5194/esurf-6-651-2018

Detección de productos de la meteorización de la pirita mediante imágenes hiperespespectrales PRISMA en el río Odiel (Faja Pirítica Ibérica, España).

Pyrite weathering products using PRISMA hyperspectral imagery along Odiel river (Iberian Pyrite Belt, SW Spain).

J. Buzzi Marcos[1,3*], E. García-Meléndez[2], A. Riaza[3]

1 Xcalibur Smart Mapping, Avenida Partenón 10 2. 28042, Madrid (Madrid). España, jorge.buzzi@xcaliburmp.com
2 Área de Geodinámica Externa, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de León, Campus de Vegazana, s/n, 24071 León, España, egarm@unileon.es
3 Observación de la Tierra, Riesgos Geológicos y Cambio Climático (GI-OBTIER, CSIC), ariaza@csic.es

Palabras clave: Faja Pirítica Ibérica, Hiperespectral, PRISMA.

Resumen

En este trabajo se explora la capacidad de las imágenes del satélite PRISMA para la identificación de los productos de la meteorización de la pirita en el cauce del río Odiel (Huelva), en el cual tienen lugar procesos de acidificación de las aguas asociados a la presencia de grandes cantidades de sulfuros metálicos masivos y su minería (Riaza y Müller, 2010). Este satélite toma imágenes hiperespectrales entre los 400 y 2505 nm, a lo largo de 239 bandas, con un tamaño de píxel de 30 m (Loizzo *et al*., 2016). La alta resolución espectral de este sensor permite identificar rasgos espectrales asociados a las diferentes sustancias generadas en este contexto geológico. Los resultados obtenidos a partir del procesado de las imágenes PRISMA se han comparado con los obtenidos en campañas de toma de datos mediante en sensor hiperespectral HyMap en la misma zona, entre 2005 y 2009 (Buzzi *et al*., 2014), constatándose que es posible identificar estas sustancias mediante el nuevo sensor.

Abstract

This work explores the potential of PRISMA satellite imagery for the identification of pyrite weathering products in the Odiel riverbed (Huelva), where water acidification processes associated with the presence of huge amounts of massive metallic sulphides and associated mining are taking place (Riaza and Müller, 2010). This satellite acquires hyperspectral images between 400 and 2505 nm, over 239 bands, with a pixel size of 30 m. The high spectral resolution of this sensor enables the identification of spectral features associated with the diverse substances generated in this geological context (Loizzo *et al*., 2016). The results from PRISMA image processing have been compared with those obtained from HyMap hyperspectral sensor data collection campaigns in the same area from 2005 to 2009 (Buzzi *et al*., 2014), showing that it is possible to identify these substances using the new sensor.

Referencias

Riaza, A. y Müller, A., 2010, Hyperspectral Remote Sensing monitoring of Pyrite Mine Wastes: A record of climate variability (Pyrite Belt, Spain), *Environmental Earth Sciences*, 61-3, 575-594.

Loizzo, R., Ananasso, C., Guarini, R., Lopinto, E., Candela, L., & Pisani, A. R. (2016, May). The PRISMA hyperspectral mission. En: *Proceedings of the Living Planet Symposium*, Praga, República Checa (pp. 9-13).

Buzzi, J., Riaza, A., García-Meléndez, E., Carrère, V. y Holzwarth, S. 2014. Monitoring of river contamination derived from acid mine drainage using airborne imaging spectroscopy (HyMAP data, South-West Spain). *River Research and Applications*, 32(1), 125-136.

Estimación de la peligrosidad a movimientos de ladera en la red de viaria de la provincia de Jaén.

Landslide hazard estimation in the road network of the Jaén province.

R. Carpena[1,2], I. Mellado[3], J. Calero[3], M. Sánchez Gómez[3], J. Tovar[4], T. Fernández[5]

1 Área de Infraestructuras Municipales, Diputación de Jaén, Plaza San Francisco 23001 Jaén. ramoncarpena@dipujaen.es
2 Dpto. Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas 23071. rcarpena@ujaen.es
3 Dpto. Geología, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas 23071 Jaén. jmellado@ujaen.es; jcalero@ujaen.es, msgomez@ujaen.es
4 Dpto. Física, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas 23071 Jaén. jotvar@ujaen.es
5 Dpto. Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas 23071 Jaén, tfernan@ujaen.es

Palabras clave: peligrosidad, movimientos de ladera, red viaria, Alto Guadalquivir.

Resumen

Se propone un método de estimación de la peligrosidad a movimientos de ladera considerando sus tres componentes (Guzzetti et al., 2005): la probabilidad espacial o susceptibilidad; la frecuencia temporal, o su inversa, el periodo de retorno; y la magnitud, generalmente relacionada con el tamaño del movimiento. La susceptibilidad se ha obtenido aplicando métodos de aprendizaje automático partiendo de un inventario de incidencias de distinta tipología y magnitud, geolocalizadas en el entorno de las carreteras y datadas temporalmente (Carpena et al., 2022 a). Como factores determinantes se han utilizado los derivados del modelo digital de elevaciones de alta resolución, la litología, la estructura geológica y los usos del suelo. La probabilidad temporal se ha establecido de forma indirecta a través de la determinación de los umbrales de precipitación (Carpena et al., 2022 b) que causan las inestabilidades de una magnitud dada. Se ha ajustado una ecuación de cantidad de lluvia-duración, a partir de los eventos lluviosos asociados a cada incidencia. Una vez determinados los umbrales, se estima su frecuencia o bien su periodo de retorno. La peligrosidad se estimó así como el producto de la probabilidad espacial y temporal para una determinada magnitud y periodo de retorno. Estas estimaciones constituyen además la base de un sistema de alerta temprana.

Abstract

A method for estimating landslide hazards is proposed considering its three components (Guzzetti et al., 2005): spatial probability or susceptibility; the temporal frequency, or its inverse, the return period; and the magnitude, generally related to the landslide size. The susceptibility has been obtained by applying machine learning methods based on an inventory of incidences of different typology and magnitude, geolocated in the surroundings of the roads and dated (Carpena et al., 2022 a). As determinant factors, those derived from the high-resolution digital elevation model, lithology, geological structure and land use have been used. The temporal probability has been established indirectly through the determination of the rainfall thresholds (Carpena et al., 2022 b) that cause instabilities of a given magnitude. An equation of rainfall amount-duration has been adjusted, based on the rainy events associated with each incidence. Once the thresholds are determined, their frequency or return period is estimated. The landslide hazard was thus estimated as the product of the spatial and temporal probability for a given magnitude and return period. These estimations are also the basis of an early warning system.

Referencias

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., et al. (2005). *Geomorphology*, 72, 272-299

Carpena, R., Ureña, F.A., Calero, J., Sánchez-Gomez, M., Tovar, J. y Fernández, T. (2022a). En: *X Simposio Nacional de Laderas y Taludes Inestables.* Comunicaciones, 851-862.

Carpena, R., Tovar, J., Sánchez-Gomez, M., Calero, J., Mellado, I., Moya, F. y Fernández, T. (2022b). En: *X Simposio Nacional de Laderas y Taludes Inestables.* Comunicaciones, 995-1006.

Optimización de las técnicas A-DInSAR para el análisis de procesos de gravedad en una zona costera sin reflectores naturales

Optimization of A-DInSAR techniques for the analysis of gravity-related processes in a coastal area lacking natural reflectors

J. Carrillo[1,2], M.J Domínguez-Cuesta[1], F. Mateos[1], J. Cuervas-Mons[3], P. González-Pumariega[4], L. Rodríguez-Rodríguez[1], P. Valenzuela[5], D. Ballesteros[6], C. López-Fernández[1], L. Pando[1], A. Barra[7] y M. Jiménez-Sánchez[1]

1 Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo, 33005 Oviedo; jerymy_carrillo@outlook.es. dominguezmaria@uniovi.es. mateosfelix@uniovi.es. rodriguezrlaura@uniovi.es. lopezcarlos@uniovi.es. pandoluis@uniovi.es. mjimenez@uniovi.es.
2 Data Processing Geospatial Technologies, Xcalibur Smart Mapping, 28042 Madrid. jerymy.carrillo@xcaliburmp.es
3 Tecnologías y Servicios Agrarios S.A., 33006 Oviedo. jcuervas@tragsa.es.
4 Dpto. de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo 33004 Oviedo. pelayogs@uniovi.es.
5 Dpto. de Geografía y Geología (Área de Geodinámica Externa) Universidad de León 24004 León. pvalm@unileon.es.
6 Dpto. de C. de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Univ. de Cantabria 39005 Santander. daniel.ballesteros@unican.es.
7 Geomatics Research Unit, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya-CERCA 08860 Castelldefels. abarra@cttc.cat.

Palabras clave: Procesos de gravedad, Remote Sensing, A-DInSAR, Corner reflectors, Faro de Tazones.

Resumen

La región de Asturias (N de España) presenta un relieve accidentado con fuertes pendientes lo que, unido a múltiples agentes externos, genera una importante problemática asociada a procesos de gravedad. La inaccesibilidad de algunas zonas, como los acantilados costeros, dificulta su estudio, por lo que cobra especial importancia la aplicación de técnicas remotas. Este trabajo se centra en un movimiento en masa activo que afecta a la ladera del Faro de Tazones (Costa Cantábrica), que lleva siendo monitorizada desde 2018. Ello ha permitido elaborar un modelo conceptual de la estructura interna y el comportamiento de la ladera (Domínguez-Cuesta *et al.*, 2022a), así como constatar que las técnicas A-DInSAR (Interferometría Radar de Apertura Sintética Diferencial Avanzada) no aportan buenos resultados en esta zona debido a la densa vegetación y los escasos reflectores naturales (Domínguez-Cuesta *et al.*, 2022b). En junio de 2022 se instalaron en la ladera 16 dispositivos denominados Corner Reflectors-CR, con la finalidad de mejorar los resultados obtenidos mediante procesados A-DInSAR. Aquí se presentan los primeros resultados.

Abstract

The Asturian region (Northern Spain) has a rugged relief with steep slopes which, coupled with multiple external agents, generates a significant problem associated with gravity-related processes. The inaccessibility of some areas, such as coastal cliffs, hinders direct study, so the application of remote techniques becomes particularly important. This study focuses on an active instability phenomenon affecting the slope of the Tazones Lighthouse in the Cantabrian Coast, monitored since 2018. This ongoing monitoring has allowed the development of a conceptual model of the internal structure and behavior of the slope (Domínguez-Cuesta et al., 2022a). It has also been observed that A-DInSAR (Advanced Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) techniques do not yield satisfactory results in this area due to the dense vegetation and limited natural reflectors (Domínguez-Cuesta et al., 2022b). In June 2022, 16 devices known as Corner Reflectors (CR) were installed on the slope to enhance the results obtained from A-DInSAR processes. Here, we present the first results of this research.

Referencias

Domínguez-Cuesta, M.J., González-Pumariega, P., Valenzuela, P., López-Fernández, C., Rodríguez-Rodríguez, L., Ballesteros, D., Mora, M., Meléndez., M., Marigil, M.A., Pando, L., Cuervas-Mons, J. y Jiménez Sánchez, M. (2022a). *Marine Geology* 449, 106836.

Domínguez-Cuesta, M.J., Rodríguez-Rodríguez, L., López-Fernández, C., Pando, L., Cuervas-Mons, J., Olona, J., González-Pumariega, P., Serrano, J., Valenzuela, P. y Jiménez Sánchez, M. (2022b). *Remote Sensing*, 14(20), 5139.

Percepción del riesgo volcánico en comunidades cercanas a un campo volcánico monogenético: el caso de Olot (Campo Volcánico de la Garrotxa, Cataluña)

Perception of volcanic risk in communities close to a monogenetic volcanic field: the case of Olot (Garrotxa Volcanic Field, Catalonia)

D. Cerda[1,2], A. Geyer[1], X. Bolós[1], D. Pedrazzi[1] y J. Morin[3]

1 GEO3BCN, CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. ageyer@geo3bcn.csic.es, xbolos@geo3bcn.csic.es, dpedrazzi@geo3bcn.csic.es
2 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona, Marti Franquès s/n, 08028 Barcelona (daniela.cerda21@gmail.com)
3 Department of Geography, University of Cambridge, Cambridge, UK (jmm266@cam.ac.uk)

Palabras clave: resiliencia, educación temprana, evaluación percepción.

Resumen

En el contexto actual, las amenazas a la sociedad producto de erupciones volcánicas son particularmente significativas en campos volcánicos monogenéticos, donde la extensa separación temporal entre un evento eruptivo y otro conllevan a un aumento de los asentamientos humanos en sus proximidades. Esto se atribuye principalmente a una falsa sensación de seguridad dentro de la comunidad potencialmente expuesta a un evento eruptivo futuro. Este fenómeno tiende a generar una inadecuada preparación y una deficiente capacidad de resiliencia frente a futuras erupciones. En este contexto, la ciudad de Olot (~34.400 habitantes, Cataluña), ubicada dentro del campo volcánico de la Garrotxa, sirve como ejemplo de asentamiento humano alrededor de volcanes monogenéticos, cuya última erupción conocida ocurrió hace 10,4 - 15,7 mil años. Para evaluar la percepción del riesgo volcánico entre la población de Olot, hemos realizado una encuesta segmentada por grupos de edad. Los principales objetivos son: (i) identificar lagunas de conocimiento y conceptos erróneos dentro de la población; (ii) analizar los factores más relevantes en la determinación de la percepción de riesgo dentro de la comunidad; (iii) contribuir a la evaluación de la resiliencia de la población frente a un evento eruptivo futuro; y (iv) en última instancia, evaluar el contraste entre la percepción de la comunidad de Olot y su riesgo volcánico real. Este trabajo fue financiado por las BECAS CHILE-ANID, Beca de Doctorado en el Extranjero, convocatoria 2022/Folio 72220257.

Abstract

Nowadays, threats to society from volcanic eruptions are particularly significant in monogenetic volcanic fields, where the long temporal separation between one eruptive event and another leads to an increase in human settlements in their vicinity. This is mostly attributed to a false sense of security within the community potentially exposed to a future eruptive event. Such misconceptions often result in a lack of preparedness programs and resilience capabilities for potential future eruptions. In this context, the city of Olot (~34,400 inhabitants, Catalonia), located within the Garrotxa volcanic field, serves as an example of human settlement around monogenetic volcanoes, which the last known eruption occurred 10.4 – 15.7 ka ago. To evaluate the perception of volcanic risk among the population of Olot, we have conducted a survey segmented by age groups. The main objectives are: (i) identifying knowledge gaps and misconceptions within the population; (ii) analyzing the factors most relevant in determining risk perception within the community; (iii) contributing to the assessment of the population's resilience in the face of a future eruptive event: and (iv) ultimately evaluating the contrast between the perception of the Olot community and its actual volcanic risk. This work was funded by the BECAS CHILE- ANID, PhD Scholarship Abroad, announcement 2022/Folio 72220257.

Potencial y limitaciones del nuevo European Ground Motion Service (EGMS) en el análisis de inestabilidades a escala local

Potential and limitations of the new European Ground Motion Service (EGMS) for local-scale instability analysis

J. Cuervas-Mons[1]*, M. J. Domínguez-Cuesta[2] y M. Jiménez-Sánchez[2]

1 Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. 33006, Oviedo. jcuervas@tragsa.es
2 Dpto. Geología, Universidad de Oviedo, 33005. dominguezmaria@uniovi.es, mjimenez@uniovi.es

Palabras clave: EGMS, A-DInSAR, Asturias, deslizamientos.

Resumen

El nuevo *European Ground Motion Service* (EGMS) representa un impresionante avance en el acceso a las técnicas remotas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial Avanzadas (A-DInSAR) para el monitoreo de movimientos del terreno en Europa (Crosetto *et al.*, 2020; Festa y Del Soldato, 2023). En esta investigación, se ha aplicado el EGMS en un movimiento en masa complejo localizado en Asturias (La Miera, NO de España) con el objetivo principal de analizar el potencial y las limitaciones de este servicio en la auscultación de inestabilidades a escala local. Para ello, se utilizaron datos A-DInSAR desde 2015 hasta 2021, junto con una cartografía geomorfológica de detalle, un inventario de daños de edificios de acuerdo al trabajo de Cooper (2008) y un registro de precipitaciones. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos y se discute la aportación del EGMS.

Abstract

The new European Ground Motion Service (EGMS) represents an impressive progress in the access of the Advanced Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (A-DInSAR) techniques for ground motion monitoring in Europe (Crosetto *et al.*, 2020; Festa and Del Soldato, 2023). In this research, the EGMS has been applied to a complex mass movement located in Asturias (La Miera, NW Spain) with the main aim of analysing the potential and limitations of this service in local-scale instabilities survey. For this purpose, A-DInSAR data from 2015 to 2021 were used with a detailed geomorphological mapping, a building damage inventory according to work of Cooper (2008), and precipitation records. This communication presents the results obtained and discusses the contribution of the EGMS.

Referencias

Cooper, A.H. (2008). *Quaterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 41, 409-424.
Crosetto, M., Solari, L., Balasis-Levinsen, J. (2020). *Remote Sensing* 12, 2043.
Festa, D., Soldato, M. Del. (2023). *Remote Sensing* 15, 2581.

Caracterización geoambiental de suelos y sedimentos fluviales en el distrito minero abandonado de Hiendelaencina (Guadalajara).

Geoenvironmental characterization of soils and stream sediments in the abandoned mining district of Hiendelaencina (Guadalajara).

C. de Ignacio-San José[1,3], S. Martín-Velázquez[2,3], T. Martín-Crespo[2,3], D. Gomez-Ortiz[2,3], I. Rodríguez-Santalla[2,3]

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. C/José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid. cris@ucm.es,
2 Dpto. Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, URJC. C/Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid. silvia.martin@urjc.es, tomas.martin@urjc.es, david.gomez@urjc.es, inmaculada.rodriguez@urjc.es.
3 Grupo de investigación Geofísica y Geoquímica Ambiental GIGGA, URJC. C/Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid.

Resumen: El cese de la actividad minera en el siglo XX ha generado la acumulación de residuos contaminantes en el distrito minero de Hiendelaencina (Guadalajara), donde se han identificado dos balsas de lodos cercanas al pueblo como focos de posible contaminación. Este estudio analiza la composición mineral y geoquímica de suelos y sedimentos fluviales en la zona para evaluar la contaminación potencial producida por dichos residuos. El impacto ambiental se ha cuantificado a partir de los valores del Factor de Enriquecimiento y del Índice de Geoacumulación. Los resultados indican que tanto el agua como el viento movilizan elementos potencialmente tóxicos, aunque los valores de contaminación no son significativamente altos. Las mayores concentraciones se observan en los suelos cercanos a las balsas, con contenidos significativos de Ba, As, Pb y Zn. En cuanto a los sedimentos fluviales, muestran una pauta similar, con las mayores concentraciones localizadas cerca de las balsas, siendo As y Sb los elementos que muestran una mayor geoacumulación. Se sugiere la retirada de los residuos como medida para mitigar la contaminación y fomentar el desarrollo turístico rural en la zona.

Palabras clave: suelos, sedimentos, distrito minero, contaminación, Hiendelaencina.

Abstract: *The cessation of mining activities in the 20th century has led to the accumulation of polluting residues in the mining district of Hiendelaencina (Guadalajara), where two sludge ponds near the town have been identified as potential contamination sources. This study analyses the mineral and geochemical composition of soils and stream sediments in the area to assess the potential contamination caused by these residues. Environmental impact has been quantified using the Enrichment Factor and the Geoaccumulation Index. The results indicate that both water and wind mobilize potentially toxic elements, although contamination levels are not significantly high. The highest concentrations are observed in soils near the mine ponds, with significant contents of Ba, As, Pb, and Zn. Regarding stream sediments, they show a similar pattern, with the highest concentrations located near the mine ponds, with As and Sb showing the highest Geoaccumulation Index. The removal of residues is suggested as a measure to mitigate pollution and promote rural tourism development in the area.*

Key words: *soils, sediments, mining district, pollution, Hiendelaencina*

INTRODUCCIÓN

El cese de la actividad minera ha provocado históricamente el abandono de grandes volúmenes de residuos que contienen una carga elevada de elementos potencialmente contaminantes. Su meteorización y movilización prolongadas por agua, viento y/o gravedad puede originar graves problemas ambientales (Doumas et al., 2018). Para la adecuada gestión de estos entornos y estimar su nivel de degradación es necesario caracterizar mineralógica y geoquímicamente estos depósitos, así como los suelos y sedimentos próximos.

El distrito minero de Hiendelaencina (municipio del NO de Guadalajara) fue el principal productor de plata de Europa desde finales del siglo XIX hasta principios del XX, momento en el que cesó la actividad por el agotamiento de los filones y la caída de precios del metal (Gismera Angona, 2008). Las minas se desarrollaron a lo largo de los filones argentíferos de cuarzo y barita, incluso dentro del propio pueblo, y las escombreras se acumularon en las proximidades de las bocaminas y de los pozos mineros. A finales del siglo XX se reactivó la minería con el procesado de antiguas escombreras para recuperar la plata no procesada, y se generaron dos balsas contiguas de lodos a 1 km al NE del núcleo urbano (Fig. 1). Los restos de esta actividad se extienden por todo el municipio a lo largo de una banda NNE-SSO de 5,5 km de longitud y 3 km de anchura. La mineralización se desarrolló durante la etapa tardi-Varisca en filones hidrotermales encajados en ortogneises glandulares preordovícicos de la Fm. Hiendelaencina "Ollo de Sapo" (Concha et al., 1992). Los minerales que forman la mena son galena (mayoritario), freibergita, pirita, arsenopirita

(abundantes), pirargirita, polibasita, stefanita, bournonita, freieslebenita (abundancia media), esfalerita (poco abundante), calcopirita, marcasita y pirrotina (escasos). La ganga está formada por barita, cuarzo y siderita, además de goethita y hematites originados en la fase supergénica de la meteorización. La última prospección geoquímica de exploración en suelos sobre la mineralización y en sedimentos fluviales proporcionó valores anómalamente enriquecidos en Ag, As, Sb y Pb (De Vos y Viaene, 1980).

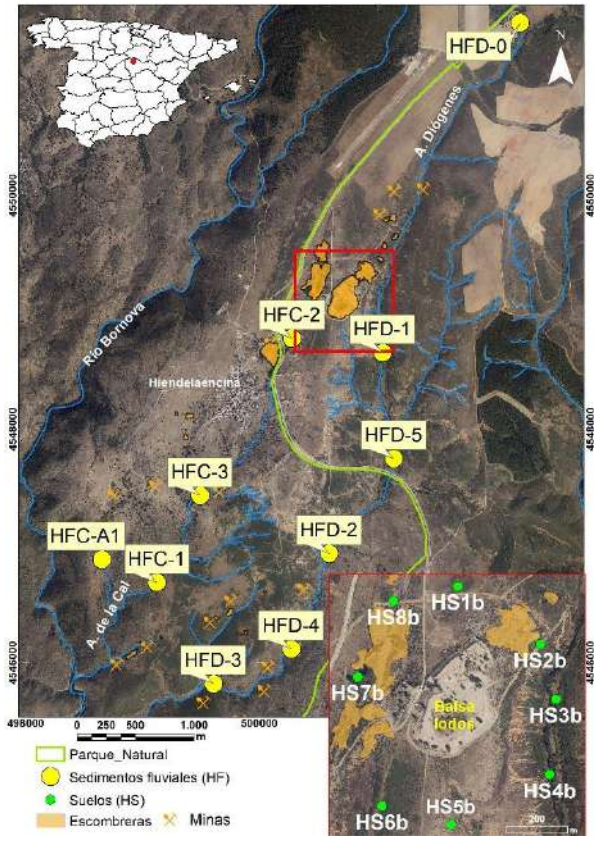


FIGURA 1. *Localización de las muestras de suelos (HS1b a HS8b) y sedimentos fluviales (HFD-0 a HFD-5, HFC-1 a HFC-3, y HFC-A1) en el distrito minero de Hiendelaencina.*

Hasta la fecha, los trabajos relacionados con la problemática ambiental del distrito se han centrado en las balsas mineras. Sus materiales, arcillo-arenosos y poco cohesionados, están compuestos principalmente por cuarzo, moscovita, siderita, barita y feldespato (Martín-Crespo et al., 2023), y presentan contenidos significativos en As, Ba, Sb, Pb y Zn. Su pH alcalino y baja conductividad eléctrica descartan la formación de drenaje ácido. Sin embargo, en las balsas se han desarrollado diferentes geomorfologías fluviales, gravitacionales y eólicas (canales, barrancos, conos aluviales, coluviones, mantos eólicos) que están dispersando estos materiales fuera de las balsas. Además, se ha constatado que la actividad antrópica en las mismas (motocross) contribuye a la disgregación, erosión y movilización de los lodos (Martín-Velázquez et al., 2022). Estos autores han calculado unas elevadas tasas de erosión y liberación antrópica de los elementos potencialmente contaminantes de las balsas: 391 t/ha*año y 10 t respectivamente, sólo en el periodo 2009-2014.

En este contexto, y con el objetivo de identificar el grado de afección de la zona por la minería de la plata, y posterior abandono, en el distrito de Hiendelaencina, se presenta aquí un estudio sobre el tipo y grado de contaminación potencial en los suelos próximos a las balsas de lodos, así como en los sedimentos fluviales de los dos arroyos principales que recorren la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las balsas se sitúan sobre la cumbre plana (altitud media de 1.085 m) del cerro en el que se excavó la mina San Carlos. Las pendientes de la zona son uniformes e inferiores al 15%, la vegetación es del tipo matorral y tiene un clima mediterráneo con veranos cálidos. El cerro está delimitado por los arroyos estacionales Diógenes y de la Cal, que atraviesan el municipio de Hiendelaencina en dirección aproximada NNE-SSO. Desembocan en el río Bornova, represado para abastecimiento y riego. Al oeste de las balsas se encuentran el Parque Natural Sierra Norte de Guadalajara y la Zona de Especial Conservación–Zona de Especial Protección para las Aves de la Sierra de Ayllón, destacando el alto valor geológico, botánico y paisajístico de este entorno.

Los suelos se muestrearon a finales de mayo de 2021 a dos profundidades (5 y 25 cm) en 8 zonas dispuestas de forma radial a las balsas, y a una distancia de 250 m (Fig. 1). Se muestrearon un paleosuelo desarrollado sobre ortogneises (HS8b), arenas y gravas de raña pliocena (HS1b, HS2b, HS5b, HS6b), arenas y arcillas de la llanura de inundación del arroyo Diógenes (HS3b, HS4b), y restos de una antigua escombrera (HS7b). También se muestreó un suelo en el entorno de la localidad de Bustares, 10 km al NO, para tener valores de fondo geoquímico (BUS-1). Los sedimentos fluviales se recogieron entre octubre de 2020 y abril de 2021 en tramos con movimiento de agua: arroyo Diógenes (HFD-0 a HFD-5) y arroyo de la Cal (HFC-1 a HFC-3, y HFC-A1 en un afluente). Se separaron dos fracciones para análisis químico, una gruesa (0,5-0,35 mm) y una fina (<0,177 mm) con el objetivo de comprobar posibles diferencias composicionales.

La composición química de elementos mayores, menores y traza se analizó en ActLabs (Canadá) mediante el protocolo 4Lithoresearch B1. El estudio mineralógico por DRX se llevó a cabo en el Centro de Apoyo Tecnológico de la Universidad Rey Juan Carlos. La identificación de minerales accesorios con microscopía electrónica de barrido-espectroscopía de rayos X (SEM-ESP) por dispersión de energía se realizó en el Centro de Apoyo a la Investigación de la Universidad Complutense de Madrid. Teniendo en cuenta el contenido de Ag, As, Ba, Cu, Ni, Pb, Sb y Zn, se ha evaluado el impacto ambiental utilizando el Factor de Enriquecimiento (FE; Sutherland, 2000) y el Índice de Geoacumulación (Igeo; Müller, 1969):

$$FE = (Cn/Fe) / (Cref/Fe) \qquad Igeo = \log_2 [Cn / 1{,}5\ Bn]$$

donde Cn es la concentración del elemento, Cref es la concentración del elemento en el fondo geoquímico de la región, y Bn es la concentración media del elemento en la corteza (Taylor y McLennan, 1995).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos tienen poco desarrollo vertical (< 50 cm) y predominan los perfiles de tipo A-C. Los elementos mayores más abundantes en porcentaje en peso son SiO_2 (55-85 %), Al_2O_3(6-16 %), Fe_2O_{3total} (2-7,5 %) y K_2O (1-5 %). Esta composición es consistente con la composición mineralógica principal: cuarzo, moscovita, feldespato, siderita y clorita. Otros minerales identificados mediante SEM son titanita, circón, magnetita-ilmenita-rutilo y pirita. En cuanto a elementos traza, destacan los contenidos de: Ba (400-16120 ppm) debido a la abundancia de barita como ganga, As (hasta 600 ppm), Pb (hasta 800 ppm) y Zn (hasta 365 ppm) por su potencial contaminante. Los contenidos más altos se encuentran en el suelo de escombrera y, en general, son mayores en el nivel más superficial (5 cm).

La composición química de elementos mayores en los sedimentos fluviales en porcentaje en peso es SiO_2 (50-75 %), Al_2O_3 (8-18 %), Fe_2O_{3total} (2-7 %) y K_2O (1,5-4 %), lo que refleja su procedencia de la erosión de la raña, y sobre todo de los ortognesises glandulares. Respecto a los elementos traza, destacan de nuevo los contenidos en Ba (hasta 20760 ppm), As (hasta 240 ppm), Pb (hasta 300 ppm) y Zn (hasta 340 ppm). Los mayores contenidos se han medido en las muestras del arroyo de la Cal, no habiéndose encontrado diferencias significativas en función de la fracción analizada. La geoquímica de los sedimentos fluviales de Hiendelaencina se encuentra fuertemente influida por las características de los ortogneises de la zona, presentando concentraciones en general similares a las de las rocas que se están meteorizando. Las altas concentraciones puntuales de algunos elementos (Zr, Hf, Y, Th, tierras raras) se explican por la probable concentración de circones detríticos en algunas zonas o de micas y feldespato potásico (K_2O-Rb-Tl).

El mecanismo de dispersión de elementos es dominantemente físico, aunque para algunos elementos de alta movilidad como el Sr y contaminantes como el As, también participa la dispersión hidroquímica. En consecuencia, la influencia de la meteorización de escombreras, que contienen restos de la mineralización original ricos en metales pesados, puede considerarse como el principal foco de contaminación en el área.

Respecto a los valores del Factor de Enriquecimiento calculados, no se encuentran diferencias significativas en las muestras de suelos a distinta profundidad (Fig. 2). La mayoría de los elementos presentan un FE Mínimo a Moderado, excepto Ag y Sb para los que es Significativo. El suelo de escombrera (HS7b) sí presenta valores de FE de Significativos a Extremadamente Altos en Ag, As, Pb y Sb, que son los elementos potencialmente tóxicos más presentes en los minerales de la mena. Algunos suelos muestran FE muy altos también en Ba, debido a la presencia importante de barita en la ganga. Estos valores del FE señalan un significativo impacto antropogénico en los suelos del entorno del distrito minero de Hiendelaencina. Si se observa el otro índice ambiental, Igeo, la mayoría de los elementos se proyectan en las

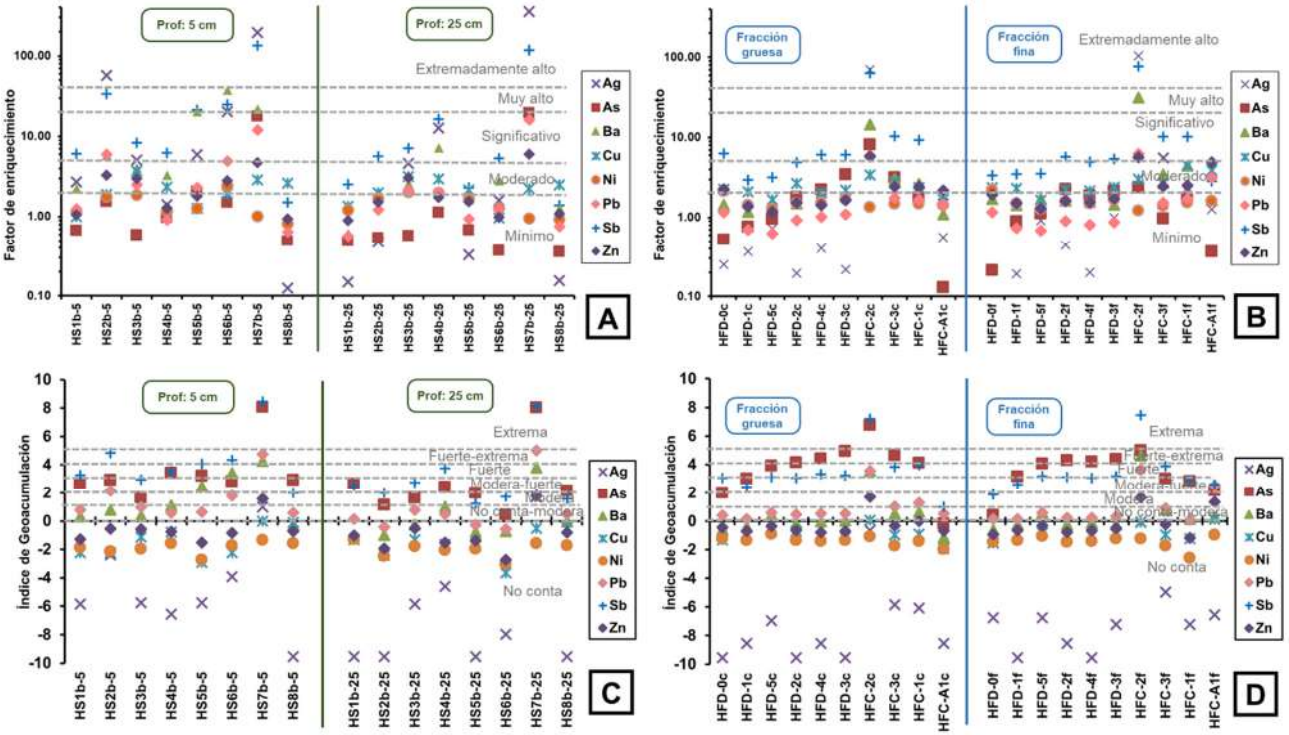


FIGURA 2. *Valores del Factor de Enriquecimiento (FE) e Índice de Geoacumulación (Igeo): A) FE suelos; B) FE sedimentos fluviales; C) Igeo suelos; D) Igeo sedimentos fluviales. Los sedimentos de ambos arroyos están ordenados aguas abajo.*

categorías inferiores a Moderadamente geoacumuladas. De nuevo es la muestra de suelo sobre escombrera la que presenta valores de Igeo 1 o 2 categorías por encima del resto, llegando a Extremadamente geoacumulada. Estos valores ponen de manifiesto, no sólo la acumulación geogénica de la mayoría de los elementos analizados, sino también el impacto antrópico provocado por la actividad minera. Los elementos As, Ba, Pb y Sb de las muestras a 5 cm presentan un Igeo una categoría mayor que las muestras a 25 cm, señalando que la dispersión y movilización de los elementos metálicos no ha profundizado significativamente en la vertical.

Los valores del Factor de Enriquecimiento de las muestras de sedimentos fluviales se proyectan en niveles similares (incluso menores) a los de las muestras de suelos. Únicamente el Sb se proyecta en el campo de FE Significativo (Fig. 2). Tampoco se encuentran diferencias destacables de enriquecimiento entre la fracción gruesa (0,5-0,71 mm) y la fina (0,125-0,25 mm). La muestra HFC-2 es la que se proyecta en las categorías más altas de FE, llegando incluso a Extremadamente Alto para Ag y Sb, a Muy Alto para Ba, y Significativo para Pb y Zn. De nuevo, el efecto local junto a las escombreras de la mina de San Carlos es lo que genera estos valores. Las dos fracciones estudiadas también presentan la misma pauta respecto a los valores del Igeo. Los elementos que se proyectan en las categorías Fuertemente a Extremadamente geoacumulados son As y Sb. La muestra HFC-2 de nuevo presenta valores del Igeo 1 o 2 categorías por encima del resto de muestras para As, Pb, Sb y Zn, ligado a la presencia de minerales de la mena en las escombreras citadas.

Si se comparan los valores de los índices geoambientales obtenidos en Hiendelaencina con los calculados para otros distritos mineros abandonados de la Península Ibérica (Martín-Crespo et al., 2020), esta zona presenta un menor nivel de contaminación por metales pesados.

CONCLUSIONES

Aunque el agua y el viento erosionan las balsas de lodos de Hiendelaencina y movilizan elementos potencialmente tóxicos, los suelos próximos no presentan valores significativamente altos de contaminación. Los metales contaminantes más abundantes son As, Pb y Sb procedentes de los minerales de la mena, junto al Ba procedente de la barita de la ganga. Los FE e Igeo más elevados aparecen en muestras de zonas donde se desarrollaron antiguas labores mineras. Las muestras con menores índices de FE e Igeo son las de los suelos de la llanura de inundación que no está en la ladera del cerro donde se sitúan las balsas, y en el suelo desarrollado sobre paleosuelo en gneises. En los sedimentos fluviales, los elementos más acumulados son As y Sb. A pesar del contenido no significativamente elevado en elementos potencialmente tóxicos en los suelos y sedimentos del distrito minero de Hiendelaencina, estos deberán tenerse en cuenta en las labores de monitorización y en actuaciones futuras de remediación y reutilización con vistas a un mayor desarrollo turístico de la región.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte del proyecto competitivo "Caracterización geoambiental de las balsas mineras de Hiendelaencina", financiado por la Comunidad de Madrid y la Universidad Rey Juan Carlos.

REFERENCIAS

Concha, A., Oyarzun, R., Lunar, R., Sierra, J., Doblas. M. y Lillo, J. (1992): The Hiendelaencina epithermal silver-base metal district, Central Spain: tectonic and mineralizing processes. *Mineralium Deposita*, 27: 83-89.

De Vos, W. y Viaene, W. (1980): Geochemical studies of soils and metallogenetic implications at Hiendelaencina, Guadalajara, Spain. *Mineralium Deposita*, 15: 87-99.

Doumas, P., Munoz, M., Banni, M., Becerra, S., Bruneel, O., Casiot, C., Cleyet-Marel, J.-C., Gardon, J., Noack, Y. y Sappin-Didier, V. (2018): Polymetallic pollution from abandoned mines in Mediterranean regions: A multidisciplinary approach to environmental risks. *Regional Environmental Change*, 18: 677-692.

Gismera Angona, A. (2008): *Hiendelaencina y sus minas de plata*. AACHE Ediciones, Guadalajara, 432 p.

Martín-Crespo, T., Gómez-Ortiz, D. y Martín-Velázquez, S. (2020): Geoenvironmental Characterization of Sulfide Mine Tailings. En: *Applied Geochemistry with Case Studies on Geological Formations, Exploration Techniques and Environmental Issues* (F.L. Mazadiego, F. Barrio-Parra y M. Izquierdo-Díaz eds). IntechOpen, Londres, 1-26.

Martín-Crespo, T., Gomez-Ortiz, D., Pryimak, V., Martín-Velázquez, S., Rodríguez-Santalla, I., Ropero-Szymañska, N. y José, C.d.I.-S. (2023): Quantification of pollutants in mining ponds using a combination of LiDAR and geochemical methods—Mining District of Hiendelaencina, Guadalajara (Spain). *Remote Sensing*, 15, 1423.

Martín-Velázquez, S., Rodríguez-Santalla, I., Ropero-Szymañska, N., Gomez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T. y de Ignacio-San José, C. (2022): Geomorphological Mapping and Erosion of Abandoned Tailings in the Hiendelaencina Mining District (Spain) from Aerial Imagery and LiDAR Data. *Remote Sensing*, 2022, 14, 4617.

Müller, G. (1969): Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2: 108-118.

Sutherland, R.A. (2000): Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39: 611-626.

Taylor, S.R. y McLennan, S.M. (1995): The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33: 241-26.

El deslizamiento del Faro de Tazones (Costa Cantábrica, N España): seis años de monitorización

The Tazones Lighthouse landslide (Cantabrian Coast, N Spain): six years of monitoring

M.J. Domínguez-Cuesta[1], P. González-Pumariega[2], J. Cuervas-Mons[3], J. Carrillo[1], C. López-Fernández[1], P. Valenzuela[4], L. Rodríguez-Rodríguez[1], D. Ballesteros[5] y M. Jiménez-Sánchez[1]

1 Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo 33005 Oviedo. dominguezmaria@uniovi.es. jerymy_carrillo@outlook.es. lopezcarlos@uniovi.es. rodriguezrlaura@uniovi.es. mjimenez@uniovi.es.
2 Dpto. de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo 33004 Oviedo. pelayogs@uniovi.es.
3 Tecnologías y Servicios Agrarios S.A., 33006 Oviedo. jcuervas@tragsa.es.
4 Dpto. de Geografía y Geología (Área de Geodinámica Externa), Universidad de León 24004 León. pvalm@unileon.es.
5 Dpto. de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria 39005 Santander. daniel.ballesteros@unican.es.

Palabras clave: Deslizamiento, Acantilado, Faro de Tazones, Monitorización, Retroceso costero.

Resumen

La Costa Cantábrica, eminentemente rocosa, está experimentado en los últimos años un incremento en los procesos de erosión ligados a la acción de la gravedad, que afectan a los acantilados de este litoral. A lo largo de la costa asturiana se pueden observar numerosas evidencias que indican un retroceso costero asociado a fenómenos de inestabilidad (Domínguez-Cuesta *et al*., 2020). Uno de estos fenómenos, reconocido en el entorno del Faro de Tazones, ha sido objeto de seguimiento ininterrumpido desde junio de 2018 al momento actual (Domínguez-Cuesta *et al*., 2022a; 2022b). En este trabajo se presentan los datos recopilados tras seis años de monitorización.

Abstract

The Cantabrian Coast, eminently rocky, has experienced in recent years an increase in erosion processes linked to the action of gravity affecting the cliffs of this coastline. Along the Asturian coast, there is ample evidence of coastal retreat linked to slope instability phenomena. One such phenomenon, identified in the vicinity of the Tazones Lighthouse, has been under continuous monitoring since June 2018 to the present moment. This paper presents the data collected after six years of monitoring.

Referencias

Domínguez-Cuesta, M.J., Ferrer Serrano, A., Rodríguez-Rodríguez, L., López-Fernández, C. y Jiménez-Sánchez, M. (2020). *Geogaceta* 68, 63-66.

Domínguez-Cuesta, M.J., González-Pumariega, P., Valenzuela, P., López-Fernández, C., Rodríguez-Rodríguez, L., Ballesteros, D., Mora, M., Meléndez., M., Marigil, M.A., Pando, L., Cuervas-Mons, J. y Jiménez Sánchez, M. (2022a). *Marine Geology* 449, 106836.

Domínguez-Cuesta, M.J., Rodríguez-Rodríguez, L., López-Fernández, C., Pando, L., Cuervas-Mons, J., Olona, J., González-Pumariega, P., Serrano, J., Valenzuela, P. y Jiménez Sánchez, M. (2022b). *Remote Sensing*, 14(20), 5139.

Monitorización de los impactos sobre la gea de algunas carreras de montaña de los circuitos pedestre y ciclista 2023 en España

Monitoring of the geotic impacts of some mountain running and cycling trails circuits 2023 in Spain

M. Faucha[1], A. Díez-Herrero[2], P. Tejedo[1], L. Carcavilla[2], K.P. Sandoval-Rincón[2], L. Navalón[3], D. Vázquez-Tarrío[2], J.A. Ballesteros-Cánovas[4] y J. Benayas[1,5]

1 Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. C/Darwin 2, Ciudad Universitaria de Cantoblanco, 28049 Madrid. miguel.faucha@uam.es, pablo.tejedo@uam.es, javier.benayas@uam.es
2 Instituto Geológico y Minero de España-CSIC. C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid y C/Calera 1, 28760 Tres Cantos. andres.diez@igme.es | l.carcavilla@igme.es, kp.sandoval@igme.es, d.vazqueztarrio@igme.es
3 Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Ctra. M-604 km 28,0, 28740 Rascafría. luis.navalon@psgn.es
4 Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC. Serrano 113 dpdo, 28006, Madrid. juan.ballesteros@mncn.csic.es
5 Centro de Investigación en Biodiversidad y Cambio Global (CIBC-UAM), Universidad Autónoma de Madrid. C/Darwin 2, Ciudad Universitaria de Cantoblanco, 28049 Madrid.

Resumen: Dentro de los estudios de impacto que las actividades antrópicas tienen sobre la naturaleza, aquellos dedicados a analizar los que se producen sobre el patrimonio geológico y los procesos geológicos activos no se han desarrollado de una manera tan amplia como los que han tenido como objeto a otros componentes del medio abiótico, biótico (flora y fauna) o socio-cultural. Esta circunstancia se hace reseñable para las actividades deportivas en el medio natural, actividades sobre las que de por sí no existe un gran desarrollo de estudios de impacto ambiental. A través de los trabajos que aquí se presentan, se muestran las técnicas y resultados preliminares obtenidos del análisis de impacto sobre determinados elementos y procesos geóticos durante la celebración de cuatro carreras por montaña a pie y una carrera de bicicleta de montaña, en diferentes entornos de la península Ibérica durante el 2023.

Palabras clave: microtopografía, infiltración, resistencia a la penetración, granulometría, sedimentos.

***Abstract**: In the realm of studying the impact of human activities on the environment, research dedicated to assessing the effects on geological heritage or active geological processes has not been as extensively explored compared to investigations on other components such as the abiotic, biotic (flora and fauna), or socio-cultural aspects. This discrepancy is particularly noteworthy in the context of outdoor sporting activities, where the development of environmental impact studies is generally limited. This paper introduces the techniques and preliminary results derived from an analysis of the impact on specific geological elements and processes within the context of four mountain trail races and one mountain bike race that took place in 2023 across various environments of the Iberian Peninsula.*

***Key words:** microtopography, infiltration, resistance to penetration, granulometry, sediments.*

INTRODUCCIÓN

Existe abundante literatura científica y técnica acerca de los impactos que determinadas actividades antrópicas producen sobre ciertos elementos de la naturaleza, como la flora y la fauna, o la atmósfera. También han sido analizados sus impactos sociales y culturales. Sin embargo, tradicionalmente el estudio de los impactos sobre los aspectos geóticos e hídricos de la naturaleza se ha limitado a la evaluación y posterior corrección o compensación de los aspectos erosivos, morfológicos y de contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Suelen quedar fuera de las evaluaciones y declaraciones de impacto ambiental el estudio de las alteraciones producidas sobre otros recursos geóticos (patrimonio geológico, recursos minerales no renovables) y procesos geológicos activos (arroyada, movimientos gravitacionales, periglaciares, glaciares, eólicos, etc.). Tampoco se estudia el impacto de las actividades antrópicas en el aumento o disminución de la peligrosidad (modificando la frecuencia y severidad de fenómenos naturales), exposición y vulnerabilidad ante procesos geológicos susceptibles de causar situaciones de riesgos naturales. Para subsanar este déficit, desde hace décadas se han publicado manuales y propuestas de protocolos para la consideración de elementos y procesos geóticos en los estudios de impacto ambiental; como pueden ser el patrimonio geológico o los procesos geomorfológicos activos (Díez-Herrero et al., 2023).

En este trabajo se aplican algunos de esos protocolos en la evaluación de los impactos sobre la gea que puede causar el desarrollo de algunas carreras de montaña multitudinarias de los circuitos pedestre y ciclista 2023 en España.

METODOLOGÍA

Entre los centenares de carreras de montaña a pie y en bicicleta que se celebran anualmente en España, se

seleccionaron algunas por: su relevancia nacional o internacional; su asistencia multitudinaria (centenares a miles de participantes); situarse en dos regiones biogeográficas diferentes (mediterránea y eurosiberiana); y transitar por zonas ecológicamente sensibles, como espacios naturales protegidos.

Para cada una de esas carreras, en contacto y coordinación con la organización, se documentaron los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidrogeológicos del recorrido, para seleccionar los tramos y sectores más interesantes de monitorizar por su posible impacto (o ausencia de impacto) sobre la gea, y que fueran representativos de la totalidad del recorrido.

En función de las características geológicas y geomorfológicas del tramo o sector del recorrido de la carrera a monitorizar, se seleccionaron diferentes métodos instrumentales (aparatos y ensayos en campo) o de caracterización descriptiva (mediante fichas de campo) para el análisis de la situación de los aspectos geóticos (elementos patrimoniales, frecuencia y magnitud de procesos y fenómenos) en la situación previa a la carrera (unos días antes), durante la carrera, y posteriormente a la carrera (los días inmediatamente siguientes).

Entre los métodos instrumentales de cuantificación de procesos y fenómenos geológicos se encuentran (Díez-Herrero et al., 2023):

- Levantamientos microtopográficos del terreno del trazado y su entorno utilizando restitución fotogramétrica con el programa Pix4D y CloudCompare (Fig. 1), así como LiDAR móvil y vuelos de drones a baja altura.
- Levantamiento de perfiles microtopográficos transversales al trazado mediante distanciómetros láser de precisión (DISTO) en soportes (trípodes y barras; Fig. 2).

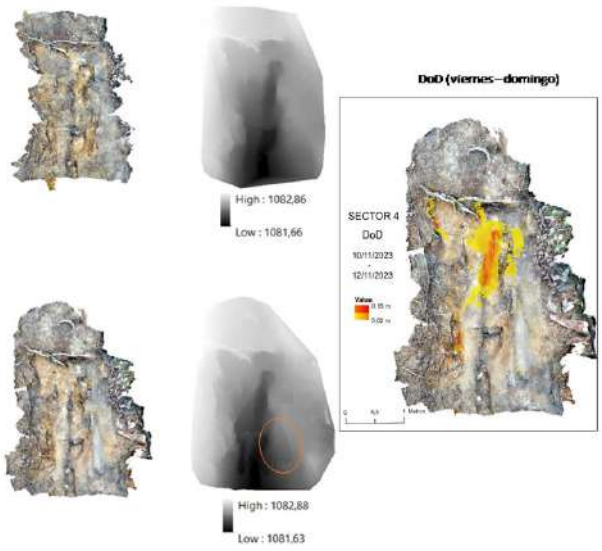


FIGURA 1. *LiDAR antes y después del Cross Tres Refugios en uno de los puntos de control, y variación micromorfológica (valores de erosión) entre ambos escenarios. El círculo naranja del modelo de sombras señala una zona donde los valores obtenidos son poco fiables.*

- Instalación de clastos marcados (cromáticamente y numerados) y medición de su desplazamiento relativo tras la carrera (Fig. 3).
- Instalación de cajas Gerlach como trampa de materiales detríticos movilizados.
- Instalación de pluviómetros-termómetros de registro continuo para la caracterización de las precipitaciones (Fig. 4).
- Ensayos de infiltración previos y posteriores a la carrera, mediante cilindro de anillo simple, para estimación de la permeabilidad vertical saturada.



FIGURA 2. *Realización de perfiles microtopográficos transversales al recorrido de la carrera, previa y posteriormente a la celebración del kilómetro vertical de Fuente Dé.*



FIGURA 3. *Colocación ordenada, previamente a la carrera, de los clastos marcados (cromáticamente por la parte inferior) y numerados, en filas a lo largo del itinerario de la carrera de Penyagolosa.*



FIGURA 4. *Instalación de pluviómetros para monitorización de las precipitaciones en un tramo del Gran Trail de Peñalara.*

La Tabla I contiene el cruce entre las carreras seleccionadas y los métodos utilizados en cada una de ellas.

Métodos y técnicas	Carrera de montaña				
	PG	kvFD	GEE	GEEb	GTP
Lev. topog.	X				X
Perf. topog.		X			
Clastos mar.	X	X	X	X	X
Caja Gerlach	X				
Pluviom.					X
Infiltración	X	X	X	X	X
Penetrómetro		X		X	X

TABLA I. *Métodos y técnicas empleadas en la monitorización instrumental de cada carrera del circuito 2023: PG, Penyagolosa (Castellón); kvFD, kilómetro vertical de Fuente Dé (Cantabria); GEE, Trail de los Gabarreros El Espinar (Segovia); GEEB, 101 Gabarreros El Espinar bicicletas (Segovia); GTP, Gran Trail Peñalara (Madrid y Segovia).*

RESULTADOS PRELIMINARES

Como resultado de la aplicación de esas técnicas instrumentales y de caracterización de procesos activos, en las diferentes carreras monitorizadas, se han obtenido unos resultados preliminares, pendientes de ser calibrados y validados en futuras ediciones de estas pruebas deportivas.

En el caso de los ensayos de **removilización antrópica de clastos** se observa lo siguiente:

- La removilización de materiales detríticos es considerable en la mayor parte de los puntos muestreados para las diferentes carreras, tanto en las realizadas a pie como en bicicleta. La media de la máxima distancia de removilización fue de 4,05 m entre todas las carreras, con el kilómetro vertical de Fuente Dé a la cabeza (7,61 m).
- Se han registrado diferencias en el sentido de la removilización de los clastos, entre ambas modalidades deportivas, cuando los trazados son ascendentes. Las bicicletas movilizaron los clastos solo cuesta abajo, independientemente de si la carrera seguía ese sentido, mientras que los corredores a pie lo hicieron en doble sentido (Fig. 5), especialmente en aquellos puntos de muestreo con las pendientes menos pronunciadas.
- Los datos apuntan a que un mayor peso de los clastos favorece que los competidores los desplacen durante la prueba, aunque hay grandes diferencias entre distintos puntos de muestreo (Figs. 5 y 6). Esta relación es lógica puesto que es más probable que los clastos de mayor tamaño sean arrastrados al paso de los participantes. Esto genera un sesgo granulométrico en los tramos de senderos afectados que, en algunos casos, pueden afectar a los desplazamientos y patrones de distribución de la microfauna.

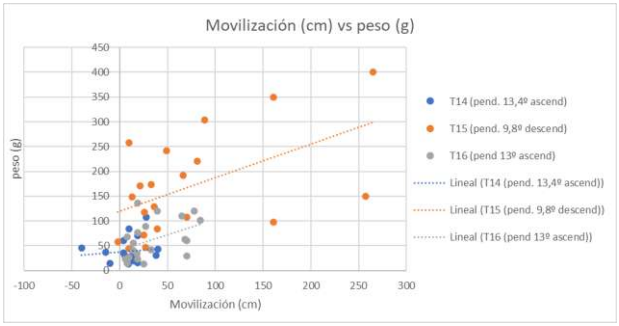


FIGURA 5. *Movilización (cm) de los clastos de caliza tras la carrera de Penyagolosa en los tramos 14, 15 y 16, en función del peso de los mismos (g); y ajustes lineales. Los valores negativos corresponden a desplazamiento de clastos contrapendiente.*

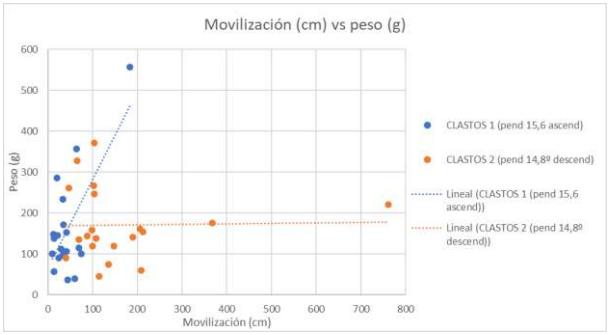


FIGURA 6. *Movilización (cm) de los clastos graníticos tras el GTP en función del peso de los mismos (g); y ajustes lineales.*

Respecto a los resultados de los ensayos de **infiltración** se puede interpretar que:

- La litología y la textura de los suelos parecen tener un papel determinante a la hora de que se produzcan cambios sustanciales en la permeabilidad tras el paso de las carreras.
- En los ensayos llevados a cabo en Penyagolosa (textura principalmente limosa), se registraron diferencias sustanciales en la infiltración entre el trazado principal de la senda y uno de sus márgenes, y antes y después de las carreras (Fig. 7).

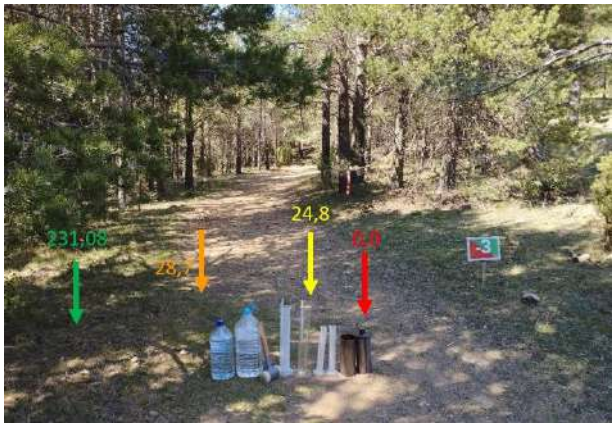


FIGURA 7. *Valores de permeabilidad vertical saturada (mm/h) de los puntos de ensayo previo (verde y amarillo) y posterior (naranja y rojo) en un tramo de la carrera de Penyagolosa a 3 km de meta.*

- En Fuente Dé se estudiaron dos puntos de la carrera en diferentes cotas. La escasa materia orgánica y la textura arcillosa del primer suelo hizo que, ya en condiciones precarrera, la permeabilidad vertical del sendero fuese casi nula. Por el contrario, en la zona baja, donde los suelos eran más profundos y desarrollados, la permeabilidad vertical no presentó variaciones sustanciales entre los distintos tratamientos (blanco-sendero precarrera-sendero post carrera).
- La prueba de bicicleta 101 Gabarreros y el Gran Trail de Peñalara se desarrollan sobre sustrato granítico de granulometría gruesa, el cual conforma suelos con una textura arenosa distintiva. En este caso, tras el paso de las carreras no se detectó una perdida significativa en la capacidad de infiltración de los suelos.

La compactación fue analizada mediante un **penetrómetro** manual en la prueba de bicicleta 101 Gabarreros y en el Gran Trail de Peñalara, observándose que:

- En la carrera de bicicletas las diferencias en la resistencia a la penetración entre antes y después de la carrera no son destacables (3,18 y 3,4 kg/cm^2, respectivamente).
- En la prueba a pie en el entorno de Peñalara, sí que se observó un incremento de la resistencia a la penetración tras el paso de la carrera (4,66 kg/cm^2 frente a 3,69 kg/cm^2).
- En esta segunda prueba, se compararon los datos de resistencia a la penetración e infiltración registrados en los mismos puntos, sin obtener una tendencia única. A pesar de que ambas variables estudian la compactación superficial, no parece existir correlación directa y significativa entre los resultados obtenidos con una y otra técnica.

Respecto al resto de técnicas, no han logrado resultados válidos en su aplicación hasta el momento (perfilación microtopográfica), carecen por ahora de series temporales suficientemente largas (pluviómetro), o requieren de la aplicación de nuevos muestreos para comprobar su efectividad en la monitorización de este tipo de actividades (Caja Gerlach).

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en estas primeras campañas de monitorización en este año 2023, se han podido extraer unas primeras lecciones de cara a la aplicación de las técnicas evaluadas:

- No todas las técnicas son universalmente aplicables. Las peculiaridades geológicas y litológicas de cada zona por la que discurren las carreras por montaña han de tenerse en cuenta para seleccionar aquellos métodos más adecuados en cada caso.
- Es altamente recomendable combinar técnicas que permitan evaluar desde distintos ángulos la misma variable ambiental (erosión, compactación, etc.). Cada parámetro de seguimiento puede reflejar distintos aspectos de un mismo proceso natural afectado por las carreras de montaña, por lo que los resultados pueden ser significativamente distintos según la técnica, sin que eso signifique que se haya cometido un error.
- Se han de priorizar las técnicas menos intrusivas respecto a las condiciones del medio. En nuestro caso, se han seleccionado técnicas que no alteran el entorno (levantamientos microtopográficos y de perfiles), o que lo hacen mínimamente (cajas Gerlach y pluviómetros-termómetros, uso de penetrómetros manuales e infiltrómetros). Las consecuencias de otras técnicas más impactantes (clastos marcados) se han minimizado removiendo los elementos utilizados del medio.
- Es imprescindible encontrar un balance entre la eficacia de la técnica, su precisión, los materiales o equipos necesarios, y el tiempo que requiere su aplicación. La réplica de los ensayos en diferentes zonas biogeográficas permite la optimización de los protocolos de trabajo y la comprobación de su eficacia bajo diferentes condiciones ambientales (tipos de sustratos, pendientes de los tramos, nivel de saturación hídrica de los suelos, granulometrías dominantes, etc.).

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el proyecto "*Impactos ambientales de las actividades deportivas en la biodiversidad y los ecosistemas: propuestas de gestión desde el conocimiento científico*" (ECODEPOR). Convocatoria 2021 de Proyectos Estratégicos Orientados a la Transición Ecológica y a la Transición Digital, Plan estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023. Referencia: TED2021-131488B-I00. Los autores desean agradecer la colaboración prestada a las siguientes entidades, colectivos y personas: la organización de las carreras monitorizadas; a los gestores de los espacios naturales protegidos por los que discurren las carreras (P. Nat. de Penyagolosa, P.N. Picos de Europa, P.N. Sierra de Guadarrama); a Mario Hernández (IGME, CSIC); al Grupo de investigación de Hidrogeología Ambiental y Cambio Global (GI-HYGLO-Lab) del IGME-CSIC y, en especial, a Almudena de la Losa y Luis Moreno.

REFERENCIAS

Díez Herrero, A.; Carcavilla, L.; Faucha, M.; Tejedo, P.; Benayas, F.J. (2023): Hacia un protocolo de caracterización y seguimiento de la Gea en relación con las actividades deportivas de montaña en senderos recreativos. En: G. Desir, E. Nadal y D. Regües (Eds.). *Libro actas de la XVI Reunión Nacional de Geomorfología*, Sociedad Española de Geomorfología, pp. 162-163.

Análisis de estabilidad de la ladera “el Feixolín” (Villablino, León)

Stability analysis of “el Feixolín” landslide (Villablino, León)

J.A. Fernández-Merodo[1], J. López-Vinielles[1], J.C. García López-Davalillo[2], M. Hernández Ruiz[1], M. Martínez-Corbella[1], M. Ferrer Gijón[1], J. Mulas de la Peña[1]

,

1 Dpto Riesgos Geológicos, CSIC-IGME, C/ de Ríos Rosas 23, Chamberí, 28003, Madrid. jose.fernandez@igme.es, j.lopez@igme.es, m.hernandez@igme.es, m.martinez@igme.es, m.ferrer@igme.es, jj.mulas@igme.es.
2 Dpto Riesgos Geológicos, CSIC-IGME, C/ La Calera, 1. 28760 Tres Cantos, Madrid. jc.garcia@igme.es

Palabras clave: Deslizamiento, escombrera minera, Feixolín, elementos finitos, Factor Seguridad

Resumen

En el marco del proyecto nacional CONTROLMINES (PID2022-138197OB-I00) se pretende proporcionar nuevas metodologías y herramientas capaces de controlar en tiempo real la estabilidad de instalaciones de residuos mineros. Este trabajo presenta los resultados preliminares de un análisis de estabilidad (realizados también en el marco de un convenio con la Junta de Castilla y León terminado) del caso de estudio de la ladera del Feixolín en Villablino (León). Importantes estigmas geomorfológicos, así como deformaciones observadas en la actualidad con metodologías de monitoreo radar InSAR desde satélite, fotogramétricas SfM (Structure from Motion) desde dron y campañas DGPS indican procesos activos y zonas inestables en la ladera con una extensión total de más de 1000 m y desnivel de 500 m (Rodriguez García et al., 2023).

Este trabajo investiga, desde un punto de vista numérico (utilizando el Método de los Elementos Finitos) a través de análisis de estabilidad, el posible movimiento de un paleo-deslizamiento reactivado por la actividad minera del carbón del siglo XX y la presencia de una gran escombrera en la cabecera del deslizamiento.

Abstract

The CONTROLMINES national project (PID2022-138197OB-I00) aims to provide new methodologies and tools capable of monitoring the stability of mining waste facilities in real time. This paper presents the preliminary results of a stability analysis (also carried out in the framework of an agreement with the Junta de Castilla y León completed) of the case study of the Feixolín slope in Villablino (León). Important geomorphological stigmata, as well as deformations currently observed with InSAR radar monitoring methodologies from satellite, SfM (Structure from Motion) photogrammetry from drones and DGPS campaigns indicate active processes and unstable zones on the slope with a total extension of more than 1000m and a difference in height of 500m (Rodriguez García et al., 2023).

This work investigates, from a numerical point of view (using the Finite Element Method) through stability analysis, the possible movement of a paleo-landslide reactivated by coal mining activity in the 20th century and the presence of a large dump at the head of the paleolandslide.

Referencias

A. Rodríguez García, A. Suárez Rodríguez, R. Castaño de Luis, J.C. García López-Davalillo, Mario Hernández Ruiz (2023). El movimiento de ladera del Feixolín. Un movimiento paraglaciar reactivado por la actividad minera. Conferencia Geolaciana 2023

Evaluación de los peligros geológicos en la franja litoral catalana como herramienta para la prevención del riesgo

Assessment of geological hazards in the Catalan coast as a tool for risk prevention.

M. González[1], J. Pinyol[1], R. Carles[1], M.J. Micheo[1]

1 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Parc de Montjuïc s/n. 08038 Barcelona. Marta.gonzalez@icgc.cat, Jordi.Pinyol@icgc.cat , Rosa.Carles@icgc.cat, Fus.micheo@icgc.cat

Palabras clave: peligrosidad, movimientos de ladera, inundaciones costeras, erosión costera, subida del nivel del mar

Resumen

La costa catalana se extiende desde Cap Falcó al norte (Alt Empordà) hasta el río la Sènia al sur (Montsià), con una longitud de 911 km (a escala 1:5.000). Desde una perspectiva socioeconómica, el 43% de la población catalana (8 millones de habitantes) vive en esta franja, y en ella se concentra gran parte de su actividad económica y turística. Además, según los datos publicados por el Institut d'Estadística de Catalunya (IDESCAT, 2020), el 90% de los 19,4 millones de turistas que visitaron Cataluña en 2019, se alojaron en municipios costeros siendo gran parte de ellos usuarios de las playas. A esta presión de visitantes, hay que añadir su elevada antropización, ya que el 59% del litoral está urbanizado en sus primeros 100 metros, valor que llega al 91% si se descuenta el Cap de Creus y el Delta del Ebro (Gencat, 2021). Otro dato relevante es la existencia de 47 puertos de la comunidad, que equivalen a un puerto cada 20 km de costa. Todos estos factores, junto con los peligros geológicos asociados a la dinámica litoral (movimientos de ladera, inundaciones costeras por oleaje, erosión costera y subida del nivel del mar) hacen que la realización de estudios que evalúen su peligrosidad sea indispensable para la prevención del riesgo. En esta contribución, presentamos los resultados de los trabajos realizados en el marco de los diferentes proyectos que el ICGC está llevando a cabo, como el Mapa para la prevención de riesgos geológicos de Catalunya a escala 1:25.000 (MPRG25M) o el Servicio de la dinámica litoral (SIDL), entre otros.

Abstract

The Catalan coast stretches from Cap Falcó in the north (Alt Empordà) to the La Sènia river in the south (Montsià), with a length of 911 km (at a scale of 1:5,000). From a socio-economic perspective, 43% of the Catalan population (8 million inhabitants) live in this zone, and a large part of its economic and tourist activity is concentrated there. Moreover, according to data published by the Statistical Institute of Catalonia (IDESCAT, 2020), 90% of the 19.4 million tourists who visited Catalonia in 2019 stayed in coastal municipalities, most of them being beach users. To this pressure of visitors, we must add the high level of anthropisation, as 59% of the coastline is urbanized on its first 100 metres; the value increases to 91% if we discount the Cap de Creus and the Ebro Delta (Gencat, 2021). Another relevant data is the existence of 47 ports in the region, the equivalent of one port every 20 km of coastline. All these factors, together with the geological hazards associated with coastal dynamics (slope movements, coastal flooding, coastal erosion and sea level rise), make it essential to conduct studies to assess their hazard for risk prevention. In this contribution, we present the results of the work carried out in the framework of the different projects that the ICGC is developing, such as the Map for the prevention of geological hazards of Catalonia at a 1:25,000 scale (MPRG25M) or the Coastal Dynamics Service (SIDL), among others.

Referencias

GENCAT, 2021. Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural; Consell Assessor pel Desenvolupament Sostenible (2021). Un litoral al límit. Recomanacions per a una gestió integrada de la costa catalana. Informe 1/2021. Barcelona: Generalitat de Catalunya.

IDESCAT, 2020. Establiments hotelers. Viatgers i grau d'ocupació. Per marques turístiques. Barcelona: IDESCAT.

Registro sísmico durante un año en el río Nalón (Asturias): caudal, sedimento, viento y actividad antrópica

Seismic record during one year in the Nalón river (Asturias): river flow, sediment transport, wind and anthropogenic activity

G. González-Rodríguez[1], D. Vázquez-Tarrío[2], E. Fernández-Iglesias[1], M. Fernández-García[1], L. Incera[1], R. Menéndez-Duarte[3], J.A. Pulgar[3], J.M. González[3], D. Pedreira[3]

1 INDUROT, Universidad de Oviedo, Edificio de Investigación, s/n 33600 Mieres, Asturias. gil@uniovi.es; elena.indurot@uniovi.es, fdezgarciamaria.fuo@uniovi.es, uo255364@uniovi.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, C. de Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid. d.vazqueztarrio@igme.es
3 Dpto. Geología, Univ. Oviedo, 33005 ramenendez@uniovi.es, pulgar@uniovi.es, jmgcortina@uniovi.es, dpedreira@uniovi.es

Palabras clave: sismógrafo, inundación, sedimento, ruido antrópico**.**

Resumen

En el tramo bajo del río Nalón (Asturias) se instaló un sismógrafo en marzo de 2022 con el objetivo de investigar las relaciones entre la señal sísmica y la dinámica fluvial, en el marco del proyecto CANALAB (PID2020-118228RB-C21, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033). En este trabajo presentamos algunos resultados preliminares obtenidos tras un año de registro. Concretamente, mediante la aplicación de un modelo general aditivo (GAM), se han integrado los registros obtenidos, durante un año, sobre diversas variables ambientales, como el caudal, el viento y la componente sistémica día/noche relacionada con el ruido antrópico. Los resultados muestran que el caudal explicaría un 92% de la variación de la señal sísmica, un 1.4% se explicaría por la velocidad del viento y un 0.4% correspondería a señal sistémica. Además, durante las avenidas de marzo y abril de 2022 y enero 2023, se detectó un incremento en la intensidad de la señal entre los 5 Hz y 40 Hz, que está en consonancia con los cambios del caudal y con la información subrogada de transporte de sedimento obtenida a partir de diversas placas de impacto instaladas en el lecho del río. Este análisis muestra una relación importante entre el caudal fluvial y el registro sísmico, ya observado en otros trabajos, y señala algunas posibles relaciones con los flujos de sedimento como carga de fondo. Estos primeros resultados ponen de relieve las bondades de la sísmica en la monitorización de avenidas fluviales, tanto de los flujos líquidos como de los caudales sólidos de tamaño grueso, de especial interés como información complementaria y en tiempo real, a la habitualmente registrada por las estaciones de aforo de las administraciones hidrológicas.

Abstract

In the lower section of the Nalón River (Asturias), a seismograph was installed in March 2022 to investigate the relationships between the seismic signal and fluvial dynamics in the framework of the CANALAB project (PID2020-118228RB-C21, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033). In this study, we present some preliminary results after one year of data acquisition. Specifically, by applying a general additive model (GAM), the records obtained during one year on several environmental variables, such as flow, wind and the systemic day/night component related to anthropic noise, have been integrated. The data indicates that flow is responsible for 92% of the variation in the seismic signal, while wind speed and systemic signal account for only 1.4% and 0.4% respectively. Furthermore, an increase in signal strength between 5 Hz and 40 Hz was detected during the floods of March and April 2022 and January 2023, which is consistent with changes in flow and surrogated sediment transport information obtained from various impact plates installed on the riverbed. This analysis shows an important relationship between river flow and the seismic record, already observed in other works, and points to some possible relationships with sediment fluxes as bed load. These first results highlight the benefits of seismic monitoring of river floods, including liquid flows and coarse solid flows, which provide complementary and real-time information to that typically recorded by water authority gauging stations.

Importancia y significado petrológico y ambiental de las emisiones de SO_2 durante una erupción basáltica en Centroamérica: el caso de la erupción del 29 de diciembre del 2013 del volcán San Miguel, El Salvador.

Importance and petrological and environmental significance of SO_2 emissions during a basaltic eruption in Central America: the case of the December 29, 2013 eruption of the San Miguel volcano, El Salvador.

A. Hernández De la Cruz[1,2], D. Gimeno Torrente[1], V. Conde Jacobo[3], R. Olmos Guevara[2], F. Barahona Escoto[2] y M. Hernández Martínez[2]

1 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. C/ Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona (España) d.gimeno.torrente@gmail.com domingo.gimeno@ub.edu
2 Grupo de Investigaciones Vulcanológicas de la Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, C. A. agustin.hernandez@ues.edu.sv
3 Department of Radio and Space Science, Chalmers University of Technology, 41296 Gothenburg, Sweden, vladimir.conde@chalmers.se

Resumen: Se exponen los resultados de la monitorización detallada diaria de la emisión de SO_2, con estaciones móviles durante un mes y medio inmediatamente posterior a la erupción VEI-2 del 29 de diciembre de 2013 del Volcán San Miguel o Chaparrastique (El Salvador). Estos datos resultan ser en los momentos de máxima emisión superiores (casi el doble en algunos casos) a los previamente publicados de una pequeña red de estaciones fijas, y muestran la existencia de varios ciclos de desgasificación. Se parte de unos valores de base pre-eruptivos estimados en poco más de 300 t SO_2/día, a valores de pico máximo que llegan a ser de 4.300 y 2.000 t SO_2/día en el primer y segundo ciclo, respectivamente. Dado el aparente poco valor predictivo de las emisiones en días previos a una erupción, y la presencia abundante de sulfato de calcio en las cenizas, se señala la hipótesis que ese sulfato no sólo se forme por sublimación directa en el seno de la columna eruptiva, sino que pueda corresponderse como en otros volcanes con la precipitación de anhidrita como fase magmática, y la posible incidencia de la precipitación de esta fase en la conducta de emisión de gases pre- y post-eruptiva.

Palabras clave: Volcán San Miguel, SO_2, VEI-2, magma basáltico, El Salvador.

Abstract: *The results of a detailed daily monitoring of SO_2 emission (with mobile stations) for a month and a half immediately after the VEI-2 eruption of December 29, 2013 of the San Miguel or Chaparrastique Volcano (El Salvador) are presented. These data turn out to be higher at times of maximum emission (almost double in some cases) than those previously published from a small network of permanent stations and show the existence of several degassing cycles. It starts from pre-eruptive base values estimated at just over 300 t SO_2/day, to maximum peak values that reach 4,300 and 2,000 t SO_2/day in the first and second cycles, respectively. Given the apparent little predictive value of emissions in the days prior to an eruption, and the abundant presence of calcium sulfate in the ashes, the hypothesis is pointed out that this sulfate is not only formed by direct sublimation within the eruptive column, but that it may correspond, as in other volcanoes, to the precipitation of anhydrite as a magmatic phase, and the possible incidence of the precipitation of this phase on the pre- and post-eruptive gas emission behavior.*

Key words: *San Miguel volcano, SO_2, VEI-2, basaltic magma, El Salvador.*

INTRODUCCION

El volcán San Miguel (en adelante VSM) o Chaparrastique es parte del Arco Volcánico Centroamericano, que se extiende a lo largo de aproximadamente 1400 km, desde el volcán Tacaná, ubicado en la frontera entre México y Guatemala, hasta el volcán La Yeguada en Panamá. Este sistema volcánico es un arco activo producto de la convergencia y subducción de la placa de Cocos contra la del Caribe, dando lugar a una serie de estructuras volcánicas que comprende desde volcanes monogenéticos que forman campos volcánicos, estratovolcanes en distinto estado de desarrollo hasta una serie de calderas, ubicadas en su mayoría en la parte oeste (El Salvador y Guatemala). Mientras que en los estratovolcanes (1.000 o más metros de desarrollo respecto a su base relativa) predomina el magmatismo básico (basaltos, andesitas basálticas y en menor grado andesitas) en las calderas ha tenido lugar un volcanismo explosivo más diferenciado (riolitas y dacitas, véase Hernández De la Cruz *et al*., 2012, y referencias ahí). Las calderas han desarrollado actividad explosiva (pliniana o superior) pero con una frecuencia muy baja en tiempos históricos, mientras que los estratovolcanes básicos representan la actividad más común en este contexto geodinámico

El VSM es uno de los volcanes más activos en el Frente Volcánico Costero en El Salvador, con una altura de 2.092 msnm y unos 1.500 de desarrollo vertical, principalmente formado por una rápida acumulación de materiales lávicos y piroclásticos con un rango de composición entre basaltos y andesitas basálticas (Chesner *et al*., 2004, Hernández De la Cruz *et al*., 2012). Su principal actividad eruptiva está relacionada con la emisión de coladas lávicas (como las de 1699, 1787, 1819 y 1844, Meyer-Abich 1956, y referencias ahí) que constituyen lo esencial del edificio del estratovolcán, pero en los últimos 4 siglos y medio ha desarrollado no menos de 50-60 eventos explosivos registrados de naturaleza magmática, freática o freatomagmática. En realidad, más de la mitad de estos episodios han sido descritos desde la década de los 60's del pasado siglo, lo que hace pensar que el registro antiguo de este tipo de eventos está muy infravalorado. Estos eventos explosivos conllevan frecuentemente emisiones de gases, en particular importantes emisiones de SO_2, y también emisión y caídas de ceniza, principalmente en las proximidades de cada estratovolcán.

El volcán San Miguel está ubicado en el extremo este de El Salvador a aproximadamente 7.5 km al suroeste de la ciudad de San Miguel, que es la tercera ciudad más importante del país, con varios centros urbanos menores próximos (Quelepa, Moncagua, Nueva Guadalupe, Chinameca, Jucuapa, San Jorge, San Rafael Oriente y El tránsito, entre otros). Se estima que en el área de más directa influencia de dicho volcán (menos de 10 km desde su cima) viven más de 75.000 personas, mientras que en la ciudad viven más de 350.000 personas. Esta región tuvo una importante actividad agrícola durante el siglo XX, mientras que en la actualidad la economía se desplaza principalmente hacia el sector de los servicios y, muy recientemente y como todo el resto del país, hacia el turismo. En este apartado turístico cabe destacar que una de las actividades que se está promoviendo es la de la subida de grupos al cráter del VSM.

El domingo 29 de diciembre del 2013, a las 10:30 am (hora local), el VSM desarrolló evento eruptivo cuyo índice de explosividad fue clasificado de nivel VEI-2 (Scarlato *et al*., 2017). Este episodio, a pesar de su brevedad, puede calificarse como relativamente importante tanto por lo que se refiere a las emisiones de ceniza y su dispersión en sentido este-oeste a lo largo de la mayor parte de la república de El Salvador, así como por las emisiones de SO_2 que pudieron monitorizarse desde satélite también en un amplio penacho de dispersión en la misma dirección.

Desde el momento en el que el estudio de los gases volcánicos en Centroamérica se inició a principios del presente siglo, se han desarrollado diversas metodologías. Los gases volcánicos inicialmente estudiados son el CO_2 y el SO_2, y normalmente se ha afrontado su estudio con el fin principal de identificar precursores que permitan hacer una buena gestión del riesgo volcánico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con anterioridad a las mediciones que son objeto de la presente nota, se realizaron cuantificaciones discretas de flujos de SO_2 del VSM entre 1999 y el 2002 utilizando un *Ground-based and aircraft correlation spectrometer* (COSPEC) (Rodríguez et al., 2004). Después del año 2005 se realizaron mediciones discretas de flujos de SO_2 utilizando *Mini-DOAS system* (Galle *et al*., 2002). Posteriormente se instalaron 2 estaciones *Scanning Differential Optical Absorption Spectrometer* (Scan-DOAS), estación Ranchito y estación San Jorge, ubicadas al oeste del volcán y que forman parte de la "Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change" (NOVAC). La existencia de estos datos previos son de gran utilidad, tal como comentaremos, ya que permiten tener una idea aproximada de los niveles de base de emisión de SO_2 del VSM fuera del período eruptivo estrictamente dicho, y por lo tanto proceder a su análisis sin tener que realizar comparaciones con los valores establecidos por la NOVAC en otros estratovolcanes, por ej., Arellano *et al* (2021).

Los datos presentados en este estudio fueron obtenidos por el Grupo de Investigación Vulcanológica de la Universidad de El Salvador, a través de un equipo *Scanning Differential Optical Absorption Spectrometer* (Scan-DOAS) portátil, ubicado convenientemente cada día, según la trayectoria de la pluma de gases del volcán. Las mediciones se realizaron diariamente en el periodo comprendido entre el 30 de diciembre de 2013 y el 16 de febrero de 2014, de manera autónoma y complementaria a las que realizaron otras instituciones como el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales



FIGURA 1. *Detalle de la instrumentación portátil empleada en la toma de las medidas de la emisión de SO_2 durante el mes y medio inmediatamente posterior a la erupción del 29 de diciembre de 2013 del Volcán San Miguel.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor máximo determinado en el periodo en estudio fue de 4.309 t SO_2/día y correspondió al 31 de diciembre, apenas dos días después de la erupción. En general se observó un ciclo de emisión importante, con valores superiores a las 2.000 t SO_2/día en el curso de la primera semana posterior a la erupción, que decreció rápidamente hasta valores del orden de 600 t SO_2/día.

Con posterioridad se produjo un repunte en las emisiones con un segundo ciclo que duró desde el día 6 de enero de 2014 hasta el 16 del mismo mes, con un pico del orden de 2.000 t SO_2/día y valores bastante estables durante la primera semana (entre 1.500 y 1.000 t SO_2/día), para posteriormente decaer hasta registrarse el día 17 valores del orden de 350 t SO_2/día. Con posterioridad a estos dos primeros ciclos bien marcados de emisiones, éstas se fueron atenuando, primero en un tercer ciclo que duró 5 días, con un valor máximo cercano a 1.000 t SO_2/día y un mínimo de 420 t SO_2/día, y un cuarto de 6 días con un máximo cercano a las 1.500 t SO_2/día. A partir de ese momento los valores fueron reduciéndose gradualmente, ya sin superar las 500 t SO_2/día, con días en los que no se superaban o ni siquiera alcanzaban las 100 t SO_2/día. A partir de ese momento se consideró que se habían recogido los datos esenciales referidos a este evento eruptivo y se interrumpió el trabajo de campo con el equipo portátil de registro.



FIGURA 2. *Penacho de emisión de gases del Volcán San Miguel tal como se mostraba la tarde del día 30 de diciembre de 2013, inmediatamente después del evento eruptivo, y aproximadamente en el momento en el que se registraban los valores más altos en emisión de SO_2.*

La erupción explosiva del 29 de diciembre de 2019 puede considerarse a priori de las importantes dentro de su categoría, no tanto por su duración o el volumen total de piroclastos emitidos, cuanto por la importante distribución areal de la dispersión de cenizas, y el volumen diario de SO_2 emitido durante al menos los dos primeros ciclos correspondientes a las dos primeras semanas tras la erupción. Por lo tanto, aunque se trata objetivamente de una erupción pequeña y podemos sospechar que muchas otras como ésta han pasado desapercibidas en el registro histórico, (véase Meyer-Abich, 1956, y referencias ahí) el hecho de ser de las primeras que han sido suficientemente bien monitorizadas, aunque sea en el caso que nos ocupa inmediatamente después del evento eruptivo, pueden representar un hito que nos permita comparar con otras y crear pautas de interpretación de cara a erupciones futuras.

Granieri *et al*. (2015) han estimado el valor de base de la emisión del VSM a lo largo del año 2013 en sus estaciones fijas en alrededor de 310 t SO_2/día, con excursiones por encima y debajo de este valor superiores al 50% de este. Según sus datos, en los días precedentes a la erupción se produjo un incremento de los valores de base anual moderado, del orden del doble de éste (lo que no es muy importante, si tenemos en cuenta el valor de las excursiones "ordinarias" sobre el valor de base a lo largo de ese año). Basándonos en sus datos, podemos concluir que la erupción no presentó por lo tanto muchos indicios que permitieran anticipar su llegada tomando en consideración la emisión de los gases. Estos autores estiman (según dicen explícitamente, de manera conservadora) que la emisión en el momento de la erupción el día 29 de diciembre debía de ser del orden de 2.200 t SO_2/día, basándose en el pico de emisión máxima el día 31 de diciembre de 2013. Después indican una bajada gradual en los niveles de emisión de SO_2, pero sin detectar los ciclos que se trazan con claridad en nuestros datos. Como es usual en este tipo de trabajos, estos autores señalan que pudiera haber habido en algún momento próximo a la erupción valores tóxicos de este gas en las proximidades del foco eruptivo.

Una primera conclusión de nuestro trabajo es que estos valores previamente ofrecidos por Granieri *et al*. (2015) a través de la red de estaciones fijas parecen bastante menores a los registrados en este trabajo durante el periodo inmediatamente post-eruptivo, y que no recogen con la misma nitidez los ciclos de desgasificación producidos en las semanas sucesivas a la erupción, mientras que por el contrario sí se observa una relativa buena correspondencia con los valores más bajos de emisión registrados al final de nuestra serie de medidas.Si excluimos un carácter claramente predictivo de la erupción para las emisiones (ya que de hecho no parece diferir el ligero incremento que registran estos autores antes de la erupción de las múltiples excursiones sobre el valor de base también registradas, sin efecto eruptivo alguno, a lo largo del año 2013), quizás deberíamos buscar otros criterios para entender lo que origina esa relativamente baja emisión previa. Dado que en su momento hicimos una recogida en paralelo de las cenizas prístinas y las sometimos a un estudio químico, mineralógico, microtextural y a experimentos de lixiviación y caracterización química de los lixiviados disponemos de información complementaria sobre la parte sólida de los productos del mismo episodio eruptivo.

El hecho más remarcable en relación con las emisiones de gases es que en las cenizas se observa una fase cristalina con hábito mineral muy bien desarrollado, que corresponde (SEM+EDS) a sulfato de calcio. Al proceder a los experimentos de lixiviación de esa ceniza con agua destilada, se observa que se produce un rápido incremento de la acidez del medio, atribuible en buena medida a la rápida disolución de parte de esa fase de sulfato de calcio. Este tipo de observaciones y experimentos de lixiviación se hacen rutinariamente para evaluar el impacto ambiental de una erupción explosiva con importante emisión de cenizas sobre la hidrosfera, y a través de la interacción con esta, sus eventuales efectos en los humanos, la flora y la fauna. En el caso concreto

de El Salvador, estudios previos de tipo agronómico desarrollados sobre plantas de café afectados por la erupción del 2005 del volcán de Santa Ana reportaron que aunque las plantas no llegaban a morir, dejaron de dar fruto durante un periodo de tiempo de hasta 7 años con posterioridad a dicha erupción. Este tipo de interacción negativa ejercida sobre la planta por los lixiviados formados *in situ* a partir de las cenizas prístinas caídas sobre los cafetos se pueden atribuir a varios factores, siendo los dos principales la acidez aportada al suelo por las cenizas tras las primeras lluvias que las afectaran, como también la toxicidad aportada por los metales liberados a partir de fases solubles inestables presentes en las cenizas. Este tipo de fases solubles se sabe que se producen por sublimación directa sobre las partículas de cenizas volcánicas de diferentes fases presentes en el seno de la nube eruptiva durante el desarrollo de la erupción. Este tipo de cristales idiomórficos de sulfato de calcio fueron inicialmente interpretados como fases autigénicas sublimadas en la superficie de la ceniza aglomerándola y formando pequeños lapillis acrecionales (Hernández De la Cruz *et al* 2014), pero observaciones más detalladas parecen indicar que se trata de fases cristalinas magmáticas. Este tipo de fases (en general, anhidrita) sinmagmáticas han sido descritas en los últimos años en diferentes erupciones de volcanes ricos en emisiones de azufre (p.e., en el Pinatubo), y su formación podría explicar tanto la escasa presencia de emisiones de SO_2 en el periodo inmediatamente anterior a la erupción (si se estaban formando) como la posterior paralización sin-posteruptiva del proceso, liberando todo ese azufre en forma de gas dióxido en los días y semanas inmediatamente posteriores.

Un comportamiento de este estilo puede explicar los ciclos de desgasificación descritos en este trabajo con posteridad a la erupción, indicando al menos en parte el gradual cierre del sistema asociado al retorno de las condiciones de cristalización del magma en la cámara previas al momento de la erupción. Esta hipótesis de trabajo debería ser contrastada tanto retrospectivamente en aquellos volcanes asociados a arcos magmáticos relacionados con procesos de subducción con magmas ricos en azufre en los que se disponga tanto de cenizas prístinas como de registro detallado sin-pre-y posteruptivo de las emisiones de gases, como monitorizando más específicamente este tipo de estratovolcanes en el arco volcánico centroamericano y realizando los correspondientes estudios petrológicos sobre los piroclastos en paralelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo institucional, logístico y financiero aportado para la realización de este trabajo por las siguientes entidades: el Grupo de Investigaciones Vulcanológicas de la Universidad de El Salvador GIV-UES, la Secretaría de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador SIC-UES y al proyecto internacional *Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change* (NOVAC).

REFERENCIAS

Arellano, S., Galle, B , Apaza, f. , Avard, G., Barrington, Ch, Bobrowski, N., Bucarey, Cl., Burbano, V., Burton, M., Chacón, Z., Chigna, G., Clarito, Ch.J., Conde, V. , Costa, F., De Moor, M., Delgado-Granados, H., Di Muro, A., Fernandez, D., Garzón, G., Gunawan, H., Haerani, N., Hansteen, T.H., Hidalgo, S., Inguaggiato, S., Johansson, M., Kern, Ch., Kihlman, M., Kowalski, Ph., Masias, P., Montalvo, F., Möller, J., Platt, U., Rivera, Cl., Saballos, A., Salerno, G., Taisne, B., Vásconez, F., Velásquez, G., Vita, F. y Yalire, M. (2021) Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO_2 emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 1167–1188.

Chesner C.A., Pullinger C.R.; Escobar C.D. al 2004. Physical and chemical evolution of San Miguel volcano, El Salvador. *Geol.Soc. of America Spec. Paper*, 375: 213-226.

Galle, B., Oppenheimer, C., Geyer, A., McGonigle, A.J.S., Edmonds, M., y Horrocs, L.A. (2002): A miniaturized UV spectrometer for remote sensing of SO2 fluxes: A new tool for volcano surveillance, J.Volcanol.Geotherm.Res. 119: 241–254.Granieri, D., Salerno, G., Liuzzo, M., La Spina, A., Giuffrida, G., Caltabiano, T., Giudice, G., Gutierrez, E., Montalvo, F., Burton, M.R. y Papale,P. (2015), Emission of gas and atmospheric dispersion of SO_2 during the December 2013 eruption at San Miguel volcano (El Salvador, Central America), *Geophys. Res. Lett.*, 42: 5847–5854.

Hernández de la Cruz, A., Gimeno, D. y Gisbert, G. (2012): Caracterización geoquímica básica de lavas de El Salvador (Centroamérica): principales tendencias registradas en el Frente Volcánico Costero. *Geo-Temas* 13, VIII Congreso Geológico de España, CD de resúmenes, S07-283 O, 4 pp, ISSN: 1576-5172.

Hernández de la Cruz, A., Gimeno, D. y Gisbert, G. (2014): Caracterización de la ceniza de la erupción del volcán San Miguel (El Salvador) de 29 diciembre de 2013. *XXXIV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía, 1- 4 de julio 2014, Resúmenes*: 237

Meyer-Abich, H. (1956). Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador (América Central). *Anales del Servicio Geológico Nacional de El Salvador*, 3: 1-102

Rodriguez, L., Watson, M., Rose, W., Brannan, Y., Bluth, G., Chigna, G., Matias, O., Escobar, D., Carn, S., and Fischer, T. (2004), SO2 emission to the atmosphere from active volcanoes in Guatemala and El Salvador, 1999–2002, J. Volcanol. Res. 138: 325–344.

Scarlato, P., Mollo, S., Del Bello, E., von Quadt, A., Brown, R.J., Gutierrez, E., Martinez-Hackert, B., Papale, P. (2017) The 2013 eruption of Chaparrastique volcano (El Salvador): Effects of magma storage, mixing, and decompression, *Chemical Geology* 448 :110–12.

Análisis de peligrosidad por flujos aluvionales del sitio geopatrimonial del pueblo minero de Puquios (desierto de Atacama, Chile)

Mud flows hazard analysis of the Puquios mining town geoheritage site (Atacama Desert, Chile)

T. Izquierdo[1,2], M. Cáceres[2], M. Soto[2] y M. Abad[1,2]

1 Dpto. Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, ESCET - URJC. 28933 Móstoles (España). tatiana.izquierdo@urjc.es, manuel.abad@urjc.es
2 Grupo de Investigación Consolidado en Dinámica de la Tierra y Evolución del Paisaje (DYNAMICAL), ESCET - URJC. 28933 Móstoles (España). makestanne@gmail.com, mauricio.s.c.2010@gmail.com

Resumen: El poblado minero de Puquios tuvo gran importancia en la región de Atacama (Chile) desde finales del siglo XIX hasta los años 30 de siglo pasado cuando queda abandonado. Sus ruinas se encuentran expuestas a aluviones y crecidas que han actuado sobre este sector durante tiempos geológicos recientes y hasta la actualidad. En este trabajo se analiza el contexto geomorfológico, el registro sedimentario y los procesos activos para evaluar el grado de exposición ante estos fenómenos de este lugar, de gran interés geopatrimonial y minero. En particular se estudian e interpretan los procesos ocurridos durante el evento hidrometeorológico extraordinario de marzo de 2015, que afectó casi a la totalidad de las estructuras produciendo graves daños sobre las ruinas, en ese momento ya en un avanzado estado de deterioro.

Palabras clave: inundaciones, patrimonio geominero, Atacama, Chile

Abstract: *Puquios mining town was of great importance in the Atacama region (Chile) at the end of the 19th century and beginning of the 20th century, finally becoming uninhabited at the end of the 1930s. The remains of Puquios are exposed to floods that have acted on this sector of the Quebrada Paipote during recent geological times and until today. In this work, the geomorphological context, the sedimentary record and the active processes of this sector are analyzed to evaluate the degree of exposure to these hazardous processes of the ruins of Puquios. In particular, we studied and interpreted the processes that occurred during the extraordinary hydrometeorological event of 2015 that affected almost all the structures and caused serious injuries to the set of ruins that, at that time, were already in an advanced state of deterioration.*

Key words: *floods, geomining heritage, Atacama, Chile*

INTRODUCCIÓN

El poblado minero de Puquios se localiza en la precordillera de los Andes, a unos 60 km de la ciudad de Copiapó (norte de Chile) (Fig. 1A). Durante su mayor esplendor, a mediados-finales del siglo XIX, este pueblo minero contaba con cerca de 1.000 habitantes (Oficina Central de Estadística, 1885). Puquios estaba conectada con el ferrocarril Caldera–Copiapó, lo que permitió el desarrollo industrial y económico de esta zona minera para extraer y producir los minerales con costes competitivos y en cantidades rentables. En el año 1894, el 60% del oro y el 43% del cobre de Atacama salían de Puquios (Compañía de Ferro Carril de Copiapó, 1882). Sin embargo, a partir de los años 30 del siglo XX los mineros abandonaron el poblado y el lugar quedó deshabitado. Sus ruinas constituyen vestigios relevantes de la actividad minera en la región, y tienen un alto valor patrimonial geominero e histórico.

Hoy día se pueden visitar los restos de las casas, las plantas industriales y el cementerio, que se encuentran en avanzado estado de deterioro. Lamentablemente, y a pesar de que el patrimonio minero queda incluido en varios de los Geoparques definidos por la UNESCO en otros lugares del mundo (Cañizares, 2020), y está amparado por la legislación chilena, los restos de Puquios se encuentran abandonados y en una zona donde ocurren de manera frecuente inundaciones y flujos de fango, en el tramo medio de la Quebrada Paipote, afluente principal del rio Copiapó. Estos procesos han actuado sobre la zona donde se construye el poblado desde tiempos geológicos recientes y hasta la actualidad (Izquierdo et al., 2024). A pesar de constituir un núcleo de importancia económica e histórica, existe muy poca información sobre esta población y el impacto de los flujos aluvionales sobre sus estructuras en su periodo de actividad minera o cuando quedó deshabitada.

En este trabajo se analiza el registro morfo-sedimentario del entorno de Puquios, lo que permite reconstruir el funcionamiento del sistema aluvial donde se emplaza, de marcado comportamiento torrencial. Además, el estudio detallado del evento extraordinario ocurrido en marzo de 2015 en este sector ha permitido establecer las zonas de mayor afección y evaluar su exposición ante futuros eventos aluvionales, que potencialmente puedan afectar a estas ruinas conduciendo a su completa destrucción.

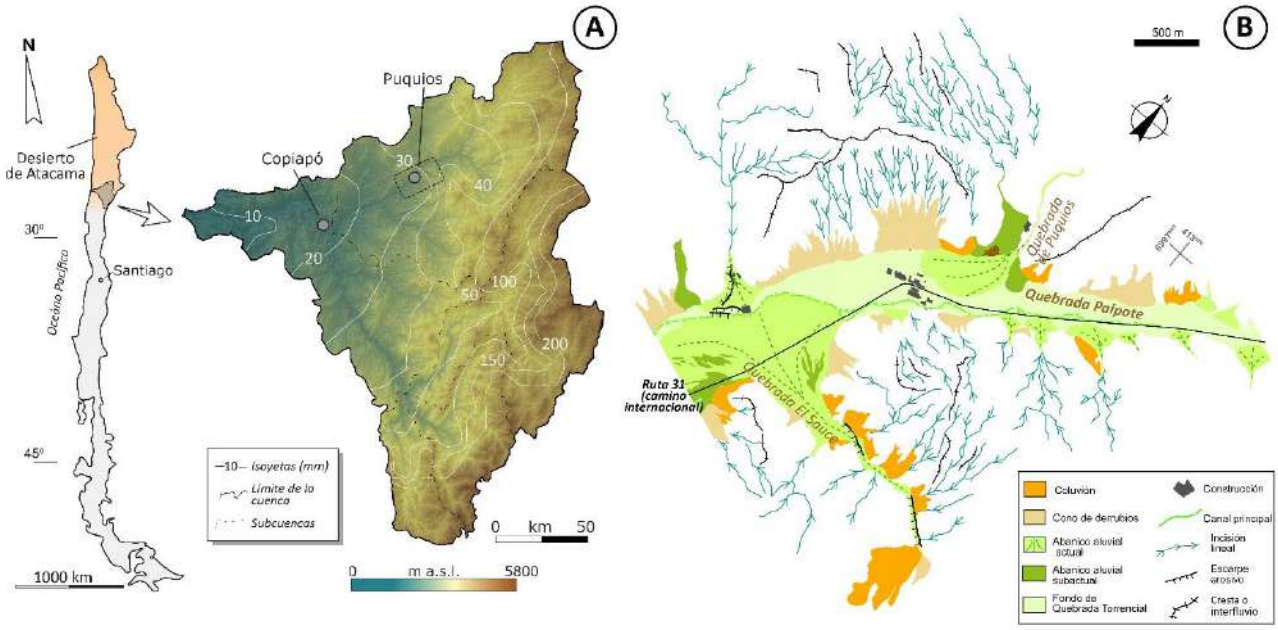


FIGURA 1. *A) Localización de la cuenca del río Copiapó en el sector meridional del desierto de Atacama y localización de la zona de estudio entro de la cuenca junto con las isoyetas de precipitación media anual; B) Cartografía geomorfológica del sector de Puquios pre-evento extraordinario de inundación de 2015.*

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

En la latitud de la zona de estudio se define un límite hidrológico condicionado por la Diagonal Árida de Sudamérica (Abraham et al., 2020). Hacia el sur los ríos son perennes en condiciones naturales y hacia el norte son efímeros, ya que las precipitaciones son inferiores a 20 mm. En este sentido, el pueblo de Puquios se emplaza en la llanura aluvial de Quebrada Paipote (afluente efímero del río Copiapó), que es recorrida por la ruta 31 que conduce hacia la frontera con Argentina.

En este punto el valle fluvial presenta una anchura inferior a 500 m y un fuerte desnivel en sus laderas de más de 1000 m. Existen dos quebradas tributarias cercanas, El Sauce y Puquios, de corto desarrollo y desniveles medios del 11%, que generan extensos abanicos actuales que cubren la mayor parte de la llanura aluvial (Fig. 1B). El canal principal de la quebrada tiene una pobre expresión geomorfológica, con márgenes erosivos verticalizados y desnivel irregular, casi nunca >2 m y, en general, con alturas <0,5 m.

Se ha identificado una segunda generación de abanicos aluviales subactuales, (Pleistoceno superior), representada por cuerpos preservados íntegramente, o en retazos, que aparecen colgados y aislados al paisaje sobre los sistemas aluviales actuales (Fig. 1B). Tanto los abanicos de Puquios como de Los Sauces integran retazos de estos sistemas antiguos. Ambas generaciones de abanicos se caracterizan por depósitos de brechas monomícticas, de clastos muy angulosos, en ocasiones de grandes dimensiones y escasa matriz arenosa y fangosa. Es frecuente que estén cubiertos parcialmente por mantos de arenas eólicas. Su espesor visible es muy variable y oscila entre 1 y los 5 m. En su conjunto, registra arroyadas en manto que recorrerían toda la superficie de los abanicos, activos sólo en los raros momentos de grandes precipitaciones sobre este sector de la cuenca.

La forma deposicional más relevante en el área de estudio es el fondo de quebrada torrencial, o llanura aluvial en sentido amplio, de Quebrada Paipote (Fig. 1B). Está configurada por una superficie relativamente plana e inclinada suavemente hacia el SO. Presenta una anchura media de ~300 m, si bien experimenta acentuados estrechamientos en los sectores donde se forman los grandes abanicos aluviales, llegando a tener apenas 25 m de ancho en algunos puntos. Se encuentra articulada con estos últimos y recibe las aguas de escorrentía y sedimentos procedentes de las quebradas laterales y abanicos torrenciales que interrumpen las laderas del valle. Esta geoforma permanece inactiva la mayor parte del tiempo, aunque su superficie se encuentra surcada por multitud de pequeños canales secundarios trenzados que configuran una red drenaje compleja y pobremente jerarquizada. Sus depósitos son heterogéneos, formados por arenas medias y gravosas, laminadas o masivas; brechas subangulosas gravosas, polimícticas, con matriz arenosa, que pueden presentar imbricación hacia el SO, base erosiva y gradación normal; brechas masivas, o con tenue gradación inversa, de fábrica clasto-soportada y matriz fangosa; y lutitas arenosas y argilitas masivas, puntualmente acompañadas a techo por delgadas lentes de turba y/o niveles de hojas. Estos depósitos registran la activación y relleno de la quebrada, protagonizadas por flujos tractivos de arroyadas en manto, así como flujos de fangos y flujos de derrubios, tanto en el canal principal como en los canales secundarios y zonas de desborde.

EL EVENTO HIDROMETEOROLÓGICO DE 2015 EN QUEBRADA PAIPOTE

Durante el evento hidrometeorológico extraordinario ocurrido entre el 24 y 26 de marzo de 2015 se registraron precipitaciones superiores a 85 mm en sectores precordilleranos, zonas en las que la precipitación media

anual es de apenas 40 mm y en las que habitualmente nieva (Izquierdo et al., 2020; 2021). La escorrentía alcanzó un caudal punta modelizado de ~124 m^3/s (DOH, 2016), causando la erosión de un gran volumen de sedimento aguas arriba de la zona de estudio (Albertini et al., 2018; Sparelli et al., 2018).

La geoforma que mayores cambios experimentó durante este evento es el fondo de quebrada torrencial, que se activó en prácticamente toda su extensión y sobre la que se depositó un extenso manto aluvional (Fig. 2). Se trata de un depósito de geometría y espesor irregular que afectó a gran parte de las construcciones del poblado de Puquios. Son fangos arenosos y arenas fangosas, en general masivas o con una laminación horizontal muy difusa definida por pequeños cantos y arenas muy gruesas. Su contacto basal es neto e irregular, al igual que su techo, pero no erosivo. Este depósito registra la circulación preferente de flujos de fango a través de zonas deprimidas de la llanura aluvial, dejando multitud de retazos de esta geoforma sin cubrir en puntos más elevados. Los flujos en masa constituyen una continuación lateral de los desbordes que se registran en las zonas de canalización principal que, como consecuencia del gradiente y alta densidad del flujo, transitan como lenguas de sedimento a través de canales secundarios de flujo.

Los flujos de fango representan procesos de moderada a baja energía, con casi ninguna capacidad erosiva, pero capaces de enterrar las estructuras bajo depósitos de sedimentos finos de hasta 1 m de espesor. Esta situación se da preferentemente en aquellas construcciones que todavía conservan varios de sus muros, que actuaron como pantalla y favorecieron el rápido depósito en masa de los fangos. Esta situación ha sido reconocida en la mayor parte de las construcciones del sector norte y central del poblado (Fig. 2). Una característica distinta de este depósito es el desarrollo de grietas de desecación en su superficie, generadas por la retracción de los fangos al desecarse.

La otra geoforma distintiva del evento aluvional de 2015 son los canales principales, que experimentaron una brusca reactivación y que recorren las zonas localizadas al norte y el sur del poblado, cerca de las laderas que delimitan la quebrada. La mayor parte de las construcciones se encuentran en el centro de la llanura aluvial, entre ambas zonas de canalización preferente por las que el flujo circuló con mayor energía y experimentó frecuentes desbordes (Fig. 2).

Las zonas de canalización son eminentemente erosivas, estando definidas por una capa relativamente delgada (10-30 cm) de areniscas fangosas y brechas de matriz fangosa-arenosa, en ocasiones con abundantes gravas y bloques de gran tamaño, masiva o con una estratificación difusa. En varios puntos, estos flujos masivos e hiperconcentrados han generado una importante erosión lateral de los canales, labrando escarpes erosivos de alturas superiores a 1 y 2 m en sus márgenes. En zonas inmediatamente adyacentes se

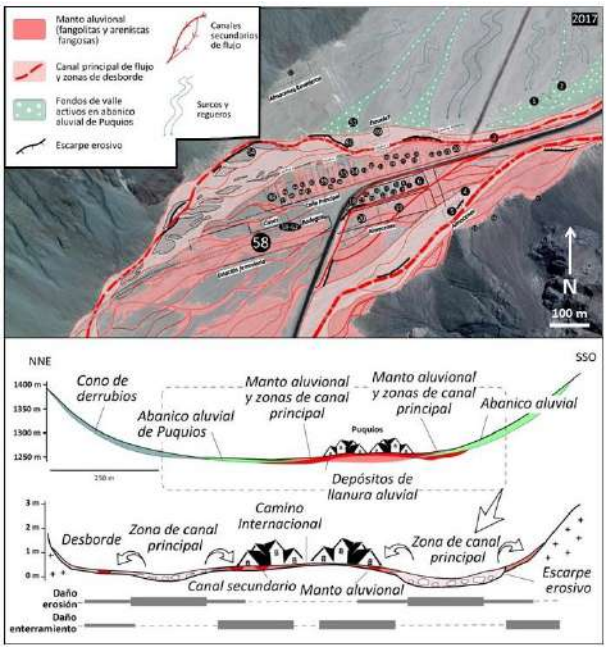


FIGURA 2. *Arriba: Esquema geomorfológico e imagen satelital del entorno de Puquios después del evento de marzo de 2015. Fuente de la imagen:* Google Earth Pro *con fecha de 2017. La numeración está referida a las distintas estructuras localizadas en el poblado. Abajo: Cortes esquemáticos donde se ilustra el cortejo morfo-sedimentario asociado al evento hidrometeorológico de 2015 y los diferentes tipos de daños e intensidad de estos en las ruinas de Puquios.*

depositan fangos arenosos sobre los márgenes del canal, consecuencia del desborde directo de los sedimentos, al exceder el flujo la escasa capacidad de carga del canal. Este proceso ha conducido a enterramiento parcial o total de las ruinas, aunque los daños en las construcciones del poblado de Puquios asociados a este tipo de flujos son, directamente, la destrucción de estructuras en las zonas localizadas cerca del canal. En varias ocasiones, la erosión del canal ha generado el descalzamiento de las estructuras y su desplome posterior.

EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LOS PROCESOS GEOLÓGICOS PELIGROSOS

El análisis integrado del mapa geomorfológico post-evento del 25M de 2015 y las observaciones sobre el terreno de los daños en las estructuras permite llevar a cabo una aproximación de las estructuras y zonas del poblado más expuestas a la acción de procesos geológicos peligrosos. Específicamente, son los flujos de fango el fenómeno con mayor potencial de daño sobre las estructuras de Puquios. Las zonas afectadas por procesos geológicos con alta peligrosidad, indicadas con colores rojos (Fig. 3), son aquellas que experimentan erosión en los márgenes del canal principal y los secundarios de mayor importancia, junto con las zonas de desborde adyacentes. En cualquier caso, se corresponden con una superficie pequeña del poblado que no alcanza el 10%.

Por otro lado, más de 75% de las construcciones están potencialmente afectadas por procesos de peligrosidad media, como el relleno y enterramiento de fangos y fangos arenosos por acción de flujos aluvionales una vez que han abandonado las zonas de canalización preferente. Los daños que originaron estos sedimentos se basan en el

soterramiento de los muros y el relleno de estructuras cerradas. Constituye este proceso, por tanto, el que mayor probabilidad tiene de afectar a las ruinas de Puquios, a pesar de considerarse de menor importancia en comparación con el daño potencial que pueden generar sobre las ruinas los flujos canalizados y sus desbordes.

CONCLUSIONES

El poblado de Puquios constituye un ejemplo característico y emblemático de la actividad minera en la región de Atacama en el siglo XIX. Tanto su historia como sus restos arquitectónicos han quedado en el olvido y se encuentran abandonados, dificultando su utilización como un recurso geoturístico y patrimonial geominero (Abad et al., 2022).

El evento del 25 de marzo de 2015 afectó en su totalidad al pueblo de Puquios, pero los mayores impactos se evidencian en el extremo sur y norte del pueblo en zonas cercanas a los canales principales de la llanura aluvial, donde los flujos erosionaron los cimientos de algunas estructuras, provocando su inestabilidad y posterior derrumbe. El efecto de los flujos de fango derivados de los desbordes en la zona central de la quebrada es de menor entidad, pero afecta a la mayor parte de las ruinas. Aquí, las estructuras enterradas bajo una capa de sedimentos fangosos que tienden a rellenar los espacios disponibles, provocando puntualmente la caída de los muros.

Si no se realizan obras de mitigación, las ruinas de Puquios se encuentran amenazadas por futuros flujos de barro, que terminarán finalmente por hacer desaparecer este vestigio de la actividad minera de finales del siglo XIX bajo el fango, borrando un pedazo de la historia y patrimonio de Atacama.

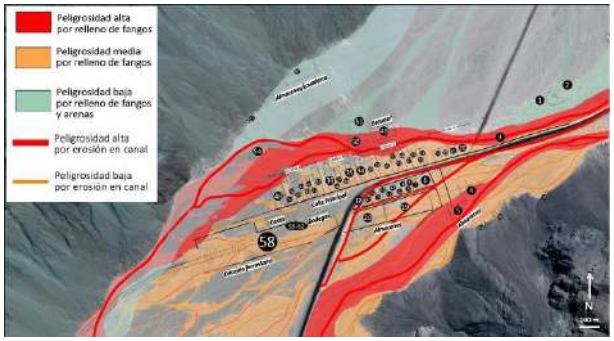


FIGURA 3. *Cartografía de peligrosidad ante procesos aluvionales de las ruinas del poblado minero de Puquios. Las zonas donde coinciden las estructuras y las áreas de peligrosidad alta pueden ser consideradas las de mayor riesgo de degradación del patrimonio.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por ANID Chile a través del proyecto COPIFLOOD (FONDECYT 11160405) y la Universidad Rey Juan Carlos a través del proyecto VARHIDRO (M2994) de la convocatoria IMPULSO.

REFERENCIAS

Abad, M., Moisan, P. y Izquierdo, T. (2022): *Lugares de Interés Geológico del Valle del Copiapó. Geopatrimonio, Geodiversidad y Geoturismo*. Letra Capital Ediciones. Santiago de Chile, 84 p.

Abraham, E.M., Rodríguez, M.D., Rubio, M.C., Guida-Johnson, B., Gómez, l. y Rubio, C. (2020): Disentangling the concept of "South American Arid Diagonal". *Journal of Arid Environments*, 175: 104089.

Albertini, L., Sparelli, I., Izquierdo, T., Abad, M., Mozzi, P. y Fontana, A. (2018): Flash-flood in the Atacama Desert, a recurring phenomenon through the centuries? *En: EX-AQUA*

Cañizares, M.C. (2020): Visibilidad y promoción del patrimonio minero en algunos geoparques españoles. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 66(1): 109-131.

DOH (2016): *Caracterización y levantamiento de información debido a las crecidas aluvionales en la cuenca del rio Copiapó - Región de Atacama, para el temporal del 25 y 26 de marzo de 2015*. Dirección Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Chile

Compañía de Ferro Carril de Copiapó (1882): *Informe de las operaciones del año 1881 y memoria de los 30 años 1852-1881*, 42-43

Izquierdo, T., Bonnail, E., Abad, M., Dias, M.I., Prudêncio, M.I., Marques, R., Rodríguez-Vidal, J. y Ruiz, F. (2020): Pollution and potential risk assessment of flood sediments in the urban area of the mining Copiapó basin (Atacama Desert). *Journal of South American Earth Sciences*, 103: 102714.

Izquierdo, T., Abad, M., Gómez, Y., Gallardo, D. y Rodríguez-Vidal, J. (2021): The March 2015 catastrophic flood event and its impacts in the city of Copiapó (southern Atacama Desert). An integrated analysis to mitigate future mudflow derived damages. *Journal of South American Earth Sciences*, 105: 102975

Izquierdo, T., Rivera, A., Galeano, A., Gallardo, D., Salas, V., Aparicio, O., Buylaert, J.P. y Ruiz, F. (2024): Historical catastrophic floods at the southern edge of the Atacama Desert: A multi-archive reconstruction of the Copiapó river extreme events. *Global and Planetary Change*, 104411

Oficina Central de Estadística (1885): *Sesto Censo Jeneral de la Población de Chile. Toma I.* Imprenta de La Patria, 905 p.

Sparelli, I., Albertini, L., Izquierdo, T., Abad, M., Mozzi, P. y Fontana, A. (2018): Geomorphological analysis of recent flash-flood events in the Atacama Desert using high-resolution UAV images. En: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 20: 9225.

El riesgo de tsunamis en España, una aproximación pseudo-probabilista de impacto directo en el seguro consorciado.

Tsunami risk in Spain: a pseudo-probabilistic approach of direct impact to the insured consortium.

M. Llorente Isidro[1], J. Macías[2], A. González[2], C. Paredes[3], M. Fernández-Hernández[3] y J. García-Mayordomo[1]

1 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CN-IGME, CSIC) Calle Ríos Rosas 23, 28003 Madrid (España) m.llorente@igme.es, julian.garcia@igme.es
2 Departamento de Análisis Matemático, Estadística e Investigación Operativa y Matemática Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29010 Málaga (España); jmacias@uma.es; alexgp@uma.es
3 Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid, Calle Alenza 4, 28003, Madrid (España) carlos.paredes@upm.es; marta.fernandezh@upm.es

Palabras clave: peligros geológicos, inundaciones, terremotos, tsunami.

Resumen

Esta investigación evalúa el impacto económico directo más probable sobre bienes asegurados en España para una probabilidad de excedencia anual de tsunami del 0,5%. Se han llevado a cabo más de 6 millones de simulaciones de inundaciones por tsunami con una resolución de 5 m/pixel (González et al 2022) empleando medios de computación de muy alto rendimiento. Las fuentes tsunamigénicas se han tomado de la QAFI v. 4.0 (IGME, 2022) y considerando la base de datos del IGN (2023). Se ha comprobado que el "peor escenario" está relacionado con la distribución de los elementos asegurados en relación con las fuentes tsunamigénicas, más que con la magnitud del tsunami. La probabilidad de un tsunami de alto impacto no sólo puede esperarse en la costa atlántica, sino también en el Mediterráneo, donde se pueden registrar importantes daños incluso en caso de tsunamis relativamente pequeños. Los daños directos a los bienes asegurados se han estimado en menos de 2,2 x 10^9 € con una frecuencia del 95%. Esta cifra es un enfoque de mínimos, ya que no se han considerado efectos en cadena y otras consecuencias co-sísmicas.

Abstract

Our research evaluates the most-likely direct insured economic impact in Spain for a 0.5% yearly exceedance probability of tsunami occurrence. Over 6 million of tsunami flood simulations have been carried out at 5m/pixel resolution (Gonzalez et al. 2022) in High Performance Computing. Tsunamigenic sources have proposed from QAFI v. 4.0 (IGME, 2022) and considering the tsunami event database of IGN (2023). We found that the "worst case scenario" is closely linked to the distribution of insured items in relation to the tsunami sources, rather than to the magnitude of the tsunami. The likelihood of a high impact tsunami may not only be expected in the Atlantic coast, as previously thought; the Mediterranean may suffer significant property damage even with relatively small tsunami events. Direct insured property damage has been estimated to be less than 2.2 x10^9 € with a 95% frequency. This figure is a minimums approach, provided chained effects and other co-seismic outcomes have not been considered.

Referencias

González, A. et al. (2022). *Pseudo-Probabilistic Design for High-Resolution Tsunami Simulations in the Southwestern Spanish Coast*. GeoHazards, 3, 294–322. https://doi.org/10.3390/geohazards3020016.

Instituto Geográfico Nacional (2023): Catálogo de tsunamis. https://doi.org/10.7419/162.04.2023.

Instituto Geológico y Minero de España - IGME (2022). QAFI: Quaternary Active Faults Database of Iberia. Disponible en: https://info.igme.es/QAFI (acceso febrero 2024).

Resultado preliminar sobre la presencia de fluidos profundos en el sondeo Torr-1, asociados a una zona de falla activa. Falla de Alhama de Murcia (FAM)

Preliminary results of deep fluids in Torr-1 well, associated with an active fault zone. Alhama de Murcia Fault (AMF).

J. López-Gutiérrez[1], JF. Mediato Arribas[1], JF. Fernández-Naranjo[1], P. Fernández-Canteli[1] y R. Pérez-López[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. España. j.lopezgu@igme.es; jf.mediato@igme.es; fj.fernandez@igme.es; paula.canteli@igme.es; r.perez@igme.es

Palabras clave: falla activa, sondeo, fluidos profundos, geotermómetros, Murcia**.**

Resumen

En 2020 se perforó el sondeo Torr-1 de 72 m de profundidad en la falla de Alhama de Murcia (FAM), en el municipio de Lorca, con el fin inicial de detectar ^{222}Rn en la zona no saturada. El sondeo atravesó las filitas Alpujárrides de baja permeabilidad sin atravesar ningún nivel freático, salvo una zona de humedad entre los metros 41 y 48. En 2022, sin embargo, el sondeo mostró un nivel piezométrico a 21 m de profundidad. Los datos de campo, así como el análisis de la muestra obtenida, muestran la presencia de aguas salinas (CE 9.810 µS/cm; pH 6,6; Tª 22 ºC; Eh -39,2 mV), lo que indica condiciones reductoras y ácidas. La alta concentración de NH_4^+ (9,8 mg/L) sin aportes posibles de N antrópico, y las altas concentraciones en B (1,9 mg/L), SiO_2 (14,4 mg/L) y F^- (1,4 mg/L) son compatibles con un origen reductor, ácido y profundo del agua. La aplicación de los geotermómetros de la hoja de cálculo del IGME INAQUAS (Moreno Merino *et al.*, 2016), basados en la ecuación de Van´t Hoff, a la muestra de agua, indican temperaturas de equilibrio entre 121 y 245 ºC. A falta de corroborar la estabilidad de estos datos mediante nuevos muestreos, se considera que en el sondeo Torr-1 se pueden monitorizar parámetros químicos de los fluidos originados en la FAM, sin influencias antrópicas por bombeos ni aportes de ningún tipo de sustancia ajena al sistema natural. Investigación financiada por el Proyecto MICIN PID2020-113407RBI00.

Abstract

The well Torr-1 (72 m deep) was drilled in 2020 over the Alhama de Murcia Fault zone (AMF), with the aim of measure the ^{222}Rn concentration in the vadose zone. Just impervious phyllites were crossed and no water level was detected except some humidity between 41 and 48 m depth. However, in 2022, a piezometric level of 21 m depth was measured. The analysis of the collected sample and the field parameters (T 22 ºC; pH 6.6; Eh -39.2 mV; EC 9,810 µS/cm) indicate the presence of reducing and highly saline waters. The presence of ammonium (9.8 mg/L) with no anthropic N sources, and the high concentrations of B (1.9 mg/L), SiO_2 (14.4 mg/L) and F^- (1.4 mg/L), are compatible with reducing, acid and deep conditions.

The use of geothermometers through the IGME INAQUAS spreadsheet (Moreno Merino *et al*., 2016), based on Van´t Hoff´s equation, show equilibrium temperatures ranging between 121 and 245 ºC. In the absence of upcoming additional data to determine the stability of those original parameters, the well Torr-1 may be considered a perfect monitoring point due to the lack of anthropic chemical nor pumping influences on the sampled water. *Research funded by the MICIN Project PID2020-113407RBI00.*

Referencias

Moreno Merino, L., De la Losa Román, A., Romero Prados, A, y Carro Martín, S. (2016). *Interpretación de análisis químicos de aguas subterráneas mediante la hoja INAQUAS*. Instituto Geológico y Minero de España. 82 p. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Hidrogeología y Aguas Subterráneas; 34. ISBN 978-84-9138-019-1

Acumulación de metales en niveles superficiales de suelo a partir de residuos de tostación de piritas (La Almozara, Zaragoza)

Topsoil accumulation of metals from pyrite roasting wastes (La Almozara, Zaragoza)

P.L. López Julián[1], Ó. Pueyo Anchuela[1], J. Martín-García[1], C. Revuelto Gimeno[1], J. Gracia Abadía[1], J. Ramajo Cordero[1], G. Jiménez[1], J. Sánchez[1], E. Mihi[1]

1 Asociación de Vecinos Ebro de La Almozara (Zaragoza). C/ Pedro I de Aragón, 13. 50003. Zaragoza. pllopez@unizar.es, opueyo@unizar.es, araujo@unizar.es, crevuelto@geoscan.es; Javier.gracia@control7.es, j.ramajo@igme.es; asociacionebro@gmail.com, j.s.1980@hotmail.com, emihite@hotmail.com

Palabras clave: Residuos de tostación de piritas, metales pesados, movilidad, contaminación urbana

Resumen

En el subsuelo del barrio de La Almozara (Zaragoza) existen niveles de residuos sólidos de tostación de piritas, con contenidos en elementos metálicos claramente superiores a los niveles genéricos de referencia (Pueyo Anchuela *et al.*, 2018). En una zona donde están cubiertos por una capa de 20 cm de zahorra se han recogido y analizado cinco muestras sólidas a intervalos de 5 cm, y los resultados analíticos indican un incremento progresivo en la concentración de Cu (x16), Cd (x11), Zn (x7), Be (x6), Mn (x6), Cr (x5), Ni (x3) y Co (x2) desde el nivel de residuos hasta la superficie, indicándose en paréntesis el enriquecimiento superficial respecto del existente en el residuo. En episodios de lluvia el agua infiltrada a través de la capa superficial de zahorra interactúa con la capa de residuos prácticamente impermeable (Jiménez Beltrán *et al.*, 2023), liberando metales que se movilizan hacia la superficie por bombeo capilar. Estas condiciones fisicoquímicas provocan la precipitación en los materiales suprayacentes de compuestos con alto contenido en metales. Esto implica que hay niveles de suelo no asociados a la actividad industrial con elevado contenido en metales, y que, debido a su movilidad en condiciones vadosas, los hace susceptibles de ser considerados como residuos peligrosos.

Abstract

Pyrite roasting wastes contain metallic elements clearly above the generic reference values at the subsoil of La Almozara neighbourhood (Zaragoza, Spain; Pueyo Anchuela *et al.*, 2018). A series of soil samples were collected at different depths (every 5 cm) in a sector where the waste was covered by a thin layer of granular infilling material. Chemical analyses show a progressive upwards increase in Cu (x16), Cd (x11), Zn (x7), Be (x6), Mn (x6), Cr (x5), Ni (x3), and Co (x2); values in brackets represents the metal enrichment respect to the waste materials. This chemical mobilization can happen during rain events due to infiltration, solution, later capillary pumping and precipitation due to the practically impermeable characteristics of the waste materials (Jiménez Beltrán *et al.*, 2023). These data support the enrichment, affection and inherent contamination of soil levels due to the metal mobilization and the inherent definition of susceptible hazardous materials non related to the industrial activity.

Referencias

Jiménez Beltrán, J., Marazuela, M.A., Baquedano, C., Martínez-León, J., Sanchez Navarro, J.A., Cruz-Pérez, N, Santamarta, J.C., García-Gil, A. (2023). *Science of the Total Environment*, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165293

Pueyo Anchuela, O., Revuelto, C., Ramajo, J., Bartolomé, J.I., Arce, M., López, P.L., Gracia, J., Blecua, A., Moncayola, J.A., Pocoví, A., Mihi, E., Sánchez, J., Franco, M., Blas, A., Gil, H. y Jiménez, G. (2018). *Viviendo en… La Almozara – Contexto geológico y ambiental*. D.L.: Z 1810.2018. 16 p.

Hidroquímica de las aguas subterráneas en el barrio de La Almozara (Zaragoza)

Groundwater hydrochemistry in La Almozara neighbourhood (Zaragoza)

P.L. López Julián[1], Ó. Pueyo Anchuela[1], J. Martín-García[1], C. Revuelto Gimeno[1], J. Gracia Abadía[1], J. Ramajo Cordero[1], G. Jiménez[1], J. Sánchez[1] y E. Mihi[1]

1 Asociación de Vecinos Ebro de La Almozara (Zaragoza). C/ Pedro I de Aragón, 13. 50003. Zaragoza. pllopez@unizar.es; opueyo@unizar.es; araujo@unizar.es; crevuelto@geoscan.es; Javier.gracia@control7.es; j.ramajo@igme.es; asociacionebro@gmail.com; j.s.1980@hotmail.com; emihite@hotmail.com

Palabras clave: Aguas ácidas, residuos de tostación de piritas, metales, contaminación urbana

Resumen

En el subsuelo del barrio de La Almozara (Zaragoza) existen niveles de aguas subterráneas con pH ácido (pH<3) que contienen una concentración elevada de metales en disolución. La Confederación Hidrográfica del Ebro instaló para su vigilancia una red de puntos de control de calidad del agua subterránea (CHE, 2010), y en el presente trabajo se analizan muestras de aguas de varios de estos puntos de control. El origen de los contenidos metálicos se relaciona con la herencia industrial y los residuos sólidos de tostación de piritas que persisten en el subsuelo. Los resultados hidroquímicos permiten identificar la existencia de tres tipos químicos de aguas subterráneas: 1) aguas del acuífero aluvial del Ebro, con pH neutro, conductividad eléctrica (CE) hasta 1700 µS/cm y contenidos prácticamente nulos en elementos metálicos; 2) aguas ácidas (pH<3) en contacto directo con los residuos, con CE>8000 µS/cm y contenidos en metales disueltos que llegan a alcanzar hasta varios g/l, como en el caso de Cu y Zn; 3) aguas con pH neutro pero con CE>2500 µS/cm y metales disueltos en niveles de ppb (Zn, As, Ni, Sb, Mo, Mn, Ni, Tl). Estos resultados indican que el contenido de metales no puede sólo establecerse a partir de la reactividad del agua (pH) y que el contenido en metales de las aguas ácidas termina interaccionando con las aguas del acuífero aluvial del Ebro. Esto da lugar a un incremento claro en el contenido en elementos metálicos y que implicaría la ampliación de las aguas a considerar como potencialmente peligrosas.

Abstract

In La Almozara neighbourhood (Zaragoza) groundwater water levels with acid pH and high dissolved metal contents exit. They are associated with the interaction with industrial and solid wastes from pyrite roasting. The water administrative authority has carried out a groundwater quality sampling network for their survey (CHE, 2010). In this work samples from several of these control points have been analysed. Results show the presence of three different chemical groundwater types: 1) groundwater from the Ebro alluvial aquifer, with neutral pH, electrical conductivity (EC) over 1700 µS/cm, and practically total absence of metallic dissolved elements; 2) acid groundwater (pH<3) that have been in direct contact with wastes, EC >8000 µS/cm, and containing dissolved metals up to several g/l (i.e. Cu and Zn); and 3) groundwater with neutral pH but with EC>2500 µS/cm and several dissolved metals at ppb levels (Zn, As, Ni, Sb, Mo, Mn, Ni, Tl). These results suggest the presence of interaction between acid waters and the Ebro alluvial aquifer, giving rise to neutral pH groundwater but with a significant content of dissolved metals which should require that the surveillance cannot be only restricted to the analysis of acid waters.

Referencias

CHE (2010). *Estudios complementarios para caracterizar varios casos de contaminación puntual de aguas subterráneas en la Cuenca del Ebro. Caracterización hidrogeológica del barrio de La Almozara (Zaragoza)*. Confederación Hidrográfica del Ebro. 105 p. https://www.chebro.es/documents/20121/59432/CALSUBTER_2010_ALMOZARA_ZGZ.pdf/12db592c-cfb0-f10d-a4b0-24bce8201835?t=1618565939412

Reclutamiento y transporte de material leñoso en una avenida súbita severa en el SW de la Comunidad de Madrid en septiembre de 2023

Large wood recruitment and transport during a severe flash flood in Central Spain, September 2023.

A. Lucía[1], K.P. Sandoval-Rincón[1,2], D. Vázquez-Tarrío[1], J. Garrote[2], M. Hernández-Ruiz[1], M.A. Perucha [1], A. Romero-Prados[1] y A. Díez-Herrero[1]

1 Departamento de Riesgos Geológicos y Cambio Climático y Área de Programación. C.N. Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). a.lucia@igme.es; kp.sandoval@igme.es; d.vazqueztarrio@igme.es; m.hernandez@igme.es; a.romero@igme.es; andres.diez@igme.es
2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid (UCM). juliog@ucm.es

Palabras clave: material leñoso, geomorfología fluvial, riesgo de inundación, estudios forenses.

Resumen

En el actual escenario de cambio climático y global, con un posible aumento de eventos de precipitaciones intensas e inundaciones extremas, este estudio aborda la frecuentemente ignorada, pero crucial en términos de peligrosidad y riesgo, presencia de material leñoso en sistemas fluviales.

El área de estudio es el río Alberche y su afluente, el río Perales, en la cuenca hidrográfica del río Tajo, en el centro de la Península Ibérica. Estos ríos se vieron afectados por la DANA de principios de septiembre de 2023, que produjo fuertes precipitaciones (hasta 200 l/m^2) e inundaciones súbitas. Este evento anegó zonas urbanas, dañó o destruyó cuatro puentes y causó dos muertes en estos ríos. Uno de los puentes dañados había retenido un importante depósito de material leñoso. Tras la inundación, como es habitual, surgieron voces críticas entre la población afectada, que pedían la retirada del material leñoso de los cauces fluviales con carácter preventivo. No obstante, persisten incertidumbres sobre la dinámica y las cantidades de material leñoso en los ríos españoles, requisito previo para una comprensión y gestión adecuada de la madera almacenada y circulante en los sistemas fluviales.

Presentamos la investigación de la dinámica del transporte de material leñoso en este evento extremo mediante un estudio forense del mismo. Además, pretendemos comprender la dinámica de la vegetación del lecho fluvial durante los periodos entre avenidas súbitas e inundaciones. Los conocimientos generados contribuirán a una mejora de las evaluaciones del riesgo de inundación y a la implementación de estrategias de mitigación preventiva eficaces.

Abstract

In the current scenario of climate and global change, and with the possible increase in extreme rainfall and flooding events, this study addresses the overlooked, but crucial in terms of hazard and risk, presence of woody material in river systems.

The study area is the Alberche River and its tributary, the Perales River, in the Tagus Basin, Central Iberian Peninsula. These rivers were affected by an exceptional cut-off low weather situation in early September 2023 which produced heavy rainfall (up to 200 l/m^2), high peak discharges and flash floods. This event flooded urban areas, damaged or destroyed four bridges and caused two deaths in these rivers. One of the damaged bridges had retained a significant deposit of wood. Following the flooding, as usual, critical voices were raised among the affected population, calling for the preventive removal of woody material from riverbeds. However, uncertainties persist about the dynamics and quantities of woody material stored and circulating in Spanish rivers, a prerequisite for an understanding and management of the wood regime in river systems.

We present the investigation of the dynamics of woody material transport in this extreme event through a forensic study. In addition, we aim to understand the dynamics of riverbed vegetation during the periods between flash floods and floods. The knowledge generated will contribute to improved flood risk assessments and the implementation of effective preventive mitigation strategies.

El papel del material leñoso en los Planes de Gestión de Riesgo de Inundación en España

The role of large wood in Flood Risk Management Plans in Spain

A. Lucía[1], K.P. Sandoval-Rincón[1,2], D. Vázquez-Tarrío[1], J. Garrote[2], M.A. Perucha [1], M. Hernández-Ruiz[1], A. Romero-Prados[1], S. Cervel de Arcos[1] y A. Díez-Herrero[1]

1 Departamento de Riesgos Geológicos y Cambio Climático, Área de Sistemas de Información Geológica y Área de Programación. C.N. Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). a.lucia@igme.es ; kp.sandoval@igme.es ; d.vazqueztarrio@igme.es; m.hernandez@igme.es ; a.romero@igme.es ; s.cervel@igme.es ; andres.diez@igme.es
2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid (UCM). juliog@ucm.es

Palabras clave: material leñoso, geomorfología fluvial, riesgo de inundación.

Resumen

Como desarrollo de la directiva europea de gestión de los riesgos por inundaciones (2007/60/CE), la administración pública española prevé la futura inclusión de Planes de Gestión de Sedimentos dentro de los Planes de Gestión de Riesgo de Inundación (PGRI). El objetivo de los mismos será ayudar a preservar o restaurar la morfodinámica fluvial, los procesos de erosión y sedimentación y adoptar medidas de restauración de la continuidad sedimentaria. Uno de los primeros pasos en la elaboración de estos planes ha sido iniciar la cartografía de los tramos fluviales españoles, en términos de su estado morfosedimentario (trayectorias históricas de erosión o agradación).

Para estos Planes de Gestión de Sedimentos se ha considerado inicialmente el sedimento inorgánico (fase mineral) en exclusiva. Sin embargo, el material leñoso ha emergido como un elemento clave en los sistemas fluviales con la capacidad de controlar los patrones sedimentarios y morfológicos, proporcionar hábitats únicos, regular los flujos de carbono, y modificar el peligro de inundaciones por la obstrucción de secciones transversales reducidas del cauce.

Tras analizar el estado del arte de los estudios sobre material leñoso en los ríos españoles, proponemos la inclusión de Planes de Gestión de Material Leñoso junto a los Planes de Gestión de Sedimentos. Estos planes deberían incluir la evaluación del estado de la madera en los ríos de forma simultánea y complementaria a los mapas de estado morfosedimentario. Establecemos algunos principios para elaborar una guía que, siguiendo un enfoque por pasos y gradual, pueda ser aplicada por los profesionales en el análisis, cartografía y gestión del material leñoso en los cauces.

Abstract

As a development of the European Flood Directive (2007/60/CE), the Spanish public administration foresees the future inclusion of Sediment Management Plans within the Flood Risk Management Plan. The aim of these plans will be to help preserve or restore the fluvial morphodynamics, erosive and sedimentation processes and to adopt measures to restore sediment continuity. One of the first steps has been to initiate the mapping of Spanish river sections, in terms of their morphosedimentary state (historical erosion or aggradation trajectories).

For these Sediment Management Plans, inorganic sediment (mineral phase) has been exclusively considered, however, large wood (LW) has emerged as a key element in river systems with the capacity to control sediment and morphological patterns, provide unique habitats, regulate carbon fluxes, and modify flood hazard by clogging narrow section.

After analyzing the state of the art of studies of LW in Spanish rivers, we propose the inclusion of Large Wood Management Plans alongside Sediment Management Plans. These plans shall include the assessment of the state of the large wood in the rivers in simultaneous and complementary steps to the maps of the morphosedimentary state. We set some principles to elaborate a guideline that, following a stepwise approach, could be applied by practitioners in the analysis, mapping and management of large wood in rivers.

Nueva caracterización del *debris avalanche* de Tenteniguada (Gran Canaria, España) a partir del análisis sedimentológico y estructural: mecanismos de propagación y emplazamiento.

New characterisation of the Tenteniguada debris avalanche, (Gran Canaria, Spain) from sedimentological and structural analysis: propagation and emplacement mechanisms.

S. Makris[1,2], M. Roverato[3], A. Lomoschitz[4], P. Cole[1], I. Manzella[1,5]

1 School of Geography, Earth and Environmental Science, University of Plymouth, Plymouth, UK, paul.cole@plymouth.ac.uk
2 British Geological Survey (BGS), The Lyell Centre, Edinburgh, UK. smakr@bgs.ac.uk
3 Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, Italia. matteo.roverato@unibo.it
4 Instituto de Oceanografía y Cambio Global, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain. alejandro.lomoschitz@ulpgc.es
5 Department of Applied Earth Sciences, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, Enschede, The Netherlands. i.manzella@utwente.nl

Resumen: En las islas Canarias existen diversos ejemplos de depósitos de *debris avalanche* y *rock avalanche*, en contextos tanto submarinos como subaéreos. Entre ellos, destaca el *debris avalanche* volcánico (VDA) de Tenteniguada, situado al Este de la isla de Gran Canaria, con afloramientos bien expuestos y una amplia gama de estructuras internas, que invitan a la realización de un análisis sedimentológico de detalle. Los estudios previos enfatizaron la gran continuidad y complejidad de este depósito, de 7,1 km de largo y edad Pleistocena (ca. 276 ka). Un estudio reciente subraya la importancia de abundantes evidencias de campo en orden a proponer un modelo coherente de mecanismos de propagación y emplazamiento para el VDA de Tenteniguada y, tal vez, para otros depósitos similares.

Palabras clave: debris avalanche volcánico, análisis sedimentológico, facies ricas en matriz, facies de bloques, islas Canarias.

Abstract: *The Canary Islands provide a variety of debris and rock avalanche deposits, in both submarine and inland contexts. Among them, the Tenteniguada volcanic debris avalanche (VDA), located on the east of Gran Canaria, stands out due to their well-exposed ~~its good exposured~~ outcrops and the presence of a variety of internal structures. Previous studies highlight the continuity and complexity of this 7.1 km long deposit and its Pleistocene age (ca. 276 ka). A recent study underlines the importance of field evidence in order to suggest a coherent model of propagation and emplacement mechanisms for the Tenteniguada VDA, and potentially others.*

Key words: *volcanic debris avalanche, sedimentological analysis, rich-matrix facies, block facies, Canary Islands.*

INTRODUCCIÓN

Los *debris avalanches* volcánicos (VDA, *volcanic debris avalanche*) son extensos deslizamientos caracterizados por largos desplazamientos y alta movilidad de transporte, que presentan alto riesgo para las poblaciones próximas a volcanes.

Los VDA son generados por el colapso de un flanco de un edificio volcánico. Aunque la mayoría de los VDAs se producen en volcanes activos, no son necesariamente desencadenados por la actividad volcánica, y pueden ser también iniciados por actividad sísmica o la desestabilización de un talud, causados por precipitaciones, aflojamiento o alteración hidrotermal de laderas compuestas por material volcánico. Son un suceso común en la historia de la mayoría de los volcanes (Siebert and Roverato, 2021). Los depósitos de VDA movilizan volúmenes de hasta decenas de km^3, y a menudo menos de cientos de km^3.

El desplazamiento de los VDA es superior al predicho por modelos friccionales simples de un bloque sólido (Legros, 2002). El coeficiente de fricción, medido por la relación H/L, entre la altura de caída (H) y el desplazamiento en la dirección de avance del movimiento (L) ha sido empleada como medida de la movilidad de VDAs (volcanic debris avalanches) y RAS (rock avalanches), proceso equivalente en contextos no volcánicos.

Aunque los modelos friccionales simples podrían predecir valores de H/L de ~0.5-0.6, los VDAs alcanzan típicamente valores de 0.1-0.2 (Legros, 2002; Dufresne et al., 2021). Aunque se han propuesto varias teorías para explicar los mecanismos que permiten estas ratios de desplazamiento, el asunto sigue siendo controvertido y está sin resolver.

La dificultad de los modelos y conceptos teóricos para abarcar las observaciones de campo, de la sedimentología y estructura de los depósitos, es un

factor principal de la falta de explicaciones. Los VDAs muestran un conjunto de características típicas, tales como clastos fracturados en rompecabezas (*jigsaw-fractured clasts*), facies de bloques y facies ricas en matriz (*block and matrix-rich facies*), estratigrafía remanente, heterogeneidad textural y sedimentológica y superficies onduladas (hummocky surfaces) (Siebert, 1984; Glicken, 1991; Makris et al., 2020; Dufresne et al. 2021).

EL *DEBRIS AVALANCHE* DE TENTENIGUADA

Inicialmente, el depósito de *debris avalanche* de Tenteniguada fue brevemente descrito y cartografiado por los autores del Mapa Geológico 1:25.000 (Bancels et al., 1990). Fue incluido en el grupo de los "depósitos de deslizamientos gravitacionales", presentes en diversas zonas de Gran Canaria, por ejemplo, en la cuenca superior del barranco de Tirajana y del Barranco de Fataga (Lomoschitz et al., 2002).

No obstante, los mayores depósitos de debris avalanche de Gran Canaria corresponden a las "facies deslizadas" del volcán Roque Nublo, pertenecientes al Plioceno, cuyos materiales se extienden desde el centro de la isla hacia el sector S-SE y se adentran en el mar. (Fig. 1).

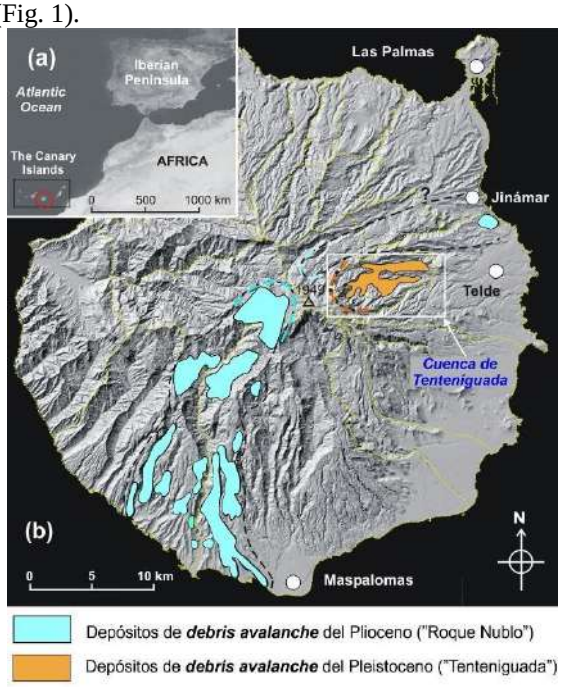


FIGURA 1. *Principales depósitos de debris avalanche en la isla de Gran Canaria (Lomoschitz et al., 2008).*

Posteriormente, se determinó que los materiales previamente cartografiados, aflorantes en las paredes del barranco de San Miguel, eran un depósito de *debris avalanche*, que se produjo en el Pleistoceno medio, con una edad ca. 276 ka y que alcanzan unos 7,1 km de longitud (Lomoschitz et al., 2008) (Fig. 2).

Por último, el depósito es estudiado a partir de un análisis sedimentológico y estructural de las masas deslizadas (Makris et al., 2023). Dicho estudio ha permitido determinar que se trata de un *debris avalanche* volcánico (VDA) y establecer un nuevo modelo conceptual para el transporte y emplazamiento de este *debris avalanche*. Potencialmente, podría servir de ejemplo para el estudio de otros depósitos similares.

CONCLUSIONES

El *debris avalanche* de Tenteniguada tiene una extensión de 7,1 km y debió producirse por un evento único de edad ca. 276 ka, en el Pleistoceno medio (Lomoschitz et al., 2010).

Las conclusiones principales de Makris et al. (2023) indican que la distribución de facies y el análisis estructural ha llevado al siguiente modelo para la propagación y emplazamiento del VDA de Tenteniguada:

1. La porción colapsada del edificio volcánico, fuente del deslizamiento, no sufrió un alto grado de alteración o debilitamiento previo que predispusiera la masa a la fracturación. Por tanto, en el colapso inicial y en la fase de deslizamiento, la evolución de las fracturas y la disgregación grosera de la masa fueron iniciadas, pero una porción principal de bloques no desagregados quedo preservada. (Fig. 3a).

2. En la propagación subsecuente, la extensión y esparcimiento de la masa deslizada se acomodaron según fallas normales, activadas a partir de las fracturas preexistentes (Fig. 3b). Esto produjo el cizallamiento en las zonas de falla y el basculamiento hacia atrás de los bloques.

3. La extensión y descenso de la masa progresó, con la desagregación de bloques y la inyección de matriz en las fracturas entre los bloques. En la facies rica en matriz, no hubo turbulencia o cizallamiento, y la mezcla se limitó a una homogeneización generada por la agitación debida a la temperatura granular.

4. En las zonas profundas del depósito, las fallas confluyen. Hubo un mayor grado de cizallamiento y agitación. La desagregación y la generación de matriz intrabloques fueron mayores, eliminando la fracturación en rompecabezas e imponiendo una fábrica heterométrica (*diamicton fabric*) a las facies de bloques (Fig. 4). También hubo pequeñas porciones del substrato incorporadas al depósito.

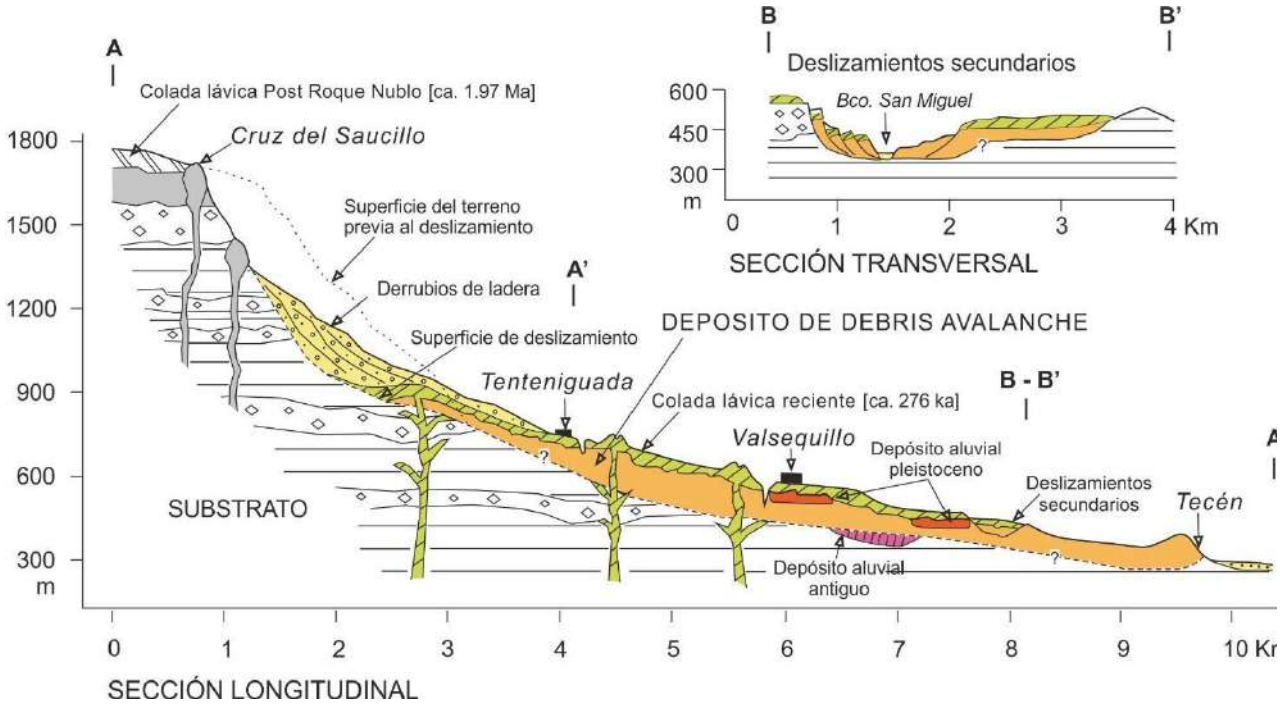


FIGURA 2. *Sección longitudinal W-E del debris avalanche de Tenteniguada, Gran Canaria. La sección transversal (B-B') muestra los deslizamientos rotacionales (tipo slump) que afectan a la parte distal del depósito (Lomoschitz et al., 2008).*

5. La parte más distal del VDA de Tenteniguada muestra una mayor disgregación y una mezcla gradual debido a la agitación. Esto es debido a las mayores tensiones acumuladas en el frente durante un tiempo más prolongado, causado por la transferencia de momentos desde la parte trasera y al mayor desplazamiento.

6. La escasa disgregación de la masa movida, la amplia presencia de facies de bloques y la escasa mezcla entre bloques sugiere que el VDA de Tenteniguada no llegó a convertirse completamente en un flujo. Un comportamiento de tipo quebradizo fue el dominante. El depósito resultante está compuesto por una densa red de bloques.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la *Geological Society of London* la financiación recibida por Symeon Macris para los trabajos de campo a través de una beca de investigación, siendo acogido por la *School of Geography, Earth and Environmental Sciences* de la Universidad de Plymouth.

El estudio ha sido realizado principalmente por el primer autor en el contexto de su Tesis Doctoral, bajo la supervisión de Irene Manzella, Matteo Roverato y Paul Cole. Mientras que Alejandro Lomoschitz ha proporcionado el contexto geológico y facilitado la puesta en marcha de los trabajos de campo en la zona de estudio.

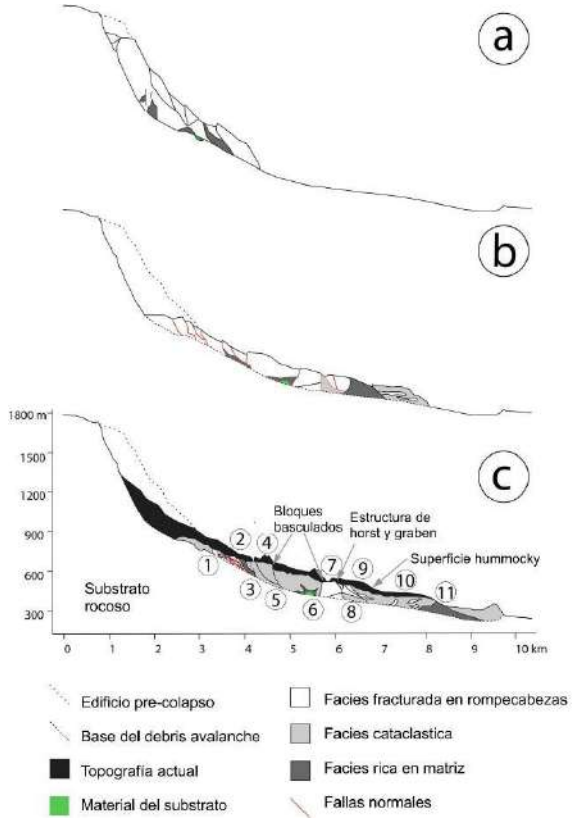


FIGURA 3. *Representación esquemática de la progradación y emplazamiento del debris avalanche de Tenteniguada. (a) La etapa inicial de colapso y fracturación gruesa del material. (b) Etapa de progradación, donde las fracturas son activadas como fallas normales para acomodar la expansión de la masa. (c) El depósito final con las características que han sido observadas en el campo. Los números en círculos representan las zonas estudiadas (Makris et al., 2023).*

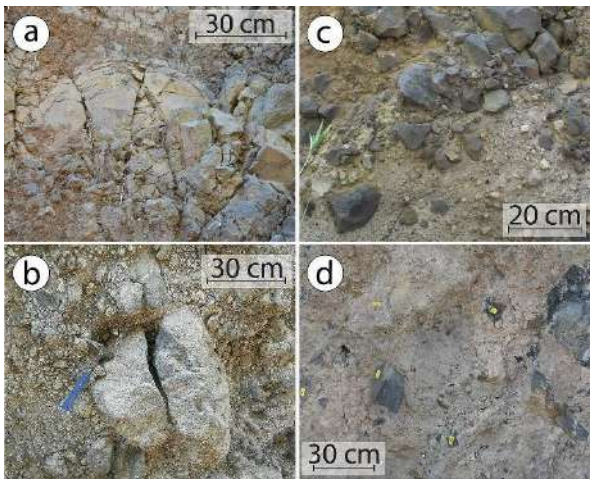


FIGURA 4. *Desagregación progresiva del material de un clasto con fragmentación en rompecabezas (jigsaw-fractured) a matriz interbloque / intrabloque. (a) clasto "jigsaw-fractured" con fragmentos, preservando su posición original. (b) La ampliación del espacio entre los componentes clásticos han aportado espacio para la intrusión de las partículas finas en la matriz. (c) los componentes del clasto original se han difuminado y el contorno original del clasto ha sido eliminado. La incompleta mezcla es evidente, por la concentración de clastos de idéntica litología en una matriz más heterolítica. (d) Grupo de clastos y matriz completamente mezclados, pobremente seleccionados, donde los clastos han sido incorporados dentro y mezclados con la matriz, y ninguna fracturación en rompecabezas ha sido preservada (Makris et al., 2023).*

REFERENCIAS

Bancels., R. y Barrera, J.L. (1992). *Mapa geológico de España 1:25.000, hojas nº 1.109-II (Telde) y 1.109-III (San Bartolomé de Tirajana) y memorias*. IGME, Madrid.

Dufresne, A., Zernack, A., Bernard, K., Thouret, J.-C., Roverato, M., (2021). Sedimentology of volcanic debris avalanche deposits. In: Roverato, M., Dufresne, A., Procter, J. (Eds.), *Volcanic Debris Avalanches: From Collapse to Hazard.* Springer book series advances in volcanology, Cham, pp. 175–210. https://doi.org/10.1007/ 978-3-030-57411-6_8

Glicken, H., (1991). Sedimentary architecture of large volcanic-debris avalanches. In: Sedimentation in Volcanic Settings, pp. 99–106. https://doi.org/10.2110 / pec.91.45.0099

Legros, F., (2002). The mobility of long-runout landslides. *Eng. Geol.* 63, 301–331. https:// doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00090-4

Lomoschitz, A., Meco, J., & Corominas, J. (2002). The Barranco de Tirajana basin, Gran Canaria (Spain). A major erosive landform caused by large landslides. *Geomorphology*, *42*(1-2), 117-130. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00078-2

Lomoschitz, A., Hervás, J., Yepes, J., Meco, J., (2008). Characterisation of a pleistocene debris-avalanche deposit in the Tenteniguada Basin, Gran Canaria Island, Spain. *Landslides* 5, 227–234. https://doi.org/10.1007/s10346-008-0115-6

Makris, S., Manzella, I., Cole, P., Roverato, M., (2020). Grain size distribution and sedimentology in volcanic mass-wasting flows: implications for propagation and mobility. *Int. J. Earth Sci.* https://doi.org/10.1007/s00531-020-01907-8

Makris, S., Roverato, M., Lomoschitz, A., Cole, P., & Manzella, I. (2023). The propagation and emplacement mechanisms of the Tenteniguada volcanic debris avalanche (Gran Canaria): Field evidence for brittle fault-accommodated spreading. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, *435*, 107773. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107773

Siebert, L., (1984). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 22, 163–197. https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90002-7

Siebert, L., Roverato, M., (2021). A historical perspective on lateral collapse and volcanic debris avalanches. In: Roverato, M., Dufresne, A., Procter, J. (Eds.), Volcanic Debris Avalanches: From Collapse to Hazard. Springer book series Advances in Volcanology, pp. 11–50.

Modelización numérica del deslizamiento “El Arrecife” (Granada)

Numerical modeling of “El Arrecife” landslide (Granada)

M. Miangolarra[1], P. Mira[2] y J.A. Fernández-Merodo[3]

1 Dpto Riesgos Geológicos, CSIC-IGME, C/ de Ríos Rosas 23, Chamberí, 28003, Madrid. m.miangolarra@igme.es
2 Lab. Geotécnia, CEDEX, C/ de Alfonso XII, 3, Retiro, 28014 Madrid. pablo.mira@cedex.es
3 Dpto Riesgos Geológicos, CSIC-IGME, C/ de Ríos Rosas 23, Chamberí, 28003, Madrid. jose.fernandez@igme.es

Palabras clave: Modelización, Deslizamiento, Arrecife, Elementos Finitos, Factor Seguridad

Resumen

Dentro del proyecto nacional PROMETEO (PLEC2021-007842) se busca automatizar la modelización de deslizamientos de ladera tras observar movimientos, con tecnología radar InSAR desde satélites. Este trabajo presenta los resultados preliminares del caso de estudio del deslizamiento “El Arrecife”. Este deslizamiento, con un volumen estimado de 14,7 millones de m^3, afecta el embalse de la presa de Rules en la provincia de Granada. La velocidad vertical observada con tecnología InSAR indica un movimiento constante de aproximadamente 2 cm/año (Reyes-Carmona, 2023). A partir de la información disponible recolectada: modelos MDT de la Junta de Andalucía y los parámetros geotécnicos de informes técnicos de infraestructuras próximas (VM Energía, 2018), se propone estudiar la estabilidad de la ladera mediante diferentes técnicas como métodos analíticos basados en equilibrio límite (programas SLIDE) y métodos numéricos basados en elementos finitos (programas RS y GeHoMadrid), tanto en 2D como en 3D. Se presenta la influencia en la estabilidad de la ladera de diferentes factores como el modelo constitutivo considerado (Mohr-Coulomb y Hoeck¬Brown), la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso, el agua intersticial y finalmente el nivel de llenado del embalse.

Los primeros resultados indican un deslizamiento complejo. Existen diferentes roturas en la misma ladera, uno general conjugado con deslizamientos pequeños y localizados en el pie, en consonancia con las observaciones geomorfológicas y los datos InSAR. La movilización de la ladera, con valores de factor de seguridad igual a uno, se produce cuando se tienen en cuenta las discontinuidades en el macizo rocoso.

Abstract

Within the PROMETEO national project (PLEC2021-007842), the aim is to automate the modeling of slope landslides after observing movements with InSAR radar technology from satellites. This work presents the preliminary results of the "El Arrecife" landslide case study. This landslide, with an estimated volume of 14.7 million m^3, affects the Rules dam reservoir in the province of Granada. The vertical velocity observed with InSAR technology indicates a constant movement of approximately 2 cm/year (Reyes-Carmona, 2023). From the available information collected: DTM models of the Junta de Andalucía and the geotechnical parameters of technical reports of nearby infrastructures (VM Energía, 2018), it is proposed to study the slope stability using different techniques such as analytical methods based on limit equilibrium (SLIDE programs) and numerical methods based on finite elements (RS and GeHoMadrid programs), both in 2D and 3D. The influence on slope stability of different factors such as the constitutive model considered (Mohr-Coulomb and Hoeck-Brown), the presence of discontinuities in the rock mass, the interstitial water and finally the filling level of the reservoir is presented.

The first results indicate a complex landslide. There are different ruptures on the same slope, a general one combined with small and localized landslides at the foot, in agreement with the geomorphological observations and the InSAR data. The mobilization of the slope, with safety factor values equal to one, occurs when discontinuities in the rock mass are taken into account.

Referencias

VM Energía (2018). *Anexo Geotécnico, Proyecto central hidráulica reversible “Los Guajares”.*

Reyes Carmona, C. (2023). *Integration of satellite interferometry and geological methos for landslide research*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 202 p.

Modelo de Machine Learning para la elaboración de mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera en el Valle alpino de Pellice (Piamonte, Italia).

Machine Learning model for landslide susceptibility mapping in the alpine Pellice Valley (Piedmont, Italy).

P.V. Miranda-García[1], J. Clemente[2] y R. Sarro[1]

1 Departamento de Riesgos Geológicos y Cambio Climático, IGME-CSIC, C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003, España. pv.miranda@igme.es, r.sarro@igme.es

2 Escuela Politécnica Superior, Departamento de Automática, Universidad de Alcalá (UAH), E-28871 Alcalá de Henares (Madrid), España. julia.clemente@uah.es

Resumen: Los movimientos de ladera suponen una grave amenaza que anualmente provoca la pérdida de vidas humanas y daños materiales en las regiones montañosas de todo el mundo. Los mapas de susceptibilidad se constituyen como una excelente herramienta para mitigar los efectos derivados, gracias a su capacidad para identificar espacialmente las zonas potencialmente propensas a sufrir un movimiento de ladera. A su vez, el uso de técnicas de Machine Learning (ML) para la generación de mapas de susceptibilidad ha experimentado un crecimiento en los últimos años que se evidencia con el aumento del número de publicaciones relacionadas en este campo. El objetivo de este trabajo es la creación de un modelo de ML que sea capaz de generar cartografía de susceptibilidad de movimientos de ladera en un área de estudio compleja dentro de la cadena alpina. Para ello, se plantea una selección de dieciocho variables predictoras a partir de la creación de cuatro modelos usando diferentes técnicas *ensemble* de ML para evaluar su rendimiento en el valle de Pellice (Italia). Los resultados obtenidos en las métricas de evaluación, con valores de precisión por encima de 0.83 y ROC-AUC superior a 0.91 en todos los casos, demuestran que los cuatro modelos planteados tienen la suficiente capacidad predictiva para resolver el problema de clasificación binario inicialmente propuesto. Tras la comparativa de las métricas y el análisis visual de los mapas, finalmente se determina que el modelo que utiliza *Random Forest* (RF) es el más adecuado para generar cartografía de susceptibilidad dentro del área de estudio.

Palabras clave: movimientos de ladera; machine learning; susceptibilidad de movimientos de ladera; técnicas ensemble; mitigación.

Abstract: *Landslides pose a serious threat that annually causes loss of life and property damage in mountainous regions around the world. Susceptibility maps are an excellent tool for mitigating the effects of landslides, thanks to their ability to spatially identify areas potentially prone to landslides. In turn, the use of Machine Learning (ML) techniques for the generation of susceptibility maps has experienced a growth in recent years that is evidenced by the increase in the number of publications related to this field. The aim of this work is the creation of a ML model capable of generating landslide susceptibility mapping in a complex study area within the alpine chain. For this purpose, a selection of eighteen predictor variables is proposed from the creation of four models using different ensemble ML techniques to evaluate their performance in the Pellice valley (Italy). The results obtained in the evaluation metrics, with accuracy values above 0.83 and ROC-AUC above 0.91 in all cases, show that the four models proposed have sufficient predictive capacity to solve the initially proposed binary classification problem. After the comparison of the metrics and the visual analysis of the maps, it is finally determined that the model using Random Forest (RF) is the most suitable for generating susceptibility mapping within the study area.*

Key words: *landslide; machine learning; landslide susceptibility; ensemble techniques; mitigation*

INTRODUCCIÓN

Los efectos de los movimientos de ladera provocan al año miles de víctimas y miles de millones de pérdidas económicas. Se estima que entre 1998 y 2017, los eventos relacionados afectaron a cerca de 5 millones de personas y causaron más de 18000 muertes en todo el mundo (Mizutori y Guha-Sapir, 2018). A estos hechos, hay que añadir que se prevé que el cambio climático aumentará drásticamente la frecuencia de determinados fenómenos meteorológicos y climáticos extremos (Scott, 2016), lo que podría acelerar la aparición de nuevos movimientos de ladera en zonas propensas (Field et al., 2012).

En el contexto actual, donde la predicción y evaluación del riesgo es clave para reducir la pérdida de vidas humanas y los daños materiales, los mapas de susceptibilidad se constituyen como una excelente herramienta de mitigación que puede ser utilizada por

responsables políticos, científicos, ingenieros y el público en general (Ado et al., 2022). Desde mediados de los setenta, varios métodos han sido propuestos en la literatura para generar cartografía de susceptibilidad de movimientos de ladera. Dentro de los métodos de clasificación basados en datos o *data-driven models* (Liu et al., 2023), los modelos de Machine Learning (ML) han aumentado significativamente su popularidad en los últimos años. Esto se debe a su elevada capacidad predictiva, especialmente si lo comparamos con los modelos estadísticos tradicionales (Huang et al., 2020)

Partiendo de esta motivación, el objetivo fundamental de este trabajo es la creación de un modelo de ML que sea capaz de generar cartografía de susceptibilidad de movimientos de ladera en un área de estudio compleja de la cadena alpina, caracterizada por una presencia elevada de movimientos de ladera y la coexistencia de diferentes tipologías.

ÁREA DE ESTUDIO

El valle de Pellice o Val Pellice es un valle de origen fluvio-glaciar de 303.2 km^2 localizado al noroeste de Italia, en la región de Piamonte (Fig. 1). El territorio, forma parte del sector situado al sudoeste de la cadena alpina denominado Alpes Cocios, y cuenta con elevaciones que van desde los 323 a los 3160 m sobre el nivel del mar. De acuerdo con los datos históricos, en el área de estudio han sido registrados un total de 148 movimientos de ladera. Los eventos inventariados presentan tipologías variadas, entre las que identificamos: 45 desprendimientos/vuelcos, 42 flujos rápidos o *debris flow*, 39 movimientos de ladera complejos, 14 movimientos de ladera rotacionales/traslacionales, 5 flujos lentos o *earth flow*, y 2 tipologías sin identificar.

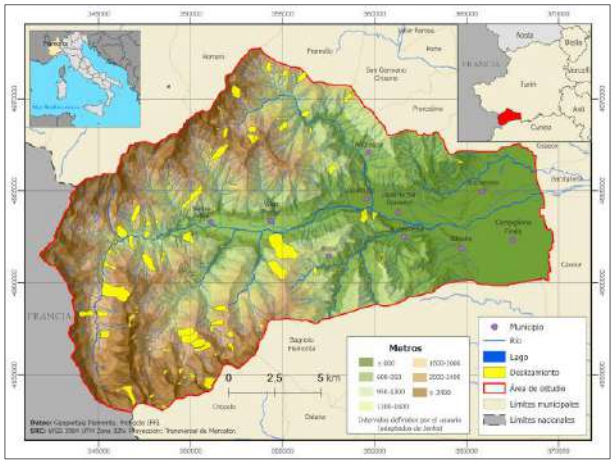


FIGURA 1. *Localización del área de estudio y movimientos de ladera inventariados.*

MATERIALES Y DATOS

En base a la literatura científica y considerando las características locales del área de estudio, para este trabajo fueron seleccionadas un total de 18 variables predictoras de diversa naturaleza, entre las que se incluyen factores topográficos, hidrológicos, antrópicos, de cobertura del suelo, litológicos y climáticos (Fig. 2). La representación de cada uno de los factores se llevó a cabo utilizando modelos ráster a 25 metros de resolución.

Del mismo modo, el *Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* (IFFI), elaborado por el Instituto Italiano de Protección e Investigación del Medio Ambiente en colaboración con las regiones y provincias autónomas italianas, fue utilizado como base de datos histórica.

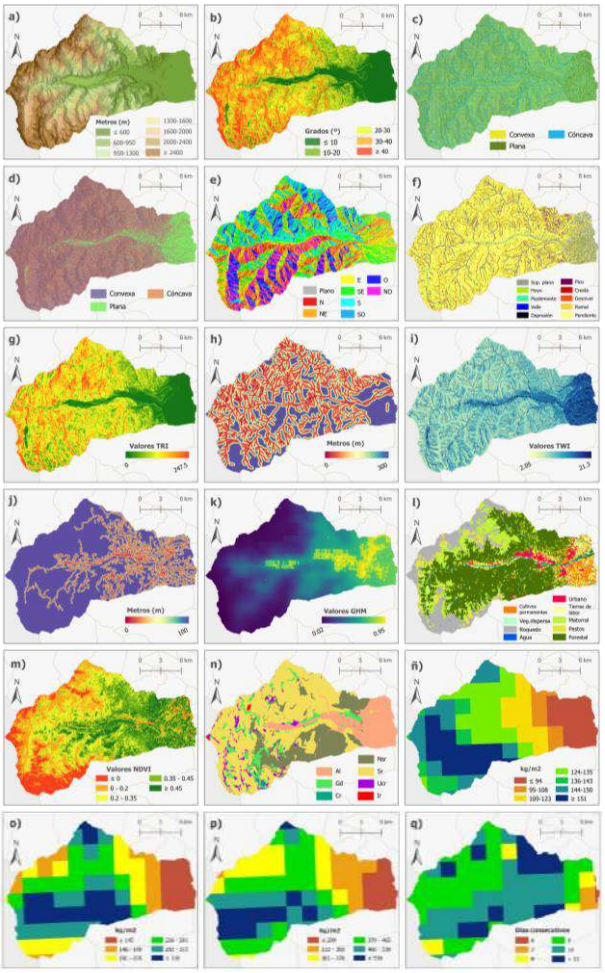


FIGURA 2. *Mapas de las variables predictoras seleccionadas para modelar la ocurrencia espacial de movimientos de ladera: a) elevación, b) pendiente, c) curvatura del perfil, d) curvatura del plano, e) orientación, f) unidades geomorfológicas, g) topographic ruggedness index (TRI), h) distancia a ríos, i) topographic wetness index (TWI), j) distancia a carreteras, k) global human modification index (GHM), l) cobertura del suelo, m) NDVI, n) litología, ñ) precipitación media mensual, o) Rx1day, p) Rx5day, q) consecutive wet days (CWD10).*

METODOLOGÍA

El marco metodológico adoptado consta de cinco fases principales: 1) adquisición de los datos de partida; 2) extracción de los puntos de muestreo; 3) comprensión y preparación del *dataset;* 4) creación de los modelos de susceptibilidad de movimientos de ladera; 5) validación de los modelos.

El procedimiento seguido en el tratamiento de los datos y la construcción de los modelos de ML se inspira en la metodología ampliamente utilizada CRISP-DM

(*Cross Industry Standard Process for Data Mining*), descrita por Chapman et al. (2000), aunque en este caso adaptada a la naturaleza del problema y a los objetivos del estudio. Desde el punto de vista del ML, la modelización de la susceptibilidad fue planteada como un problema de clasificación binario, donde lo que se pretende es estimar la probabilidad de movimientos de ladera en los píxeles del área de estudio no muestreada.

Siguiendo este enfoque metodológico, una vez que los modelos raster de los factores fueron generados, se procedió a la extracción de los puntos de muestreo de movimientos de ladera y no-movimientos de ladera para crear un *dataset* con información representativa de las variables predictoras. A continuación, se realizó un análisis de datos exploratorio (EDA) (Fig. 3) y los registros del *dataset* fueron divididos en conjuntos de entrenamiento y test (70:30). Posteriormente, se procedió al ajuste y configuración de hiperparámetros de los modelos *ensemble* seleccionados (*Random Forest*, *Extra Trees*, *Gradient Boosting*, *XGBoost*), hasta completar el entrenamiento de los clasificadores. Finalmente, la decisión del modelo óptimo se basó en los resultados de las métricas obtenidas en el proceso de validación sobre los datos de test, y en la comparativa visual de los mapas generados por cada modelo.



FIGURA 3. *Matriz de correlación de Pearson entre las variables predictoras obtenida en el análisis de datos exploratorio (EDA).*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar el rendimiento de los algoritmos, los resultados obtenidos durante la fase de validación fueron expresados a través de una serie de métricas de evaluación. En las matrices de confusión, el modelo que minimizó el número de Falsos Negativos (FN) fue *Random Forest* (420/14 480), mientras que XGBoost hizo lo propio con los Falsos Positivos (FP) (1035/14 480). La *overall accuracy* presentó valores comprendidos entre 0.84 y 0.89, siendo de nuevo los algoritmos RF y XGBoost los que alcanzaron un valor más elevado. Las representaciones de área bajo la curva (ROC-AUC, del inglés *Area under the Receiver Operating Characteristic Curve*) se muestran en la Fig. 4. En todos los casos las curvas ROC de los algoritmos se representan por encima de la *random guessing line* y con valores de AUC por encima del 0.9, lo que evidencia la buena capacidad de los modelos para discriminar entre clases.

En cuanto a los mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera (Fig. 5), estos fueron reclasificados en cinco niveles de riesgo (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) utilizando percentiles. El análisis de importancia de características confirmó que las variables de precipitación media mensual, Rx1day, GHM y pendiente fueron las que más contribuyeron a determinar los valores de susceptibilidad dentro de los mapas.

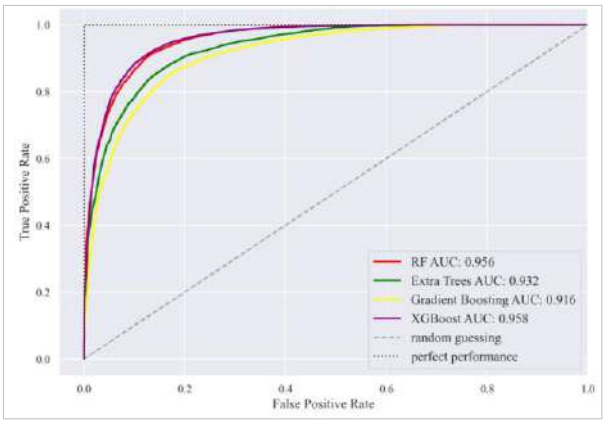


FIGURA 4. *Curvas ROC-AUC de los modelos de ML considerados en el estudio.*

Si analizamos la distribución espacial de los resultados obtenidos en los mapas, estos presentan un elevado nivel de coincidencia a la hora de identificar las zonas susceptibles dentro del área de estudio. Los espacios considerados con riesgo muy alto demuestran coherencia, al situarse mayoritariamente junto a las laderas que han experimentado eventos de movimientos de ladera en el pasado. Las laderas orientadas al este en los cordales montañosos del alto Valle de Pellice, son las más afectadas en todos los mapas; en contraposición con los fondos de valle situados al este, en la zona de contacto con la llanura Padana, donde se alcanzan los valores de susceptibilidad más bajos. Otros espacios sin presencia conocida de movimientos de ladera también son identificados dentro de la clase de susceptibilidad muy alta. Estos últimos, constituyen el principal valor añadido del modelo de cara a la identificación de espacios potencialmente afectados, y donde se asume que las autoridades locales deberían adoptar medidas de prevención.

De acuerdo con las métricas obtenidas y la comparativa visual planteada, el estudio finalmente determina que el algoritmo RF es el más adecuado para resolver el problema de clasificación en el valle alpino de Pellice. Desde un punto de vista práctico, el modelo constituye una herramienta útil, que potencialmente podría ser utilizada como base para la planificación y mitigación del riesgo de movimientos de ladera en el área de estudio.

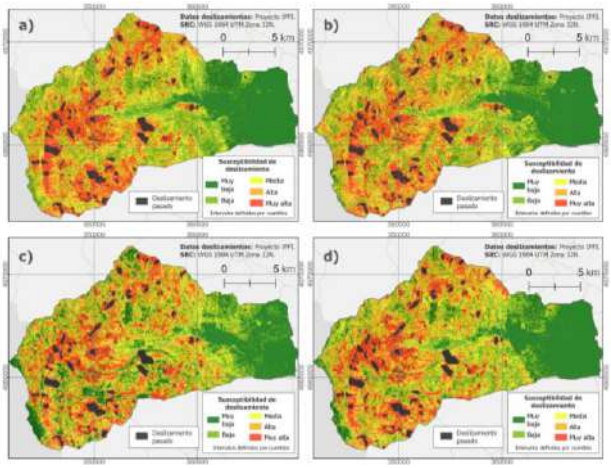


FIGURA 5. *Mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera generados por cada modelo: (a) Random Forest, (b) Extra Trees, (c) Gradient Boosting, (d) XGBoost.*

CONCLUSIONES

A la luz de los resultados, este estudio determina que el objetivo inicialmente propuesto ha sido alcanzado satisfactoriamente. Las métricas obtenidas corroboran esta afirmación, al mismo tiempo que confirman que los métodos *ensemble* y las variables predictoras seleccionadas fueron adecuadas para modelar la susceptibilidad dentro del Valle alpino de Pellice. Por último, desde este estudio también se subraya el enorme potencial de los modelos de ML como herramienta para generar cartografía de susceptibilidad de movimientos de ladera.

REFERENCIAS

Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., & Jasiński, M. (2022). Landslide susceptibility mapping using machine learning: A literature survey. *Remote Sensing*, 14(13), 3029.

Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R., Khabaza, T., Reinartz, T.P., Shearer, C. y Wirth, R. CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide. En The CRISP-DM Consortium, NCR Systems Engineering Copenhagen (USA and Denmark), DaimlerChrysler AG (Germany); SPSS Inc.: Chicago, IL, USA; OHRA.

Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K. y Mastrandrea, M. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation; IPCC: Geneva, Switzerland; Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Huang, F., Cao, Z., Guo, J., Jiang, S. H., Li, S. y Guo, Z. (2020). Comparisons of heuristic, general statistical and machine learning models for landslide susceptibility prediction and mapping. *Catena*, 191, 104580.

Liu, S., Wang, L., Zhang, W., He, Y., y Pijush, S. (2023). A comprehensive review of machine learning-based methods in landslide susceptibility mapping. *Geological Journal*, 58(6): 2283-2301.

Mizutori, M. y Guha-Sapir, D. (2018). Economic losses, poverty and disasters 1998–2017. United Nations office for disaster risk reduction, v.4, 9-15.

Scott, P. (2016). How climate changes affects extreme weather events. *Science*, 352: 1517-1518.

Ciencia ciudadana en el análisis de peligros geológicos en el Área Atlántica.

Citizen science in the analysis of geohazards in the Atlantic Area.

I. Montoya-Montes[1,2], I. Galindo[2], N. Sánchez[2], M. Jaud[3], N. Le Dantec[3], C. Pinto[4], M. A. Ferreira[5], K. Parker[6], K. Lemon[6], D. Rodrigues[7], F. P. Gouveia[7], L. Quental[8], E. Ramalho[8], P. Gonçalves[8], N. Cruz-Pérez[9], A. Ortega[10], E. Holohan[11], V. Correia[12], F. T. Jeremias[13] y R. Carrilho Gomes[5].

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). 35003 Las Palmas, Spain. ines.galindo@csic.es; n.sanchez@igme.es
2 Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG), 35117 Las Palmas de Gran Canaria, Spain. isabel.montoya@ulpgc.es
3 Geo-Ocean, Univ Brest, CNRS, Ifremer, UMR6538, F-29280 Plouzane, France. marion.jaud@univ-brest.fr
4 Lisbon Municipality, Campo Grande 25, Lisbon, Portugal. claudia.pinto@cm-lisboa.pt
5 Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Portugal. monica.ferreira@tecnico.ulisboa.pt; rui.carrilho.gomes@tecnico.ulisboa.pt
6 Geological Survey of Northern Ireland, Adelaide House, 39-49 Adelaide Street, Belfast, BT2 8FD, UK. kieran.parker@economy-ni.gov.uk; klem@bgs.ac.uk
7 University of Madeira, Funchal, Portugal. domingos@uma.pt; fatima.gouveia@staff.uma.pt
8 Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Estrada da Portela, Zambujal, Apartado 7586, 2721-866 Alfragide, Portugal. lidia.quental@lneg.pt; elsa.ramalho@lneg.pt; pedro.goncalves@lneg.pt
9 Department of Agricultural and Environmental Engineering. Univ. of La Laguna (Tenerife), Spain. ncruzper@ull.edu.es
10 La Palma Research Centre, La Palma (Tenerife), Spain. ariadna.ortega@lapalmacentre.eu
11 UCD School of Earth Sciences, University College Dublin, Dublin 4, Ireland. eoghan.holohan@ucd.ie
12 Portuguese Association of Geologists, Lisbon, Portugal. vcorreia@apgeologos.pt
13 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal. ftelmo@lnec.pt

Palabras clave: ciencia ciudadana, app, peligros geológicos, Copernicus, Area Atlántica

Resumen

La participación ciudadana constituye la piedra angular común de los cinco Observatorios piloto de peligros geológicos (movimientos en masa, terremotos, inundaciones fluviales y costeras, riesgos geotécnicos y erosión costera) implementados en cuatro países del Área Atlántica en el marco del proyecto AGEO INTERREG, con varias iniciativas de divulgación llevadas a cabo para mejorar la concienciación de los ciudadanos sobre los peligros geológicos. En este contexto, el logro notable de AGEO reside en el desarrollo de herramientas estandarizadas capaces de satisfacer las numerosas necesidades de estos pilotos, de modo que tanto los ciudadanos como los colaboradores expertos tengan acceso a canales de comunicación que les permitan informar sobre la ocurrencia de eventos de peligros geológicos. Además, la utilización de productos y servicios de emergencia del programa europeo Copernicus asume un papel importante en el establecimiento y funcionamiento de los Observatorios. Debido a su adaptabilidad en todo el variado espectro de pilotos de AGEO, estas herramientas prometen una integración perfecta en posibles futuros observatorios ciudadanos de riesgos geológicos y por tanto una contribución a la mejora de los sistemas de gestión de riesgos.

Abstract

Citizen involvement stands as a common cornerstone of the five pilot Observatories on Geohazards (mass movements, earthquakes, river and coastal floods, geotechnical hazards, and coastal erosion) implemented in four countries in the Atlantic Area in the frame of AGEO INTERREG project, which includes a range of outreach initiatives aimed at increasing public awareness of geohazards. In this context, AGEO's notable accomplishment lies in the development of standardized tools adept at accommodating the numerous needs of these pilots. Thus, both citizens or expert collaborators, are afforded access to communication channels that allow them to report any geohazard event. Moreover, the utilization of products and emergency services from the European Copernicus program assumes a pivotal role in the Observatories' establishment and operation. Due to their adaptability across the varied spectrum of AGEO pilots, these tools can be seamlessly integrated into potential future citizen geohazards observatories elsewhere and thus contribute to improve geohazard management systems more generally.

Análisis del Riesgo por Inundaciones Costeras ante la Subida del Nivel del Mar en la Ría de Arosa (Pontevedra, Spain).

Analysis of the Risk of Coastal Flooding Due to Rising Sea Levels in Ría of Arosa (Pontevedra, Spain)

C.E, Nieto[1], A. M. Martínez-Graña[1] y B. Encinas[1]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced, 37008, Salamanca. carlosenriquenm@usal.es, amgranna@usal.es, idu003820@usal.es

Resumen: En este estudio se realizó un análisis de la vulnerabilidad costera y el riesgo de inundaciones por el aumento del nivel del mar en el margen sur de la Ría de Arosa, Pontevedra (España), que es una zona de impacto urbanístico y de actividad turística. El índice de vulnerabilidad se calculó utilizando los siguientes mapas paramétricos: litología, geomorfología, pendiente, elevación, distancia, cambio de costa, altura significativa de ola, nivel del mar y rango de marea extremo. Este índice de vulnerabilidad fue validado a través de los resultados obtenidos del análisis de riesgo de inundación, desarrollado para diferentes escenarios temporales y extremos (Xa—presente, Xb—100 años, Xc—500 años, Xd—1000 años, Xe—tormenta y Xf—tsunami). Estos análisis se realizaron utilizando sistemas de información geográfica y técnicas de teledetección, análisis espacial, procesos de interpolación y análisis geoestadístico. Los resultados del análisis muestran las zonas vulnerables y de alto riesgo de inundaciones costeras, siendo el área urbanizada expuesta a un riesgo de 7,45 km^2. Se contribuye de esta forma a diseñar una gestión adecuada del litoral de la margen sur de la Ría de Arosa en caso de inundación.

Palabras clave: Ría de Arosa, vulnerabilidad, riesgo de inundación, SIG, gestión costera.

Abstract: *In this study, an analysis of coastal vulnerability and flood risk due to sea-level rise was conducted in the southern margin of the Ría of Arosa, Pontevedra (Spain), which is an area of urban impact and tourist activity. The vulnerability index was calculated using the following parametric maps: lithology, geomorphology, slope, elevation, distance, coastline change, significant wave height, sea level, and extreme tidal range. This vulnerability index was validated through the results obtained from the flood risk analysis, developed for different temporal and extreme scenarios (Xa—present, Xb—100 years, Xc—500 years, Xd—1000 years, Xe—storm, and Xf—tsunami). These analyses were performed using Geographic Information System and remote sensing techniques, spatial analysis, interpolation processes, and geostatistical analysis. The results of the analysis show the vulnerable areas and areas at high risk of coastal flooding, with the urbanized area exposed to a risk of 7.45 km^2. Thus, this study contributes to designing appropriate management for the coastline of the southern margin of the Ría of Arosa in the event of a flood.*

Key words: *Ría of Arosa; vulnerability; flood risk; GIS; coastal management*

INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales se han vuelto más impredecibles y ocurren con mayor frecuencia y fuerza debido al cambio climático (Park y Lee, 2020). Este cambio climático ha provocado un aumento de la temperatura media global, cambios en la intensidad y frecuencia de los vientos y olas, alteraciones en los patrones de precipitación y variaciones en el nivel medio del mar. Diversos estudios del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) indican un aumento sostenido del nivel del mar desde finales del siglo XIX, con una cierta aceleración en el ritmo de aumento durante la segunda mitad del siglo XX (IPCC, 2014). Esta tendencia ha sido registrada por varios mareógrafos desde 1880 y confirmada mediante datos altimétricos recopilados por diferentes satélites entre 1993 y 2011. Estos estudios han demostrado que el aumento del nivel del mar es de aproximadamente 3 mm por año.

Las zonas costeras, en general, están amenazadas por peligros como inundaciones, erosión y tormentas, y se volverán más vulnerables en el futuro a los impactos mencionados del cambio climático. Además, se espera que el número de personas que viven en zonas costeras en todo el mundo aumente de 1.800 a 5.200 millones para la década de 2080. A medida que los sistemas costeros se vuelven más complejos desde la perspectiva social y ambiental, el costo de los daños causados por los peligros costeros debido a los impactos del cambio climático también aumentará, por lo que es esencial desarrollar estrategias de acción y crear conciencia sobre estos peligros.

El litoral del margen sur de la Ría de Arosa es vulnerable al aumento del nivel del mar, especialmente en playas, marismas y humedales costeros. La actividad

humana en estas áreas, especialmente el turismo, plantea desafíos adicionales en términos de creciente vulnerabilidad y exposición a amenazas (Martínez-Graña et al., 2016). El objetivo de este trabajo es evaluar el grado de vulnerabilidad y riesgo de inundaciones costeras mediante la evaluación de diferentes factores característicos de la zona de estudio. Se presenta una metodología innovadora que permite el uso de información de alta resolución y actualizada, permitiendo la optimización de los datos y la facilidad de cálculo a medida que se conoce nueva información.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se sitúa en el noroeste de la provincia de Pontevedra, en la costa sureste de la Ría de Arosa (Fig. 1). Esta ría es una de las más grandes e importantes de las Rías Bajas, perteneciendo su zona norte a la provincia de La Coruña y su zona sur a la provincia de Pontevedra. En general, la zona de estudio abarca aproximadamente 9.600 ha e incluye los municipios gallegos de Cambados, El Grove y La Isla de Arosa, y parte de los municipios de Sangenjo, Meaño, Ribadumia y Villanueva de Arosa, donde habitan un total de 57.358 personas. Climatológicamente se sitúa en una zona continental con influencias mediterráneas que dan como resultado condiciones medias anuales suaves y húmedas. El efecto oceánico es el principal factor que influye en las temperaturas suaves y las abundantes precipitaciones. Se registra una precipitación media anual de aproximadamente 1455 mm, con una temperatura media en verano de 19,3ºC y 9ºC en invierno.



FIGURA 1. *Mapa de ubicación del área de estudio (en rojo) dentro de la provincia de Pontevedra (Galicia).*

METODOLOGÍA

La vulnerabilidad es el grado en que los sistemas geofísicos, biológicos y socioeconómicos son susceptibles e incapaces de hacer frente a impactos adversos originados por condiciones ambientales o elementos territoriales. Para realizar un análisis de vulnerabilidad costera del área de estudio, se empleará el Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC). El IVC, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Hallegatte, 2009), ha sido utilizado en varios análisis costeros posteriores a lo largo de las costas atlántica y pacífica de Estados Unidos, así como en estudios del litoral español (Martínez-Graña et al., 2018).

El método IVC del USGS emplea seis parámetros, mientras que el índice utilizado en este estudio incorporará diez parámetros (litología, Fl; geomorfología, Fg; pendiente, Fs; elevación, Fh; distancia, Fd; cambio de costa, Fb; altura significativa de ola, Fc; nivel del mar, Fsl; y rango de marea extremo, Ftr), estableciendo la ecuación del Índice de Vulnerabilidad de Ría de Arosa (IVRA):

$$IVRA = \sqrt{(Fl \times Fg \times Fs \times Fh \times Fd \times Fb \times Fc \times Fw \times Fsl \times Ftr / 10)}$$

Para respaldar los resultados obtenidos a través del índice de vulnerabilidad, se realizó un análisis de inundaciones costeras del área de estudio utilizando el Índice de Peligro de Inundación (IPI). A pesar de que el último tsunami en Galicia estuvo asociado al terremoto de Lisboa de 1755, y de que el terremoto fue más perceptible que el tsunami posterior, Galicia se considera una zona expuesta a este peligro natural debido a varios mecanismos focales próximos y lejanos en el Atlántico Norte que podría provocar un tsunami. En el caso del tsunami de Lisboa se registraron elevaciones máximas de hasta 3,3 m. Sin embargo, para este estudio de valores extremos, la elevación máxima alcanzada por este tsunami en la costa se fijó en 8 m.

El análisis de inundaciones costeras se basa en los parámetros de altura significativa de las olas (Fw), cambio del nivel del mar (Fsl) y rango de marea extremo (Ftr), que se utilizan para estimar el peligro de inundaciones en diferentes escenarios. Los valores de altura de ola significativa y rango de marea extremo se consideran constantes, mientras que los valores de los parámetros de cambio del nivel del mar varían, capturando tasas de aumento mínimas y máximas (mm/año) a partir de la interpolación realizada utilizando datos de Puertos del Estado.

X	Fw		Fsl		Ftr		Total	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Xa	0,11	4	0,027	0,4	4,38	4,47	4,52	8,51
Xb	0,11	4	0,11	0,16	4,38	4,47	4,60	8,63
Xc	0,11	4	0,55	0,8	4,38	4,47	5,04	9,27
Xd	0,11	4	1,1	1,6	4,38	4,47	5.59	10,07
Xe	0,11	4	2	2	4,38	4,47	6,49	10,47
Xf	0,11	4	8	8	4,38	4,47	12,49	16,47

TABLA I. *Escenarios analizados ("X") y su correspondiente valor de cada parámetro (en metros).*

Como resultado, los escenarios utilizados para el análisis del riesgo de inundaciones incluyen las condiciones presentes, definidas como un intervalo de 25 años (Xa); 100 años (Xb); 500 años (Xc); 1000 años (Xd); y escenarios de tormenta extrema (Xe) y tsunami (Xf). Estos datos y valores se presentan en la Tabla 1, donde la suma de los valores obtenidos proporciona la

extensión absoluta máxima y mínima del aumento del nivel del mar para cada escenario.

RESULTADOS

En general, se puede observar una mayor vulnerabilidad cerca de la costa, disminuyendo la vulnerabilidad a medida que nos alejamos de la costa (Fig. 2). A lo largo de la costa, la mayor vulnerabilidad suele encontrarse en zonas dominadas por playas y humedales, mientras que la menor vulnerabilidad suele observarse en las zonas de acantilados.

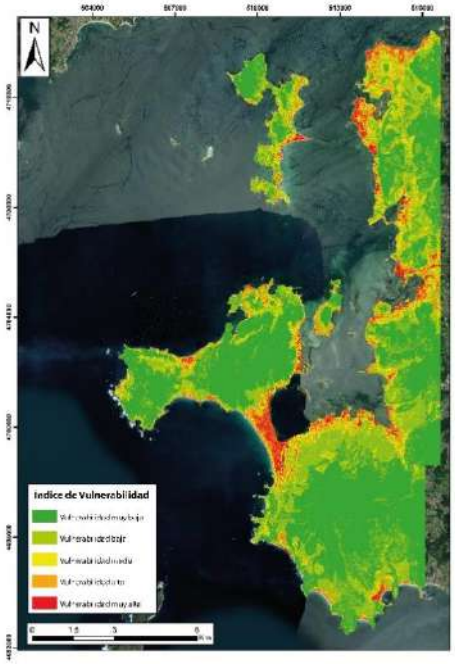


FIGURA 2. *Mapa del índice de vulnerabilidad del sector SE de la Ría de Arosa.*

Una vez completada la tabla de escenarios, los valores máximos obtenidos se utilizaron para generar mapas de riesgo de inundaciones para el litoral de la Ría de Arosa (Fig. 3). Los escenarios de aumento del nivel del mar se superpusieron en la ortofoto del año actual (2020), lo que permitió visualizar varios grados de riesgo de inundación a lo largo de la costa y las áreas con mayor potencial de inundación de agua en diferentes escenarios (Figura 8). Se puede observar que, del escenario Xb al escenario Xe, no hay un cambio significativo en la extensión alcanzada por el nivel del mar. Esto se debe a que la diferencia de extensión entre estos escenarios generalmente no supera el metro, siendo la diferencia mínima de 40 cm (del escenario Xd al escenario Xe) y la diferencia máxima de 80 cm (del escenario Xc al escenario Xd). Sin embargo, el mapa del escenario de tsunami extremo (Xf) muestra un cambio significativo en su extensión, con una diferencia de 6 m respecto al escenario de tormenta extrema (Xe) y casi 8 m de diferencia respecto a la situación actual (Xa).

Ponderando las diferentes extensiones de inundación de agua en función de su riesgo de inundación se puede generar el mapa de riesgo de inundación del sector SE de la Ría de Arosa (Fig. 4). En consecuencia, la zona continental ocupada por todos los escenarios será la zona con mayor riesgo de inundación (5), que es la zona más cercana al mar. Por el contrario, la zona cubierta por menos escenarios representará la zona menos vulnerable (1), que en este caso está representada por el escenario extremo de tsunami (Xe) y es la zona más alejada del mar.

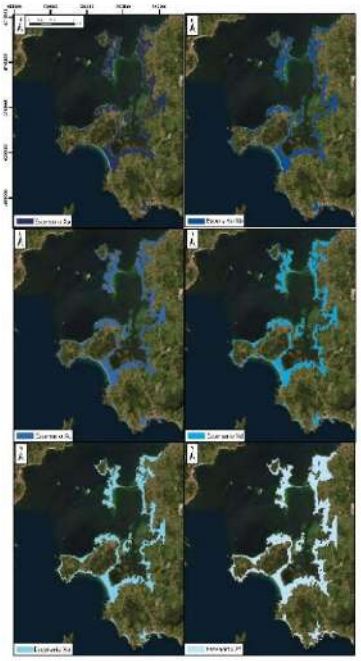


FIGURA 3. *Resultados de riesgo de inundación para cada diferente escenario.*

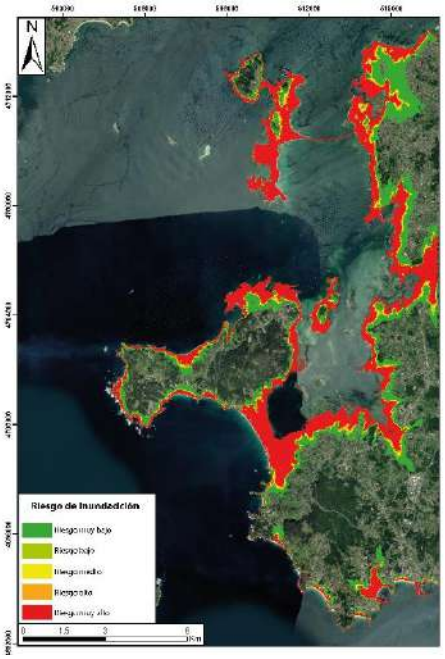


FIGURA 4. *Mapa del riesgo de inundación del sector SE de la Ría de Arosa.*

Al igual que ocurre con el índice de vulnerabilidad, el mapa de riesgo de inundaciones muestra un mayor riesgo en las zonas más cercanas a la costa, mientras que las zonas más hacia el interior tienen un menor riesgo de inundación. En conjunto, se puede observar que el tómbolo de El Grove (donde se ubica el complejo intermareal Umia-O Grove), la Isla de Arosa y el entorno

del río Umia tienen una mayor superficie de inundación. Además, tras un examen más detenido del mapa, cabe destacar que El Grove corre el riesgo de que el tómbolo quede sumergido, separando efectivamente este municipio del continente y convirtiéndolo en una isla. Del mismo modo, la Isla de Arosa corre el riesgo de convertirse en tres islas separadas en el futuro.

DISCUSIÓN

Ante el impacto socioeconómico que puede provocar un evento de inundación costera, como es el caso de la Ría de Arosa, es crucial desarrollar e implementar diversas estrategias de actuación. Estas estrategias pueden ayudar a minimizar los daños causados por las inundaciones y los costos de reparación asociados. Actualmente, se propone que la actuación más adecuada es llevar a cabo una combinación de medidas estructurales y no estructurales, que se basen en la ordenación territorial costera. La elaboración de estos mapas es sobre todo útil para establecer correctamente las medidas de ordenación territorial en el litoral (Dedekorkut-Howes et al., 2020).

Una de las estrategias más utilizadas empleadas y potencialmente efectivas para abordar el riesgo de inundaciones costeras involucra la infraestructura costera, que se puede dividir en dos tipos de defensas. La primera es la ingeniería dura, que implica la construcción y fortificación de estructuras costeras (como diques, rompeolas, espigones y muros de contención). El segundo es la ingeniería blanda, centrada principalmente en la reposición de playas para proteger áreas que experimentan pérdida de sedimentos debido a la erosión.

La planificación del uso del suelo y el desarrollo urbano constituyen otra estrategia contra el riesgo de inundaciones que puede ayudar a reducir tanto los daños como los costos asociados con los eventos naturales. Esto implica identificar zonas de alto riesgo y evitar el desarrollo en áreas propensas a inundaciones, establecer zonas de amortiguamiento e imponer restricciones a la construcción en áreas vulnerables. También es crucial promover prácticas de construcción resilientes en las regiones costeras (Anfuso et al., 2020).

Las estrategias pasivas para mitigar el riesgo de inundaciones incluyen sistemas de respuesta a peligros, alertas tempranas y educación y concientización comunitaria.

CONCLUSIONES

Tras realizar el estudio se pueden sacar varias conclusiones. En primer lugar, la metodología empleada permite delimitar de forma precisa y eficaz las zonas costeras en riesgo de inundación por el aumento del nivel del mar a un bajo coste económico. Además, los resultados obtenidos aportan información valiosa sobre el grado de vulnerabilidad y el perfil de riesgo de inundaciones en la costa sur de la Ría de Arosa, ante una potencial subida del nivel del mar, ya sea de forma gradual o durante eventos extremos.

Los mapas de vulnerabilidad y riesgo de inundaciones representan el riesgo asociado a cualquier subida del nivel del mar en la Ría de Arosa. La superficie urbanizada calculada afectada por riesgo de inundación es de aproximadamente 7,45 km^2, pero esta cifra aumenta si se consideran zonas agrícolas y zonas no urbanizadas o deshabitadas. En cuanto a la población expuesta al riesgo de inundaciones, hay un total de 3.707 personas expuestas, con mayor exposición en la Isla de Arosa y la península de El Grove.

La validez de la metodología del estudio se confirma a través del alineamiento de las áreas afectadas obtenidas en los resultados, utilizando tanto el método del índice de vulnerabilidad (basado en parámetros empíricos dentro del área de estudio) como el método del riesgo (basado en métodos deterministas que emplean escenarios de tendencia temporal).

Por último, los mapas elaborados sirven como medida preventiva que puede ayudar a mitigar el riesgo de que este litoral, que incluye desarrollos urbanos e infraestructuras turísticas, que atraen a un gran número de turistas.

AGRADECIMIENTOS

Al GIR de la Universidad de Salamanca por su colaboración en este trabajo.

Trabajo desarrollado dentro de los proyectos LZ8C de Dinamización del Medio Rural y VB8C Propuesta Geoparque Diputación de Salamanca (Área de Turismo).

REFERENCIAS

Anfuso, G., Postacchini, M., Di Luccio, D., Benassai, G. (2021): Coastal sensitivity/vulnerability characterization and adaptation strategies: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 72.

Dedekorkut-Howes, A., Torabi, E., Howes, M. (2020): When the tide gets high: A review of adaptative responses to sea level rise and coastal flooding. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63, 2102–2143.

Hallegatte, S. (2009): Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, 19, 240–247.

IPCC. (2014): Climate Change 2014, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. *Cambridge University Press*, 1–32.

Martínez-Graña, A.M., Boski, T., Goy, J.L., Zazo, C., Dabrio, C.J. (2016): Coastal-flood risk management in central Algarve: Vulnerability and flood risk indices (South Portugal). *Ecological Indicators*, 71, 302–316.

Martínez-Graña, A., Gómez, D., Santos-Francés, F., Bardají, T., Goy, J.L., Zazo, C. (2018): Analysis of flood risk due to sea level rise in the Menor Sea (Murcia, Spain). *Sustainability*, 10, 780.

Park, S.J., Lee, D.K. (2020): Prediction of coastal flooding risk under climate change impacts in South Korea using machine learning algorithms. *Environmental Research Letters*, 15, 094052.

Volcanes monogenéticos del Campo Volcánico de la Garrotxa, Península Ibérica: análisis morfométrico, procesos eruptivos y peligros asociados

Monogenetic volcanoes of the Garrotxa Volcanic Field, Iberian Peninsula: morphometric analysis, eruptive processes, and associated hazards

D. Pedrazzi[1], G. Kereszturi[2], A. Geyer[1], X. Bolós[1], J. Granell[3], L. Planagumà[4], J. Martí[5] y D. Cerda[1]

1 Geoscience Barcelona (GEO3BCN), CSIC, Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona, Spain. dpedrazzi@geo3bcn.csic.es, ageyer@geo3bcn.csic.es, xbolos@geo3bcn.csic.es, dcerda@geo3bcn.csic.es
2 Volcanic Risk Solutions, School of Agriculture and Environment, Massey University, Palmerston North, New Zealand. G.Kereszturi@massey.ac.nz
3 Department of Mineralogy, Petrology and Applied Geology, University of Barcelona, Spain. jgraneob7@gmail.com
4 Tosca, Environment Services, 17800, Olot, Spain. llplanaguma@gmail.com
5 Dep. of Geosciences, IDAEA-CSIC Institute of Environmental Assessment and Water Research, Jordi Girona St., 18-26. joan.marti@idaea.csic.es

Palabras clave: Anillo de toba-maar, Cono de escoria, freatomagmatismo, DEM, Rift Cenozoico

Resumen

El Campo Volcánico de la Garrotxa (CVG) se encuentra ubicado en el noreste de la Península Ibérica, siendo es el sector más joven dentro de la Zona Volcánica Catalana, una de las provincias volcánicas del Sistema Europeo de Rift. La actividad volcánica, controlada por fallas normales regionales generadas durante la extensión del Neógeno, comenzó hace unos 500.000-700.000 años y fue muy heterogénea, con alternancias de fases magmáticas y freatomagmáticas. A día de hoy, el CVG se considera un campo monogenético activo ya que la última erupción está datada en 11.000-13.000 años atrás. Aunque los conos de escoria constituyen las morfologías predominantes en este campo monogenético, también se identifican conos con actividad magmática-freatomagmática, maars y anillos de toba en más de 50 edificios en total.

Este estudio ofrece un análisis morfométrico integral de los edificios volcánicos, contribuyendo a una mejor comprensión tanto de la vulcanoestratigrafía como de la geomorfología. Esta investigación ha incluido trabajo de campo y análisis DEM detallado para determinar con precisión la distribución espacial y los parámetros morfométricos (p.ej., W_{co}, W_{cr}, H_{max}, D_{crmax} y S_{mean}) de las estructuras volcánicas mejor conservadas. Los datos morfométricos se han correlacionado con los estilos/secuencias de erupción, lo que sugiere un impacto notable de la dinámica eruptiva en la morfología de los volcanes.

Abstract

The Garrotxa Volcanic Field (GVF) is in the northeast of the Iberian Peninsula. It is the youngest area within the Catalan Volcanic Zone, one of the volcanic provinces of the European Rift System. The volcanic activity in the GVF has been controlled by regional normal faults generated during Neogene extension. It began about 500,000-700,000 years ago and was highly variable, including magmatic and phreatomagmatic phases. The GVF is considered an active monogenetic field since the last eruption is dated 11,000-13,000 years ago. Scoria cones constitute the predominant landforms in the GVF, accompanied by lesser occurrences of cones with phreatomagmatic activity and maars and tuff rings, with over 50 scattered eruptive vents.

This study offers a comprehensive morphometric analysis of volcanic edifices, contributing to an improved understanding of both the volcanostratigraphy and the geomorphology of the landforms within the GVF. Our approach involved fieldwork and detailed DEM analysis to accurately determine the spatial distribution and morphometric parameters (e.g., W_{co}, W_{cr}, H_{max}, D_{crmax} and S_{mean}) of the best-preserved volcanic structures in the field. Morphometric data were correlated with eruption styles/sequences, suggests notable impact of eruptive dynamics on the morphology of the volcanoes.

Detección de rayos cósmicos (muones) en cuevas con actividad tectónica.

Cosmic Rays (muons) detection inside caves and relationship with the tectonic activity.

R. Pérez-López[1], F.J. Fernández-Naranjo[1], A.L. Moreno-Castro[2], F. Gamero-Gómez[2], J. López-Gutiérrez[1], P. García-Jaén[2], P. Fernández-Canteli[1], S. Martín-Velázquez[3] y J.F. Mediato-Arribas[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. r.perez@igme.es; fj.fernandez@igme.es; j.lopezgu@igme.es; paula.canteli@igme.es; jf.mediato@igme.es
2 Pleeda Electronic Solutions. antoniomoreno@pleeda.com, pablogarcia@pleeda.com
3 Dpto. Biología y Geología, Física y Química Inorgánica. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. silvia.martin@urjc.es

Resumen: El desarrollo de detectores de rayos cósmicos (muones) *low-cost* (i.e. CosmicWatch Project), permite aplicar la detección de estas partículas elementales en entornos relacionados con alta actividad tectónica, como es la Sima del Vapor (Alhama de Murcia). Esta sima, desarrollada a favor de la Falla de Alhama de Murcia (FAM), presenta en su interior una atmosfera altamente ionizada con elevadas concentraciones de ^{222}Rn (valor máximo de 89 kBq/m^3). Se han diseñado, construido y colocado 3 detectores de rayos cósmicos (muones, $\mu^{+,-,0}$) en el interior de la sima, uno de ellos en la boca de entrada y los otros dos a -30 m de profundidad desde la entrada y -41 m de roca por debajo. Dichos detectores se han construido con detección redundante y se han colocado con medida en continuo, con el fin de estudiar si la actividad tectónica de la FAM influye en la absorción de rayos cósmicos en su interior, y establecer así un modelo de comportamiento de la FAM asociado a la ionización tectónica de la atmosfera en el interior de la sima.

Palabras clave: rayos cósmicos**,** muones, terremotos, cuevas, Murcia.

Abstract: *The low-cost cosmic ray detectors developed by Cosmic Watch Project, have been placed inside the radioactive and highly-ionized cave of the "Vapor Cave" (Alhama de Murcia, SE of Spain). This cave is developed along the Alhama de Murcia Fault (AMF), and exhibits high atmospheric radon (^{222}Rn) concentration, about 89 kBq/m^3 as maximum, and high ionized atmosphere. We have designed, built and placed three redundant cosmic rays (muons) loggers at different depths (cave entrance and -30 m from the cave entrance, and 41 m underneath) with the aim to detect variations in muon absorption potentially related to the tectonic activity of the AMF.*

Key words: *cosmic rays, muon, earthquakes, cave, Murcia.*

RAYOS CÓSMICOS Y TECTÓNICA

Los muones son partículas subatómicas elementales según el modelo estándar de física de partículas, están cargadas eléctricamente y pertenecen a la familia de los leptones, al igual que los electrones (para más información ver Gorringe and Hertzog 2015).

Su génesis está relacionada con la denominada lluvia cósmica primaria, la cual consiste en partículas subatómicas de alta energía, principalmente protones y núcleos de helio, que llegan a la Tierra desde el espacio exterior. Estas partículas interactúan con la atmósfera terrestre, dando lugar a una cascada de partículas secundarias, donde están incluidos los muones. Cuando los rayos cósmicos primarios chocan con los átomos en la atmósfera (principalmente oxígeno y nitrógeno), se producen reacciones nucleares que generan partículas secundarias (iones y partículas elementales), entre los que se encuentran los denominados piones ($\pi^{+,-,0}$). Estos piones, a su vez, decaen en muones (μ) y en neutrinos (ν).

Debido a que los muones son más masivos que los electrones y tienen carga eléctrica, interactúan débilmente con la materia. Esto significa que tienen una mayor capacidad para penetrar en la atmósfera terrestre sin desviarse significativamente ni ser absorbidos en comparación con otras partículas generadas en la cascada de partículas.

La vida media de los muones es relativamente corta, alrededor de 2,2 μs cuando están en reposo (Gorringe y and Hertzog 2015). Esto significa que, en promedio, después de ese tiempo, la mitad de los muones de una muestra dada se habrán desintegrado. Como se generan a 10 km de altura de la superficie terrestre, sería imposible detectarlos sin viajar a velocidades superiores a la velocidad de la luz. Sin embargo, dado que los muones generados en la atmósfera durante la lluvia cósmica primaria viajan a velocidades relativamente altas cercanas a la velocidad de la luz, se produce una dilatación en el tiempo suficiente para que un número de ellos llegue a la superficie de la Tierra antes de desintegrarse. Esto permite que los muones sean detectados antes de que desaparezcan, demostrando además la dilatación del tiempo predicha por la Teoría de Relatividad de Einstein.

En general, el flujo de muones en la superficie terrestre puede variar según la ubicación geográfica, la altitud y otras condiciones ambientales. La estimación general es del orden de 0,016 muones por cm^{-2} s^{-1} (Axani, 2019). Por ejemplo, Borja et al. (2022) estimaron un flujo de muones en la ciudad de Bogotá de 0,025 muones por cm^{-2} s^{-1}. Estos valores medios están estimados sobre la superficie terrestre. En nuestro caso, las medidas que realizamos en Sevilla arrojaron un valor medio de 0,067 muones cm^{-2} s^{-1}. Estos valores se encuentran dentro del rango de magnitud esperable para un detector de muones.

Actualmente el estudio del flujo de muones ha encontrado múltiples aplicaciones en la monitorización de volcanes (Lo Presti, 2020; Nomura et al., 2020; Leone et al., 2021; Olah et al., 2023). Como novedad, en este trabajo, presentamos un diseño preliminar de un detector de muones para la monitorización de fallas activas utilizando cuevas con elevada ionización atmosférica en su interior y presencia de altas tasas de ^{222}Rn, sin que aparezca material radiactivo (U, Th, Ra, Ce, etc.).

El objetivo de este trabajo es obtener series temporales de absorción de la lluvia de muones en el interior de la Sima del Vapor y estudiar su variabilidad asociada a la actividad tectónica de la Falla de Alhama de Murcia y a los eventos solares como las tormentas solares.

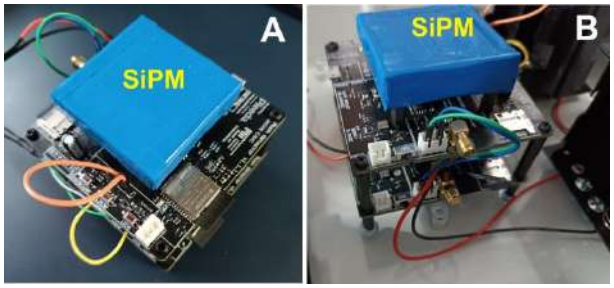


FIGURA 1. *Detalle del detector de muones construido por Pleeda Electronic Solutions partiendo del diseño de Cosmic Watch, minimizando el consumo. Detalle del fotomultiplicador de silicio (SiPM) el cual ha sido velado y colocado en detección cenital. A, vista frontal, B, vista lateral. El tamaño del SiPM es de 5 x 5 x 1 cm.*

DETECTORES DE MUONES Y CALIBRACIÓN

Se han construido tres detectores de muones redundantes (dos centelleadores por detector), en base al diseño de los detectores *low-cost* y *low-energy* del proyecto Cosmic Watch del M.I.T (https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2, Axani, 2019). Para la construcción de los detectores, se ha colaborado con la empresa *Pleeda Electronic Solutions*, expertos en diseño y construcción de hardware, partiendo del diseño original de los detectores de sobremesa del proyecto *Cosmic Watch* (M.I.T.), y se han incorporado mejoras dirigidas a su uso en cavidades con atmósferas con elevada humedad, y alimentados por baterías (Fig. 1).

Se ha minimizado el consumo de los detectores sustituyendo el Arduino Nano por un ESP32 con un software más robusto y eliminado las pantallas OLED. Además, se ha utilizado el centelleador SiPM (fotomultiplicador de silicio) debido a su diseño compacto y ser insensible a los campos magnéticos. Se han colocado con orientación a zenit, y de forma redundante, uno encima del otro, para una detección doble de cada muon en trayectoria cenital. También, aunque la detección sea redundante, aquellos picos que penetren con un ángulo de incidencia que no pertenezca al cono de FOV (*field of view*) que comparten ambos detectores, serán detectados por aquel detector que sea excitado. Así garantizamos no perder ningún dato que esté en la FOV de ambos y en la de cada uno

En cuanto a la calibración, primero se ha establecido un valor de umbral de ruido para la detección de picos de muones, y se han contabilizado las detecciones dobles por parte de cada detector. Como mejora sobre el diseño original, se ha diseñado un umbral dinámico de ruido de fondo atendiendo a la duración y a la intensidad de los picos detectados asociados con la detección de muones. De esta manera e independientemente de las condiciones ambientales y solares, se asegura la detección positiva de muones. Por otro lado, se ha utilizado los picos de tormentas solares ocurridas entre el 6 y el 11 de noviembre del año 2023, utilizando los datos de las webs *meteoagent* (https://meteoagent.com/solar-flares-storms) y de la agencia estadounidense NOAA (https://www.swpc.noaa.gov/), para estimar la posibilidad de tener falsos positivos en la detección.

MONITORIZACIÓN DE LA SIMA DEL VAPOR

Se han introducido dos detectores de muones en el interior de la Sima del Vapor (Murcia, Fig. 2), debido a la elevada ionización atmosférica que presenta en su interior, asociada a la presencia de ^{222}Rn en tasas de exhalación máxima superior a 89 kBq/m^3 (Pérez-López et al., 2020).

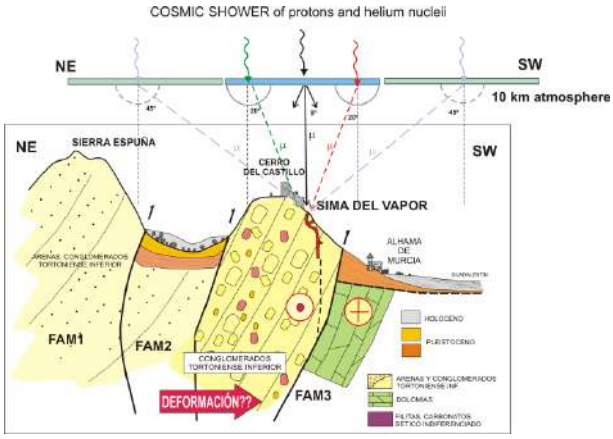


FIGURA 2. *Esquema geológico profundo de la falla de Alhama de Murcia, relación con la geología sub-superficial y potencial lluvia de muones.*

La Sima del Vapor se desarrolla sobre conglomerados carbonatados del Tortoniense como una sima vertical de 90 m de profundidad explorada, desarrollada sobre el plano de falla de la Falla de Alhama de Murcia (Pérez-López et al., 2016).

Se ha colocado un detector de muones en la entrada de la sima, y otros dos detectores a 30 m de profundidad desde la boca de entrada (Fig. 3), estando a una profundidad total de 41 m desde la superficie. Cada uno de estos detectores se ha colocado con el centelleador cenital mirando "hacia arriba" y otro de los detectores con el centelleador cenital mirando "hacia abajo".

La hipótesis de trabajo es el uso de la lluvia de muones como potencial indicador de actividad sísmica asociada al segmento norte de la Falla de Alhama de Murcia. En el interior de esta cavidad, altas concentraciones de radón (^{222}Rn) podrían estar relacionadas con la actividad tectónica en la zona (Fig. 3, Pérez-López et al., 2016, 2020). Actualmente en el interior de la sima existe un medidor BARASOL BMC-2 para medir la concentración de radón, un medidor de partículas alfa SARAD scout que también mide la concentración de radón, junto con un detector de CO_2 al 6%, así como medidores de presión atmosférica y temperatura. De esta forma, es posible establecer un modelo de circulación atmosférica y de variación temporal de radón en el tiempo

A pesar de que la interacción entre partículas radiactivas alfa y los muones es cuestionable debido a que representan diferentes estados de energía, la elevada ionización en la atmósfera interior podría afectar a la absorción de muones por parte del centelleador. Se busca comparar las series temporales de radón atmosférico en el interior de la sima del Vapor, el flujo de muones a -41 m de profundidad y la actividad tectónica en forma de terremotos a una distancia de 10 km de la boca de la sima, teniendo en cuenta que la magnitud de completitud en la zona es de m_c ~ 1.5 (www.ign.es). Dicha magnitud determina el tamaño del terremoto mínimo que siempre detecta la red sísmica.

RESULTADOS PRELIMINARES

A fecha de envió de este resumen, no se han descargado los datos registrados por los detectores de muones colocados en la Sima del Vapor, esperando tener los primeros datos entre abril y junio del año 2024. Sin embargo, los primeros resultados obtenidos de la medida del flujo de muones en superficie en Sevilla permiten establecer un umbral y la influencia de eventos solares sobre la tasa medida. Para ello se ha calculado el flujo de muones en superficie en intervalos de 6 y 12 h entre el 7 de noviembre y el 10 de noviembre, teniendo en cuenta la ocurrencia de una fuerte tormenta solar. Se ha medido el flujo de muones en cm^2/min/sr para diferentes intervalos temporales, oscilando entre 0,09 y 0,29 (Tabla 1) en función de la actividad solar. Los valores teóricos sin tener en cuenta la corrección de la latitud según Axani (2019) oscilan entre 0,2 y 0,4 cm^2/min/sr, similares a los obtenidos en el experimento inicial. Por tanto, será necesario corregir los resultados obtenidos con la actividad solar para determinar influencia de la actividad sísmica en el flujo de muones. Actualmente, los detectores se encuentran midiendo en la Sima del Vapor a la espera de los primeros tres meses de registro.

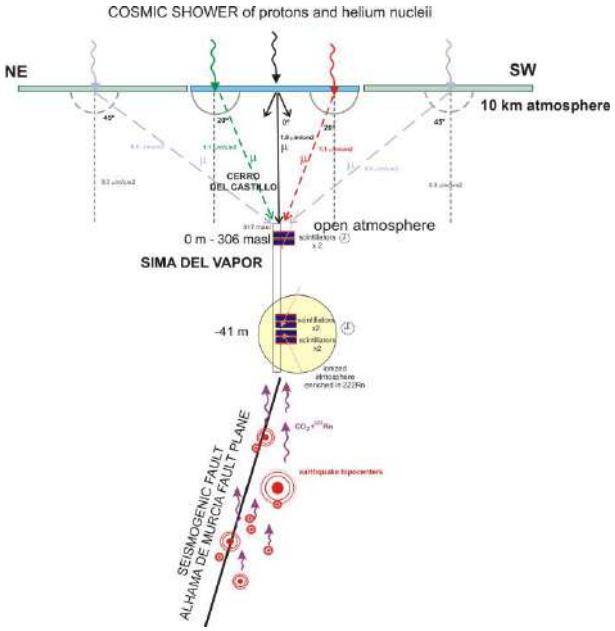


FIGURA 3. *Diseño del experimento de detección de muones en el interior de la Sima del Vapor y su potencial interacción con la radiación alfa debida a la presencia de elevadas concentraciones de 222Rn asociado a la actividad sísmica.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido totalmente financiado por el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación, programa Retos 2021, FAMRAD, con número de referencia PID2020-113407RBI00.

fecha	Muon nº	Tiempo (s) x10^4	Flujo muones (cm^2/min/sr)	K-index	Flujo muones teórico (cm^2/min/sr)
7-11-2023	891	2,32	0,09	6	0,2-0,4
8-11-2023	4144	3,43	0,29	8	0,2-0,4
9-11-2023	5157	6,22	0,20	6	0,2-0,4
10-11-2023	1368	2,89	0,11	3	0,2-0,4

TABLA I. *Flujo de muones en la superficie de Sevilla medido entre el 7 y el 10 de noviembre del año 2023, asociado con una elevada actividad solar del ciclo solar 25, expresado en el factor K-index que mide la intensidad de tormentas geomagnéticas solares. El flujo teórico corresponde a Axani (2019).*

REFERENCIAS

Axani, S. N. (2019): The Physics Behind the CosmicWatch Desktop Muon Detectors. *arXiv:1908.00146 [physics.ins-det]*.

Borja, C., Ávila, C., Roque, G., Sánchez, M. (2022): Atmospheric Muon Flux Measurement near Earth's Equatorial Line. *Instruments*, 6:78.

Gorringe, T.P., Hertzog D.W. (2015): Precision muon physics. Progress in Particle and Nuclear Physics, 84, 73-123.

Leone G. et al. (2021): Muography as a new complementary tool in monitoring volcanic hazard: implications for early warning systems. *Proc. R. Soc.* A, 477: 20210320.

Lo Presti, D., Riggi, F., Ferlito, C. et al. (2020): Muographic monitoring of the volcano-tectonic evolution of Mount Etna. *Scientific Report*, 10: 11351.

Nomura, Y., Nemoto, M., Hayashi, N. et al. (2020): Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network. *Scientific Reports*, 10: 5272.

Oláh, L., Gallo, G., Hamar, G., Kamoshida, O., Leone, G., Llewellin, E. W., et al. (2023): Muon imaging of volcanic conduit explains link between eruption frequency and ground deformation. *Geophysical Research Letters*, 50: e2022GL101170.

Pérez-López R., et al. (2016): Condiciones ambientales de la Sima del Vapor: relación con la Falla de Alhama de Murcia y su actividad tectónica reciente. *Geo-Temas*, 16 (1), 363-366.

Pérez-López, R., Fernández-Cortés, A. *et al.* (2020): Elevadas dosis de radón (^{222}Rn) y terremotos en la Sima del Vapor (Murcia). *Geo-Temas*, 18, ISSN: 1576-5172.

Deformaciones gravitacionales profundas de ladera en Sierra Nevada, Sur de España: nueva cartografía mediante integración de datos InSAR e índices geomorfológicos

Deep-seated Gravitational Slope Deformations in Sierra Nevada, Southern Spain: updated landslide inventory by integrating InSAR data and geomorphological indexes

C. Reyes-Carmona[1], J.P. Galve[2], J.V. Pérez-Peña[2], M. Moreno-Sánchez[2], D. Alfonso-Jorde[2], D. Ballesteros[3], D. Torre[4], J.M. Azañón[2] y R.M. Mateos[5]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra y Ambientales, Universidad de Milano-Bicocca 20126 Milán. cristirecar@gmail.com
2 Dpto. Geodinámica, Universidad de Granada 18071 Granada. jpgalve@ugr.es, vperez@ugr.es, marcosms@ugr.es, davidalfonso@ugr.es, jazanon@ugr.es
3 Dpto. Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria 39005 Santander. ballesterosd@unican.es
4 Dpto. Ciencias Puras y Aplicadas, Universidad de Urbino "Carlo Bo" 61029 Urbino. d.torre@campus.uniurb.it
5 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC 18001 Granada. rm.mateos@igme.es

Palabras clave: deformaciones gravitacionales profundas de ladera, InSAR, k_{snn}, Sierra Nevada

Resumen

Sierra Nevada es una cadena montañosa que forma parte de las Zonas Internas de la Cordillera Bética (Sur de España) y alcanza los 3400 metros de altura, generando los mayores desniveles de la Península Ibérica. Aunque existían inventarios previos de movimientos de ladera en Sierra Nevada, recientemente hemos detectado por primera vez la existencia de deformaciones gravitacionales profundas de ladera (en inglés *Deep-seated Gravitational Slope Deformations*; DGSDs). Estos movimientos se caracterizan por sus grandes dimensiones y por la ausencia de rasgos geomorfológicos llamativos, lo cual hace que sean difíciles de identificar en el campo. Para facilitar su reconocimiento, hemos utilizado datos derivados de interferometría de satélite radar (InSAR) y de análisis del relieve mediante el índice de pendiente normalizada (k_{sn}). La exploración de los movimientos activos del terreno y de las anomalías de k_{sn} en los ríos nos permitieron detectar las laderas de interés. Además, los productos derivados de Modelos Digitales del Elevación (DEMs) de alta resolución fueron esenciales para delimitar con detalle estos movimientos de ladera. De esta forma, hemos generado un inventario de movimientos de ladera actualizado que contiene 17 DGSDs. Este nuevo inventario refleja un aumento significativo de la superficie afectada por movimientos de ladera con respecto a la cartografía previa, así como la prevalencia de este tipo de deformaciones profundas en el sector analizado de Sierra Nevada.

Abstract

Sierra Nevada is a mountain range that is part of the Internal Zones of the Betic Cordillera (Southern Spain) and reaches heights of up to 3400 meters, creating the greatest elevations in the Iberian Peninsula. Although there were previous landslide inventories in the Sierra Nevada, recently we detected for the first time the existence of Deep-seated Gravitational Slope Deformations (DGSDs). These movements are characterised by their large dimensions and the general absence of well-visible geomorphological features, making them difficult to identify in the field. To facilitate their recognition, we used data derived from radar satellite interferometry (InSAR) and relief analysis using the normalised steepness index (k_{sn}). The exploration of active ground movements and k_{sn} anomalies in rivers allowed us to detect the slopes of interest. Therefore, the high-resolution Digital Elevation Models (DEMs) products were essential to accurately delimitate these slope movements. In this way, we generated an updated landslide inventory that inludes 17 DGSDs. This new inventory represents a significant increase in the affected area by slope movements compared to previous mapping, as well as the prevalence of this type of deep-seated deformations in the analysed sector of Sierra Nevada.

Mapa Simplificado de Litologías Orientado a Procesos Geológicos de España. Escala 1:50.000.

Simplified Map of Lithologies Oriented to Geological Processes in Spain. Scale 1:50,000.

J. Rivera-Rivera[1,2], M. Béjar-Pizarro[1], R.M. Mateos[1], P. Ezquerro[1], R. Sarro[1], M. Martínez-Corbella[1], H. Aguilera[1], C. Guardiola-Albert[1].

1 CN IGME-CSIC C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003. js.rivera@igme.es, m.bejar@igme.es, rm.mateos@igme.es, p.ezquerro@igme.es, r.sarro@igme.es, m.martinez@igme.es, h.aguilera@igme.es, c.guardiola@igme.es.
2 Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía. Campus Sur, 28031 Madrid.

Palabras clave: clasificación litológica, procesos geológicos, geotecnia peligros geológicos,

Keywords: lithological classification, geological processes, geotechnics, geological hazards.

Resumen Los procesos geológicos pueden estimarse a partir de aproximaciones matemáticas de diferente complejidad (ej. modelos heurísticos, determinísticos, estadísticos), los cuales implican el uso de variables independientes de distinta naturaleza (ej. numéricas y categóricas). Entre las variables categóricas se encuentra la litología, la cual es una variable explicativa relevante, donde cada categoría representa un material geológico con determinadas propiedades físico-químicas que pueden condicionar la ocurrencia de un proceso geológico (ej. dolinas en rocas carbonatadas, subsidencia en depósitos cuaternarios sin consolidar, etc.). Independientemente del modelo aplicado en los estudios de procesos geológicos, las variables categóricas deben convertirse a variables numéricas mediante clasificaciones (ej. codificación *One-hot*). En este estudio se presenta el Mapa Simplificado de Litologías Orientado a Procesos Geológicos de España, en el que las más de 6.000 litologías obtenidas al unificar el plan de cartografía digital (GEODE) y el mapa geológico de Cataluña, ambos a escala 1:50.000, se han reclasificado en 7 grupos de acuerdo a su relación con diferentes procesos geológicos (ej. movimientos de ladera, subsidencia, suelos expansivos, karstificación, dolinas, diapiros, etc.). Esta reclasificación tiene en cuenta la génesis, edad, composición, grado de meteorización y comportamiento geo-mecánico de los materiales; sin perder información relevante y resolución espacial en el proceso. Este mapa puede ser utilizado como un recurso práctico para el análisis geoespacial de procesos geológico-geotécnicos a escala nacional y/o regional. Este trabajo ha sido desarrollado dentro del marco del proyecto SARAI (PID2020-116540RB-C22) gracias a la beca FPI (PRE2021-100044) y el apoyo de “FSE invierte en tu futuro” financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Abstract Geological process can be estimated through mathematical approaches of varying complexity (e.g., heuristic, deterministic, statistical models), which involve the use of independent variables of different natures (e.g., numerical and categorical). Among the categorical variables is lithology, which is a relevant explanatory variable, where each category represents a geological material with specific physiochemical properties that may influence the occurrence of a geological process (e.g., sinkholes in carbonate rocks, subsidence in unconsolidated Quaternary deposits, etc.). Regardless of the model applied in geological process studies, categorical variables must be converted into numerical variables through classifying methods (e.g., One-Hot encoding. This study presents the Map of Simplified Lithology Oriented to Geological Processes of Spain, in which over 6,000 lithologies obtained by unifying the digital mapping plan (GEODE) and the geological map of Catalonia, both at a scale of 1:50,000, have been reclassified into 7 groups according to their relationship with different geological processes (e.g., landslide, subsidence, expansive soils, karstification, sinkholes, diapirs, etc.). This reclassification takes into account the genesis, age, composition, degree of weathering, and geomechanical behavior of the materials; without losing relevant information and spatial resolution in the process. This map can be used as a practical resource for the geospatial analysis of geological-geotechnical processes at a national and/or regional scale. This work has been developed within the framework of the SARAI project (PID2020-116540RB-C22), thanks to the FPI grant (PRE2021-100044) and the support by “FSE invests in your future” funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Estudio forense de las inundaciones catastróficas ocurridas en el SW de la Comunidad de Madrid durante la DANA de septiembre de 2023: reconstrucción morfosedimentaria e hidrodinámica.

Post-flood forensic survey after a catastrophic recent flash flood in Central Spain (SW of the Comunidad de Madrid): morphosedimentary and hydrodynamic reconstruction.

K.P. Sandoval-Rincón[1,2], J. Garrote[2], D. Vázquez-Tarrío[1], A. Lucía[1], M. Hernández-Ruiz [1], M.A. Perucha[1], A. Romero[1], J.A. Ortega-Becerril[3] y A. Díez-Herrero[1]

1 Department of Geological Risk and Climate Change, Geological and Mining Institute of Spain, Spanish National Research Council (IGME, CSIC). kp.sandoval@igme.es; d.vazqueztarrio@igme.es; a.lucia@igme.es; m.hernandez@igme.es; ma.perucha@igme.es; a.romero@igme.es; andres.diez@igme.es

2 Department of Geodynamics, Stratigraphy and Paleontology, Faculty of Geological Sciences, Complutense University of Madrid (UCM). juliog@ucm.es; kesandov@ucm.es

3 Department of Geology and Geochemistry, Sciences Faculty, Autonomous University of Madrid (UAM). j.ortega@uam.es

Resumen: A inicios del mes de septiembre de 2023, una depresión aislada en niveles altos (DANA) atravesó el centro de la península Ibérica produciendo intensas precipitaciones que derivaron en avenidas súbitas en varios ríos y arroyos (Alberche, Perales, Grande, Guadarrama). Se produjeron siete víctimas mortales y daños materiales en propiedades e infraestructuras valorados en centenares de millones de euros. Este trabajo recopila las tareas forenses post-evento que se llevaron a cabo en los cauces del sistema fluvial Grande-Perales-Alberche, consistentes en: i) documentación de los cambios morfológicos históricos de estos tramos fluviales, a partir de cartografías antiguas, mapas geomorfológicos, fotografías aéreas y ortoimágenes recientes; ii) recopilación de toda la información meteorológica (precipitaciones) e hidrológica (caudales) del evento; iii) adquisición de imágenes y videograbaciones aéreas con drones; iv) georreferenciación en campo con GPS diferencial de limnimarcas de altura máxima de agua (HWM) e indicadores de paleoniveles (PSI); v) mediciones en campo con distanciómetros, cálculo de áreas y cubicación volumétrica de formas de incisión y depósitos fluviales generados; vi) medición detallada de parámetros de microformas, como longitud de onda y amplitud de rizaduras de corriente; vii) toma de muestras de los depósitos detríticos generados para análisis granulométrico y composicional; viii) toma de datos volumétricos y de altura de acumulaciones de material leñoso. Estas tareas se efectuaron de cara a la aplicación futura de diferentes metodologías que permitan reconstruir las características hidrodinámicas y morfosedimentarias del evento.

Palabras clave: Estudio forense, avenidas súbitas, limnimarcas, DANA, sedimentos

Abstract: *Between the 2nd and the 4th of September, an extraordinary weather phenomenon, known as a 'cut-off low' or DANA (in Spanish: Depresión Aislada en Niveles Altos), traversed through the central region of the Iberian Peninsula, causing heavy rainfall and flash floods in several river basins (Alberche, Perales, Tajo). There were seven deaths and hundreds of millions of euros of damage. In this work, we summarize all the post-event forensic analyses and field observations collected after a flash flood occurred along the Grande-Perales-Alberche river system, which consisted of: (i) documentation of the historical morphological changes of these rivers, obtained from old cartographies, geomorphological maps, aerial photographs and recent orthoimages; (ii) compilation of all meteorological (rainfall) and hydrological (flow) information available for the event; (iii) acquisition of aerial images and video recordings using drones; iv) field georeferencing with differential GPS of high water marks (HWM) and paleo-stage indicators (PSI); v) field topographic measurements; vi) detailed measurement of bedform parameters such as wavelength and amplitude of current ripples; vii) grain size and composition sampling of flood deposits; viii) volumetric and height data collection of woody accumulations. These tasks were undertaken with the aim of employing various methods to attempt reproduction and prediction of this type of event in the study rivers.*

Key words: *forensic survey, flash floods, high water marks, flood deposits*

INTRODUCCIÓN

Entre los días 2 y 4 de septiembre de 2023 una depresión aislada en niveles altos (DANA) atravesó el centro de la península ibérica, produciendo en las provincias de Segovia, Madrid y Toledo precipitaciones acumuladas entre 120 mm - 180 mm, con intensidades superiores a 60mm/h (AEMET, 2023), las cuales derivaron en avenidas súbitas en varios ríos y arroyos de las cuencas de los ríos Tajo (Alberche, Perales, Grande, Guadarrama) y Duero. Se produjeron siete víctimas mortales y daños materiales en propiedades e infraestructuras valorados en centenares de millones de euros.

Los eventos de avenidas súbitas, como el acontecido en el sistema Grande-Perales-Alberche durante el paso de esta DANA, a pesar de ser los que mayor número de víctimas mortales y daños materiales producen, rara vez quedan bien registrados en el instrumental hidrometeorológico (p.e. pluviómetros, estaciones de aforos). Por ello, para su análisis y prevención futura es de gran interés intentar reconstruir las características morfodinámicas e hidrodinámicas que tuvieron lugar. De ahí, la necesidad de realizar estudios forenses que permitan recopilar la mayor cantidad de información en campo, para contar con los datos de entrada y/o validación necesarios para la realización de estudios post-evento. Estudios forenses de este tipo han sido aplicados, por ejemplo, en Italia; en donde ha sido posible analizar la relación entre la dinámica hidrometeorológica y los procesos geomorfológicos en ríos de alta montaña (Borga et al., 2019) y caracterizar los efectos geomorfológicos causados por las avenidas súbitas (Surian et al., 2016).

Tras el paso de la DANA de septiembre de 2023 se realizaron sucesivas campañas de campo en los cauces y llanuras inundables del arroyo Grande y los ríos Alberche y Perales, en las cuales se ejecutaron algunas tareas forenses, presentadas en este trabajo, y cuyos datos serán utilizados en el desarrollo futuro de modelos hidrodinámicos.

EL SISTEMA FLUVIAL GRANDE-PERALES-ALBERCHE

El sistema fluvial Grande-Perales-Alberche se encuentra situado en el centro de la península Ibérica (cuenca del río Tajo), drenando el sector meridional del Sistema Central español (Sierras de Gredos, Malagón y Guadarrama occidental). Desde el punto de vista geológico y geomorfológico las cuencas de drenaje poseen materiales paleozoicos (granitoides y rocas metamórficas), con relieves montañosos y de piedemontes del Sistema Central (Macizo Ibérico); y materiales cenozoicos (conglomerados, arenas, limos y arcillas), con relieves de campiñas alomadas de la Cuenca de Madrid (Cuencas Cenozoicas continentales). Estos dos complejos litológicos están separados por el sistema de fallas inversas alpinas del Sur del Sistema Central, que definen una pequeña fosa tectónica (*pop-down basin*), por cuyo fondo discurre el tramo final del río Perales y, desde su confluencia en el meandro de El Santo, el río Alberche.

La tipología de ríos del sistema Grande-Perales-Alberche varía desde ríos rectos de canal sencillo, baja sinuosidad, con lecho de cantos, gravas y arenas, ligeramente incididos en gargantas; a ríos originariamente entrelazados (*braided*) de arenas y gravas, que circulan por lechos de baja pendiente formando meandros amplios. Estas corrientes fluviales tienen i) un régimen hidrológico pluvial a pluvio-nival, con una elevada variabilidad inter- e intra-anual de los caudales; ii) alto potencial de incorporación y transporte de material detrítico (proveniente de arroyadas aluviales, erosión acentuada de los sistemas de cárcavas contiguos, y movimientos de ladera; y favorecido por el elevado porcentaje de la cuenca que se desarrolla en las unidades Cenozoicas de arcosas y gravas) y leñoso (procedente de la vegetación de ribera de sotos y vegas).

TAREAS FORENSES DESARROLLADAS

Después de las avenidas súbitas ocurridas en el arroyo Grande y los ríos Perales y Alberche, así como también tras las borrascas posteriores, se realizaron las siguientes tareas forenses:

Adquisición de fotografías y videograbaciones aéreas con drones: en los tramos con mayores afecciones y cambios morfológicos se obtuvieron los siguientes productos:

- Fotografías aéreas (verticales y oblicuas) del cauce y las riberas, las infraestructuras y edificaciones afectadas y otros elementos singulares.
- Vuelos con dianas georreferenciadas con GPS (RTK) y su posterior restitución fotogramétrica para la obtención de nubes de puntos, MDT y MDS de alta resolución, así como ortofotografías.
- Conjuntos de fotografías oblicuas solapadas para la obtención de modelos tridimensionales de elementos como puentes derribados, o formas y depósitos de interés (acumulaciones de material leñoso).
- Videograbaciones a lo largo del cauce y las márgenes, para documentar la extensión de los efectos geomorfológicos.

Cartografía detallada de los elementos geomorfológicos expuestos o generados por el evento: A partir de una ortofotografía de alta resolución de las confluencias Grande-Perales y Perales-Alberche, obtenida el día 5 de septiembre, se realizó la cartografía de los elementos geomorfológicos y formas singulares presentes en el cauce activo (*In-channel forms*) y llanuras inundables (Fig. 1); con el objetivo de registrar la mayor cantidad de información espacial relativa a los cambios geomorfológicos causados por la avenida.

El mapa geomorfológico generado fue elaborado a escala 1:250 mediante edición vectorial en SIG, y en él se delimitaron y localizaron:

- Barras (Compuestas, laterales, longitudinales, de gravas y bloques, de sombra, de relleno de canales secundarios, con rizaduras linguoides, en

series de patrones trenzados) y conos de deyección
- Depósitos detríticos (*overbank, overbank splay, backwater, frontal splay*) y grandes acumulaciones de madera
- Áreas de lecho rocoso expuesto (erosión de fondo), afloramientos de roca en márgenes o curvas de meandro, cárcavas.
- Escarpes de erosión lateral, vectores de vegetación reclinada y afluentes o cárcavas reactivadas.

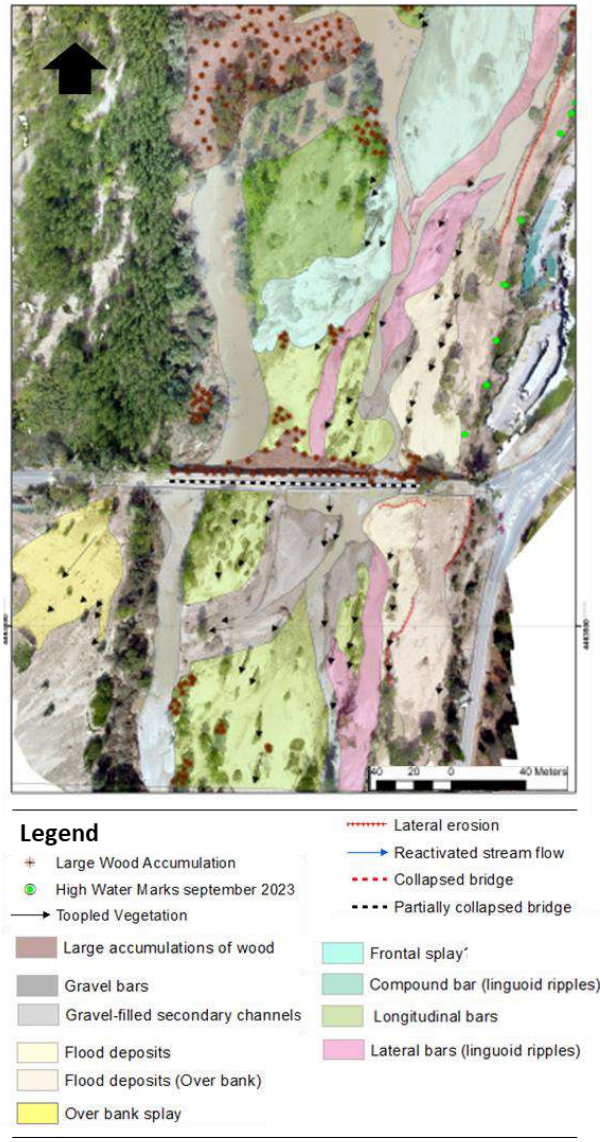


FIGURA 1. *Mapa geomorfológico post-evento aguas abajo de la confluencia de los ríos Perales y Alberche.*

Georreferenciación en campo con GPS diferencial de limnimarcas (HWM) e indicadores de paleoniveles (PSI): Mediante inspección visual por las márgenes y cauces de las principales corrientes fluviales afectadas por la DANA, se localizaron, clasificaron y posicionaron diferentes limnimarcas de altura máxima de agua (HWM) e indicadores de paleoniveles (PSI) alcanzados durante las diferentes avenidas asociadas a la DANA de septiembre y posteriores pasos de borrascas (Fig. 2). La clasificación de las limnimarcas se hizo con base en su carácter (erosivo o sedimentario), su composición o naturaleza (geológica, biológica o antrópica) y su tipología y disposición:

- Restos leñosos en márgenes (‘arribazones’)
- Restos leñosos atrapados en obstáculos naturales (árboles o rocas) o artificiales (vallados, edificios, postes eléctricos, mobiliario urbano…)
- Depósitos detríticos en zonas de flujo inefectivo (*slackwater deposits, SWD*) en ensanchamientos del cauce, remolinos, confluencias…
- Depósitos detríticos tras o ante obstáculos del cauce o elementos antrópicos
- Líneas de limos y arcillas en elementos naturales (árboles o rocas) o artificiales (muros y cristaleras)
- Restos de vegetación arbustiva o herbácea tumbada o inclinada por la corriente
- Marcas erosivas en los bancos de orilla, laderas y elementos antrópicos

El posicionamiento con precisión centimétrica se consiguió gracias al empleo de un receptor GPS con uso diferencial mediante sistema RTK.

Mediciones con distanciómetros, cálculo de área y cubicación volumétrica de formas de incisión y depósitos fluviales generados: Los elementos geomorfológicos singulares formados durante el evento, tales como barras y depósitos arenosos, escarpes o cicatrices erosivas, o canales y anchura del cauce, fueron medidos para estimar su área, espesor o volumen (Fig. 3). Para ello se emplearon distanciómetros láser (DISTO D8 de Leica), flexómetros y los receptores GPS en modo diferencial RTK.



FIGURA 2. *Medición de limnimarcas e indicadores de altura de lámina de agua.*

Medición detallada de parámetros de microformas, como longitud de onda y amplitud de rizaduras de corriente: Las pequeñas facetas o microformas erosivas y sedimentarias, como dunas o rizaduras (*ripples*), se midieron con flexómetros para estimar la longitud de onda y la amplitud de los trenes de ondulaciones (Fig. 3). Estos datos permitirán la estimación del calado y la velocidad de la corriente fluvial formadora.



FIGURA 3. *Recolección de datos (post-evento) de depósitos detríticos, microformas y acumulaciones de material leñoso*

Toma de muestras de los depósitos detríticos generados para análisis granulométrico y composicional: Algunos de los depósitos formados durante las riadas asociadas a la DANA de septiembre y otras perturbaciones posteriores, fueron muestreados para su análisis granulométrico, con el objetivo de obtener parámetros que puedan ser incorporados en modelos hidráulicos.

Toma de datos volumétricos y de altura de acumulaciones de material leñoso: Se midió la altura de grandes acumulaciones de material leñoso (en puentes y áreas con árboles robustos contiguos), así como el volumen de acumulaciones menores (en mobiliario urbano), con vistas a estimar el volumen de madera depositado por el evento con ayuda del procesamiento de información fotogramétrica en SIG.

UTILIDAD DE LOS DATOS POST-EVENTO

Tanto la recolección de información espacial, geológica, geomorfológica y de cambios generados en el sistema fluvial tras los eventos extremos (avenidas súbitas), como la subsiguiente toma de datos de eventos menores (borrascas) en los que el sistema aún tiene la capacidad de generar cambios morfológicos, son dos prácticas importantes que, eventualmente: i) permiten registrar y describir los efectos generados por eventos de baja frecuencia; ii) pueden contribuir al conocimiento de la dinámica fluvial (en episodios extremos y durante el retorno al estado habitual del sistema fluvial); y iii) pueden suministrar datos para reconstruir las características hidrodinámicas de las avenidas súbitas, estimar la magnitud de los eventos y validar los respetivos modelos matemáticos (posteriormente aplicados en el análisis de peligrosidad y riesgo por inundaciones).

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación ha sido posible gracias a la concesión de la ayuda para la contratación de personal investigador predoctoral en formación PIPF-2022/ECO-24879, financiada por la Comunidad de Madrid; y a las subvenciones 2022-2023 y 2023-2026 firmadas entre la DGA-MITERD y el CSIC, en la que se incluyen las actuaciones 20223TE003 y 20233TE012 (proyecto Tarquín del IGME-CSIC). Igualmente agradecemos a la UME, Protección Civil, Cuerpo de Bomberos CM, Ayuntamiento de Aldea del Fresno su colaboración durante la emergencia; y a Guillermina Garzón su valioso acompañamiento en campo.

REFERENCIAS

AEMET. (2023). Informe sobre el episodio meteorológico de precipitaciones intensas ocasionadas por una DANA durante los días 2, 3 y 4 de septiembre de 2023. Agencia Estatal de Meteorología.

Borga, M., Comiti, F., Ruin, I. y Marra, F. (2019): *Forensic analysis of flash flood response*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 6.

Surian, N., Righini, M., Lucía, A., Nardi, L., Amponsah, W., Benvenuti, M., Borga, M., Cavalli M., Comiti, F., Marchi, L., Rinaldi, M. y Viero, A. (2016). Channel response to extreme floods: Insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy. *Geomorphology, Volume 272.*

Detección automática y caracterización de desprendimientos usando datos sísmicos de una única estación. Validación conjunta con LiDAR y fotogrametría

Automatic detection and characterization of rockfalls using seismic data from a single station. Joint validation with LiDAR and photogrammetry

M. Tapia [1,2], M. Guinau[1], B. Telletxea[1], J. Martin[1], F. Meneses[1], M. Royán[1], X. Blanch[3], A. Abellán[4], D. Garcia-Sellés[1], G. Khazaradze[1], E. Suriñach[1,2] y J.M. Vilaplana[1]

1Grup RISKNAT, Institut Geomodels, University of Barcelona (UB), Faculty of Earth Sciences, Department of Earth and Ocean Dynamics, Barcelona, Spain. mguinau@ub.edu; bixteliguz@gmail.com; janamartincastells@gmail.com; francesc.meneses@gmail.com; manuvalver@gmail.com; dgarcia@ub.edu; gkhazar@ub.edu; emma.surinach@gmail.com; nue.vilaplana@gmail.com

2Laboratori d'Estudis Geofísics Eduard Fontserè, Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Spain. mtapia@iec.cat

3Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universit˙at Dresden, 01062 Dresden, Germany. xabierblanch@gmail.com

4Center for Research on the Alpine Environment (CREALP), Sion, CH1950, Valais, Switzerland. Antonio.ABELLAN@crealp.vs.ch

Palabras clave: Rockfalls, seismic data, LiDAR, photogrammetry, monitoring, Puigcercós

Resumen

Puigcercós (Cuenca de Tremp, NE España) es una localidad en la que se encuentra un escarpe de coronación de un antiguo deslizamiento con alta ocurrencia de desprendimientos y donde RISKNAT ha desarrollado un sitio experimental para desarrollo de técnicas y métodos de remote sensing y sísmica.

El estudio de la repetitividad de los procesos es esencial para la estimación de su peligrosidad y riesgo, pero a menudo los catálogos de desprendimientos son incompletos y no contienen series históricas representativas. A través de años de monitorización regular con LiDAR y con fotogrametría aplicados en Puigcercós, se ha podido realizar estudios temporales sobre el mecanismo de caída de rocas e indicadores precursores que queremos mejorar con monitorización sísmica de registro continuo de una única estación. Por ejemplo, hemos podido caracterizar caídas de rocas de volúmenes muy pequeños con resolución necesaria para el estudio de caídas precursoras y descripción de la dinámica de los desprendimientos. Por otro lado, estudiaremos características sísmicas en tiempo/frecuencia con el soporte de datos LiDAR y fotogrametría para poder implementar un sistema de alerta temprana no vigilada discerniendo entre otros fenómenos naturales o artificiales.

Los autores agradecen a los proyectos MINEICO CHARMA(cgl2013-40828-r), PROMONTEC(cgl2017-84720-r,aei/feder,ue) y al Global Geopark de la Unesco ConcaTremp-Montsec.

Abstract

Puigcercós (Tremp Basin, NE Spain) is a locality where there is a head escarpment of an ancient landslide with a high-frequency rockfall activity and where RISKNAT has developed an experimental site for the development of remote sensing and seismic techniques and methods.

The study of the repeatability of processes is essential for estimating their hazard and risk, but rockfall catalogues are often incomplete and do not contain representative historical series. Through years of regular monitoring with LiDAR and photogrammetry applied in Puigcercós, it has been possible to carry out temporal studies on the mechanism of rockfall and precursor indicators that we want to improve with continuous seismic monitoring of a single station. For example, with this single station we have been able to characterize rock falls of very small volumes with the resolution necessary for the study of precursor falls and description of the complex dynamics of the landslides. On the other hand, we will study seismic time/frequency characteristics with the support of LiDAR and photogrammetry to implement an unmonitored early warning system discerning between other natural or artificial phenomena.

Authors thank CHARMA(cgl2013-40828-r), PROMONTEC(cgl2017-84720-r,aei/feder,ue) Spanish-MINEICO projects and Unesco Global Geopark ConcaTremp-Montsec.

Mapas de imagen en relieve rojo-azul y su aplicación a la cartografía de peligros geológicos.

Red-Blue Relief Image Maps and application to geohazards mapping.

G. Tomás[1,2], H. Perea[1] y A. Canari[1]

1 BSCI, Institut de Ciències del Mar-CSIC. Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49. 08003, Barcelona.
georgina.tomas@hotmail.com, hperea@icm.csic.es, acanari@icm.csic.es
2 Dep. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, U de Barcelona. c/ Martí Franquès s/n, 08028 Barcelona.

Palabras clave: Red-Blue Relief Image Maps, Mapas de relieve, Visualización del relieve, Cartografía de peligros.

Resumen

En los últimos años, se han empleado diversas técnicas para visualizar el relieve a partir de modelos digitales de elevación (DEM) para identificar y mapear diversas características geomorfológicas. Los métodos tradicionales tienen limitaciones inherentes a la visualización de topografía. En este estudio, presentamos los mapas de imagen en relieve rojo-azul (RBRIM) como un método de visualización cuantitativa, que ofrece una alternativa a las técnicas convencionales. Los RBRIM aprovechan tres atributos topográficos clave (pendiente, concavidades y convexidades) superpuestos en distintas capas y presentados en una imagen unificada. Las concavidades y convexidades se derivan del atributo de Apertura Topográfica, calculado en base a dos parámetros, el límite radial de búsqueda y el número de secciones relativas a una celda DEM específica. El objetivo principal de esta investigación es determinar los parámetros óptimos para el atributo de Apertura Topográfica que producen la visualización más efectiva cuando se aplican a mapas RBRIM. Nuestros resultados revelan que un límite radial de 5 píxeles en el DEM mejora significativamente la visualización de los cambios de relieve. Por otro lado, las variaciones en el número de secciones no parecen tener un impacto significativo en la visualización de datos. En conclusión, nuestro estudio demuestra que RBRIM sirve como una herramienta poderosa para mapear características geomorfológicas y riesgos geológicos, mostrando el potencial de su aplicación en estos campos de investigación.

Abstract

In recent years, various techniques for visualizing relief from Digital Elevation Models (DEMs) have been employed to identify and map diverse geomorphological features. Traditional methods have inherent limitations in topography visualization. In this study, we introduce the Red-Blue Relief Image Maps (RBRIM) as a quantitative visualization method, offering an alternative to conventional techniques. RBRIMs leverage three key topographic attributes (slope, concavities, and convexities) superimposed on distinct layers and presented in a unified image. The concavities and convexities are derived from the Topographic Openness attribute, calculated based on two parameters: the radial limit of research and the number of sections concerning a specific DEM cell. The primary objective of this research is to determine the optimal parameters for the Topographic Openness attribute that yield the most effective visualization when applied to RBRIM maps. Our results reveal that a radial limit of 5 pixels in the DEM significantly enhances relief changes in visualization. Interestingly, variations in the number of sections do not seem to have a significant impact on data visualization. In conclusion, our study demonstrates that RBRIM serves as a powerful tool for mapping geomorphological features and geohazards, showcasing its substantial potential in these research fields.

La lluvia como desencadenante de inestabilidades de ladera en el NO de la Península Ibérica ¿Qué sabemos?

Rainfall as a trigger for slope instabilities in the NW of the Iberian Peninsula. What do we know?

P. Valenzuela[1], J. Remondo[2], M.J. Domínguez-Cuesta[3], S. Pereira[4], T. Vaz[5], T. Bornaetxea[6], V. Rivas[7], A. González-Díez[2], J. Bonachea[2], J.L. Zezêre[5], C. Bateira[8], J. Sánchez-Espeso[9], E. San Millán[2] y L. Francos[3]

1 Área de Geodinámica Externa, Dpto. de Geografía y Geología, Univ de León 24004 León. pvalm@unileon.es
2 Dpto. de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Univ. de Cantabria 39005 Santander. juan.remondo@unican.es, alberto.gonzalez@unican.es, jaime.bonachea@unican.es, esanmi@gmail.com
3 Dpto. de Geología, Univ. de Oviedo 33005 Oviedo. dominguezmaria@uniovi.es, francostrevias@hotmail.com
4 CEG, Univ. de Lisboa; CEGOT, Dpto. de Geografía, FLUP, Univ. do Porto 4150-564 Porto. sspereira@letras.up.pt
5 CEG, IGOT, Univ. de Lisboa 1600-276 Lisboa. tvaz@campus.ul.pt, zezere@campus.ul.pt
6 Dpto. de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Univ. del País Vasco 01006 Vitoria-Gasteiz. txomin.bornaetxea@ehu.eus
7 Dpto. de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio, Univ. de Cantabria 39005 Santander. maria.rivas@unican.es
8 CEG, Univ. de Lisboa; Dpto. de Geografía, FLUP, Univ. do Porto 4150-564 Porto. cbateira@letras.up.pt
9 Dpto. de Ing. Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica, Univ. de Cantabria 39005 Santander. javier.sanchez@unican.es

Palabras clave: Inestabilidad de ladera, Lluvia, Umbral, Norte de Portugal, Norte de España.

Resumen

La lluvia es el principal factor desencadenante de inestabilidades de ladera en el norte de Portugal y España. Varios grupos de investigación (Bornaetxea et al., 2018; Valenzuela et al., 2019; Vaz, 2021) han caracterizado este factor mediante el cálculo de más de 100 umbrales empíricos regionales y locales. Sin embargo, la disparidad de datos y metodologías utilizadas por los diferentes autores dificulta la comparación directa de las ecuaciones obtenidas.
En consecuencia, el presente trabajo se centra en el análisis de las poblaciones originales de pares de datos (precipitación acumulada-duración) que caracterizan cada ocurrencia individual de una inestabilidad. Con este fin, se han seleccionado cuatro poblaciones de condiciones desencadenantes de inestabilidades, representativas del norte de Portugal y de Asturias, Cantabria y Gipuzkoa (España). La comparación de las ecuaciones de mejor ajuste lineal de cada población revela una tendencia general en el área de estudio, sugiriendo una mayor importancia relativa de la lluvia acumulada frente a la duración para el desencadenamiento de inestabilidades.

Abstract

Rainfall is the main triggering factor for the occurrence of landslides in northern Portugal and Spain. Several research groups (Bornaetxea et al., 2018; Valenzuela et al., 2019; Vaz, 2021) have characterized this factor by calculating over 100 regional and local empirical thresholds. However, the disparity of data and methods used by the different authors hampers the direct comparison of the obtained equations.
Consequently, the present work focuses on the analysis of the original data pair populations (accumulated precipitation - duration) that characterize each individual landslide occurrence. For this purpose, four datasets of landslide - triggering conditions, representative of northern Portugal and Asturias, Cantabria and Gipuzkoa (Spain) were selected. The comparison of the best linear fit equations calculated for each dataset reveals a general trend in the study area, suggesting a higher relative importance of the accumulative rainfall compared to duration for the triggering of landslides.

Referencias

Bornaetxea, T., Ormaetxea, O., Antigüedad, I. y Melillo, M. (2018). En: *Metodología de Análise de Riscos através de Estudos de Casos* (L. Luorenço y A. Vieira, Coords.). Associaçao Portuguesa de Riscos, Prevença e Segurança, 201-222.
Valenzuela, P., Zêzere, J.L., Domínguez-Cuesta, M.J. y Mora, M.A. (2019). *Landslides*, 16, 1285-1300.
Vaz, T. (2021). Tesis Doctoral, Univ.de Lisboa, 264 p.

Modelización morfodinámica y de transporte de material leñoso durante la avenida del 2019 en el río Francolí (Tarragona).

Modelling of morphodynamics and large wood transport during the 2019 flash flood in the Francolí River (Tarragona).

LL. Valera-Prieto[1], M. Sanz-Ramos[2], V. Ruiz-Villanueva[3,4]

1 RISKNAT Group, GEOMODELS, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Barcelona 08028, Spain. llanosvalera@ub.edu
2 Polytechnic University of Catalonia (UPC Barcelona-Tech) - International Center of Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Flumen Research Institute, Barcelona, marcos.sanz-ramos@upc.edu
3 University of Bern, Institute of Geography, Hallerstrasse 12, CH-3012, Bern Switzerland. virginia.ruiz@unibe.ch
4 University of Lausanne, Faculty of Geoscience and Environment, Institute of Earth Surface Dynamics, Lausanne, Switzerland

Palabras clave: Peligrosidad de inundación, transporte de sedimentos, Iber

Resumen

Las inundaciones repentinas son frecuentes en la región mediterránea. En octubre de 2019, la cuenca alta del río Francolí registró 293 mm de precipitación en 24 h que generaron escorrentías rápidas y destructivas. Numerosas infraestructuras fueron afectadas (ej. 4 puentes colapsaron), 6 personas perdieron la vida y se desencadenaron cambios bio-geomorfológicos significativos. La erosión generalizada arrancó una gran cantidad de árboles, que fueron transportados y depositados. El objetivo fue explorar los factores responsables de los cambios bio-geomorfológicos y sus impactos, combinando simulaciones numéricas y observaciones post-evento en un tramo de 1,6 km en la zona de L'Espluga de Francolí. Se utilizó Iber, un modelo que permite simular hidrodinámica, morfodinámica y transporte de madera. Se diseñaron 31 escenarios para explorar el papel del transporte de sedimentos y madera, así que como su acumulación y deposito en puentes. Se analizaron a nivel espacial y temporal tres variables (calados, velocidades y diámetro crítico) en los escenarios sólo con agua y en los escenarios con agua y carga sólida, también se analizaron los patrones de erosión/sedimentación y la dinámica del material leñoso. Los resultados obtenidos permiten reconstruir los cambios observados, y cuantificar la influencia del transporte de la carga sólida en la peligrosidad, comparando escenarios solo con agua versus agua, sedimento y material leñoso. El modelo reproduce también el taponamiento de los puentes, lo que podría explicar por qué los niveles de agua observados en campo en algunos puntos corresponderían a caudales con un periodo de retorno mayor. Esta investigación permitirá mejorar la evaluación de la peligrosidad por inundación.

Abstract

Flash floods are frequent in the Mediterranean region. In October 2019, the upper Francolí River catchment experienced an extraordinary rainfall of 293 mm in 24 h, which caused a rapid and devastating runoff. Multiple infrastructures were affected (e.g., 4 bridges collapsed), six lives were lost, and notable bio-geomorphological changes occurred. Erosion of the channel and floodplain uprooted a large number of trees, which were transported and deposited. The aim of the study was to explore the factors responsible for the bio-geomorphological changes via combined numerical simulations and post-event observations in a 1,6 km stretch in L'Espluga de Francolí area. We used Iber, a hydrodynamic modelling software, which allows us to simulate morphodynamics and wood transport. We designed 31 scenarios to explore the role of sediment and wood transport and their accumulation and deposition in bridges. Spatial and temporal analysis was conducted on three variables (water depth, velocities, and critical diameter) in scenarios with water and the scenarios with water and solid load, erosion/sedimentation patterns and large wood dynamics were analysed as well. The results obtained allow reconstructing the observed post-flood changes and quantifying the influence of solid load transport on the hazard, e.g. by comparing the water-only simulations with the water, sediment, and woody material scenarios. The model reproduces also the clogging of bridges, which could explain why the water levels observed at field at some points correspond to flows with a higher return period. This research will improve the assessment of flood hazards.

Los icnofósiles de la mezquita-catedral de Córdoba: una herramienta excepcional para el conocimiento del Tortoniense de la franja Cuenca del Guadalquivir-Ossa Morena (España).

The ichnofossils of the Córdoba´s Mosque-Cathedral: an outstanding tool for the Tortonian knowledge of the Guadalquivir Basin-Ossa Morena edge (Spain).

J. Aguilar de Dios[1], J. A. Gámez Vintaned[2], E. Liñán[2], M. G. Dies Álvarez[3] y E. Mayoral[4,5]

1 C/ Cantueso, 31. E-14012 Córdoba, Spain. pepeaddl@gmail.com
2 Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias-IUCA, Universidad de Zaragoza, E-50009 Zaragoza, Spain. gamezv@gmail.com
3 Departamento de Didácticas Específicas – IUCA. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12. E-50009 Zaragoza, Spain. medies@unizar.es
4 Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Avda. 3 de Marzo, s/n. E-21071 Huelva Spain. mayoral@uhu.es
5 CCTH - Centro de Investigación Científico Tecnológico, Universidad de Huelva. E-21007 Huelva, Spain. mayoral@uhu.es

Resumen: La mezquita-catedral de Córdoba (786-1757), Patrimonio Mundial de la UNESCO desde 1984, fue construida con miles de sillares extraídos de las calizas del Mioceno Superior (Tortoniense) procedentes de los afloramientos situados en la margen derecha del río Guadalquivir sobre el borde oriental de la Zona de Ossa-Morena. Destacan por su singularidad los numerosos y bien conservados icnofósiles marinos, ahora estudiados *in situ* y *ex situ* lo que permite un mejor conocimiento de la icnofacies presente.
Se determinaron los icnogéneros *Ophiomorpha*, *Thalassinoides y Rhizocorallium* que, poco visibles en los afloramientos *in situ*, se encuentran bien expuestos y conservados en los sillares del monumento. Representan la primera icnoasociación descrita en el Mioceno superior de la Provincia de Córdoba y del curso medio del río Guadalquivir que se incluye aquí en la icnofacies de *Cruziana* e icnosubfacies de *Ophiomorpha nodosa*.
La mezquita-catedral, por su excepcional contenido paleoicnológico viene así a constituir una valiosa y monumental exposición paleontológica al aire libre, susceptible de habilitarse para usos educativos y de turismo natural. Su nueva consideración como un excepcional recurso natural viene a sumarse al gran valor religioso, arquitectónico e histórico de este monumento Patrimonio Mundial y crisol de culturas.

Palabras clave: Icnofósiles, Mioceno, Patrimonio Mundial UNESCO, Patrimonio Paleontológico.

Abstract: *The Mosque-Cathedral of Córdoba (786-1757) is one of the most visited monuments in Spain and it was declared one of the UNESCO World Heritage sites in 1984. It was built with thousand ashlars worked from the Upper Miocene (Tortonian) outcrops from the bioclastic limestone with terrigenes located in the right bank of the Guadalquivir River on the Ossa-Morena eastern edge.*
The in situ and ex situ studies of the well-preserved marine ichnofossils allowed a better knowledge of the ichnofacies.The ichnogenera Ophiomorpha, Thalassinoides and Rhizocorallium have been determined. Although they not so spatially visible in situ in the outcrops, they are well exposed in the ashlars of the monument representing the first Upper Miocene ichnoassociation described in the middle course of the Guadalquivir River (Provinces of Córdoba, Jaén and Sevilla). It is included here in the Cruziana ichnofacies and Ophiomorpha nodosa ichnosubfacies.
The Mosque-Cathedral due to its exceptional palaeoichological content, constitutes an impressive and monumental palaeontological open-air exhibition that it would be enable for both scientific and didactic uses as well as natura tourism. Its new consideration as an exceptional natural resource adds to the great religious, architectural and historical value of this World Heritage monument and melting pot of cultures.

Key words: *Ichnofossils, Miocene, UNESCO World Heritage, Palaeontological Heritage.*

INTRODUCCIÓN

Los alrededores de la ciudad de Córdoba, por su privilegiada ubicación geológica a caballo entre la Zona de Ossa-Morena y la Depresión del Guadalquivir, suministraron material constructivo, muy variado y fosilífero, que se puede apreciar en su casco antiguo declarado Patrimonio Mundial en 1994 (Barrios-Neira et al., 2003). De entre todos los monumentos históricos, el más emblemático a nivel internacional es la mezquita-catedral (786-988; 1266-1757) declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1984. Aguilar de Dios et al. (2021) proponen su potencial uso didáctico dentro

de un itinerario geológico y paleontológico, para hacer un recorrido a lo largo de la historia de la vida en la zona.

El interior del monumento contiene rocas ornamentales de diferentes facies del Cámbrico inferior de la Sierra de Córdoba con secciones de arqueociatos, microfósiles conchíferos, trilobites, calcimicrobios (*Epiphyton* y *Renalcis*), estromatolitos, oolitos y oncolitos; calizas organógenas atribuidas al Carbonífero; así como facies *Ammonítico Rosso* del Jurásico superior-Cretácico inferior de la Cordillera Bética cordobesa que presentan secciones de belemnites, braquiópodos, rudistas y gasterópodos (Aguilar de Dios et al., 2021), actualmente en estudio.

El muro exterior de la Mezquita-Catedral y el patio de los Naranjos, de los que se ocupa este trabajo, fueron edificados con sillares fosilíferos extraídos de las calizas bioclásticas con terrígenos del Mioceno superior (sensu Liñán Guijarro, 1978), también conocidas como facies miocenas de borde y biocalcarenitas (Montealegre, 1996). En bastantes bloques se observan icnofósiles bien conservados.

El propósito de este trabajo es realizar el estudio de los icnofósiles que pueden visualizarse en el exterior del monumento, destacando aquéllos que por su singularidad y preservación puedan ser utilizados como recurso didáctico y turístico; al tiempo que se hace una primera relación de los ejemplares *ex situ* del monumento con su correspondiente registro in *situ* en la sección estratigráfica de referencia próxima a la ciudad que también es estudiada. Para tener una primera impresión sobre los posibles puntos de extracción de los sillares, se ha realizado una revisión visual de las canteras históricas del Mioceno de los alrededores de Córdoba, reseñadas previamente en numerosos trabajos (ej. Liñán Guijarro, 1978, Montealegre, 1996).

MARCO GEOLÓGICO

El Mioceno de la Sierra de Córdoba forma parte de la Cuenca del Guadalquivir-Golfo de Cádiz (sensu Martínez del Olmo y Martín, 2016), una franja situada entre el borde sur del Margen Sudibérico y los afloramientos del Subbético Olistostrómico que preceden en dirección sur a los alóctonos del propio Subbético; por lo que es considerada la cuenca miocena antepaís de la Cordillera Bética (Portero García y Álvaro López, 1984).

Los materiales de la sierra se asientan sobre el borde occidental la Zona de Ossa-Morena en afloramientos escalonados por fallas de pequeño salto que van descendiendo hacia el cauce del río Guadalquivir constituyendo una estructura de *horst* y *graben* cuyos bloques están limitados por fallas paralelas al curso del río (Liñán Guijarro, 1978, p. 31 y 125).

En la estratigrafía de los materiales constructivos del Mioceno superior de la margen derecha se han diferenciado dos formaciones (Liñán Guijarro, 1978) que son por orden estratigráfico: la Formación Los Escalones y la formación Carbonatada. Esta última está constituida por un conjunto de calizas bioclásticas con terrígenos y otro superior de margas azuladas, del Tortoniense superior, con foraminíferos planctónicos. Las calizas bioclásticas con terrígenos conforman los sillares de la mezquita-catedral.

PALEOICNOLOGÍA

La presencia de bioturbación en la formación Carbonatada es citada por Liñán Guijarro (1978) en la Sierra de Córdoba y por Roldán (1996) en el área de Almodóvar-Posadas. Rojas Molina (1996) cita la presencia de una intensa bioturbación en los afloramientos de La Albaida, Melero Alto, Barrio El Naranjo, Carrera del Caballo, Campiñuela y Las Albarizas, situados en la parte baja de la Sierra de Córdoba, que asigna a *Thalassinoide*s isp.

En este trabajo, se analizan varios centenares de sillares con icnofósiles de la fachada exterior de la mezquita-catedral y del Patio de Los Naranjos, escogiéndose para este estudio los ejemplares más singulares y mejor conservados; al tiempo que se comparan con los registrados (*in situ*) en la secuencia estratigráfica tipo de la Sierra de Córdoba.

En los sillares, los icnofósiles resaltan por la dureza de las paredes peletoidales de las madrigueras y también por la de su relleno cuando está formado por material calcáreo, permitiendo su estudio espacial *de visu*, sin necesidad de seccionar la roca que los contiene.

Se han determinado los icnogéneros *Ophiomorpha*, *Thalassinoides* y *Rhizocorallium* de los cuales sólo los dos primeros se han reconocido en los afloramientos *in situ*.

La icnoasociación *Ophiomorpha-Thalassinoides* caracteriza la icnofacies de *Cruziana* en medios de alta energía y, dentro de ella, se correspondería con depósitos distales (*lower shoreface*)-*upper offshore* (Buatois y Mángano, 2011). Los datos icnológicos son congruentes con la paleoecología de las diferentes asociaciones fósiles de organismos con esqueleto mineralizado (algas coralinas, foraminíferos bentónicos, bivalvos, braquiópodos, equínidos, escafópodos, briozoos, escualos y rayas) presentes en los estratos con bioturbación.

Los estudios urbanos y de campo nos permiten asignar estos estratos a la icnosubfacies de *Ophiomorpha nodosa* por ser el icnotaxón mayoritario. Ésta se desarrolla fundamentalmente en el tramo II de la formación Carbonatada, ampliamente explotado en todas las canteras históricas.

Icnoespecie *Ophiomorpha nodosa* Lundgren, 1891
Fig. 1.1

Descripción: Madrigueras cilíndricas, subverticales a inclinadas o subhorizontales, dispuestas de forma aislada o en pequeños grupos densamente empaquetadas. La longitud visible de las madrigueras varía entre 8 y 23 cm,

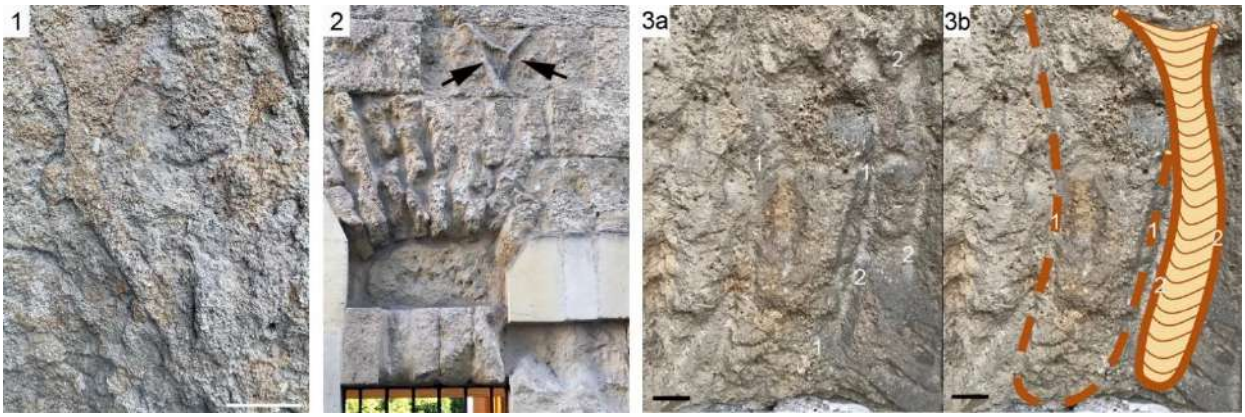


FIGURA 1. 1. *Sección longitudinal de* Ophiomorpha nodosa. *Fachada este. Escala de la barra: 5 cm. 2.* Thalassinoides *ichnosp. indet.(flechas negras).Fachada norte. 3. Dos ejemplares de* Rhizocorallium *ichnosp. indet. 3a, vista al natural y 3b, reconstrucción. El de la izquierda (1) mal conservado y seccionado por el ejemplar de la derecha (2). Palacio Episcopal a la altura del postigo del Palacio en la fachada oeste. Escala de la barra: 2 cm.*

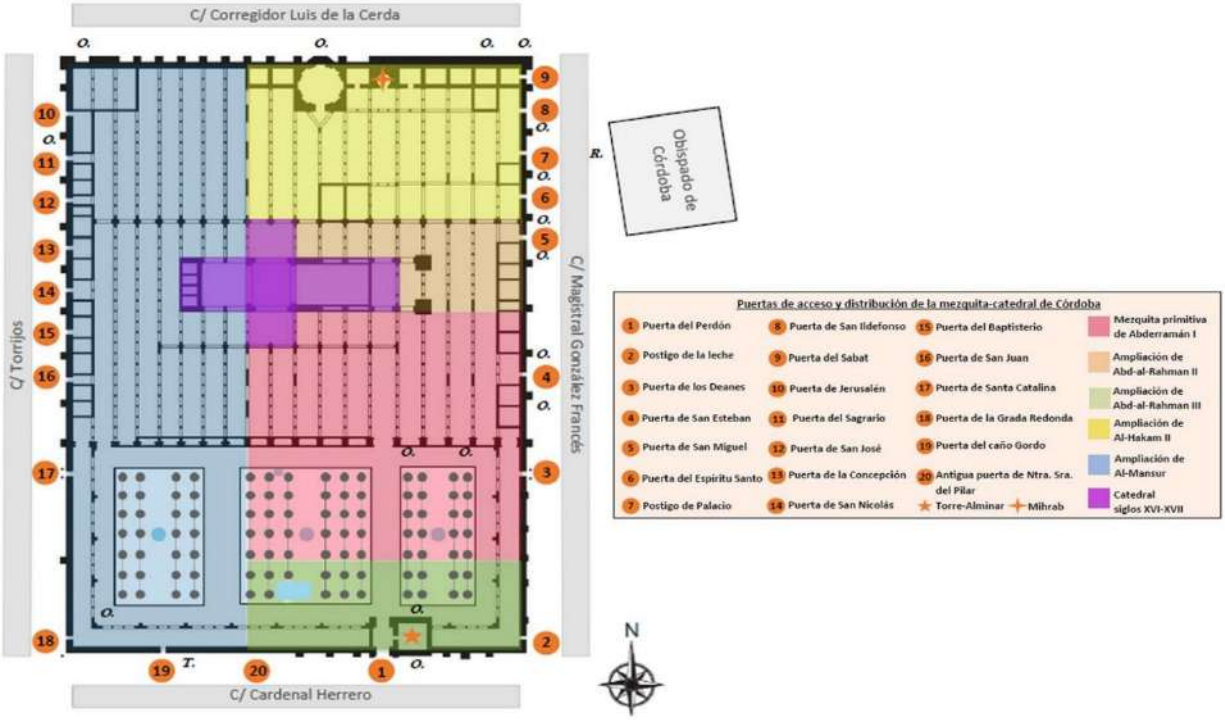


FIGURA 2. 1. *Localización de los ejemplares de la mezquita-catedral estudiados en este trabajo.* O, *Ophiomorpha*, T, *Thalassinoides y* R, *Rhizocorallium*..

con un diámetro entre 1,4 y 2 cm. Algunas de estas madrigueras se bifurcan en forma de Y, se ensanchan localmente, cerca o en los puntos de ramificación, alcanzando un diámetro de 3-4 cm. Paredes interiores lisas. La superficie exterior de la madriguera, inicialmente revestida por los pellets, se encuentra en la mayoría de los ejemplares, disuelta, formando un surco estrecho con una anchura de entre 1 y 2 mm. El relleno de la madriguera suele no tener estructura, y es similar a la matriz calcarenítica circundante, a veces con un grano más fino. Estas madrigueras, son producidas actualmente por Callianassidos, un grupo de crustáceos decápodos marinos que construyen túneles en los fondos marinos consolidando su pared con una capa de pellets cuya morfología se usa para diferenciar distintas especies. Representa la primera cita de este icnogénero en el Mioceno (Tortoniense superior) del curso medio del Guadalquivir.

Icnoespecie *Thalassinoides* ichnoesp. indet. (Fig. 1.2)

Descripción: Madrigueras aisladas, cilíndricas, con la típica bifurcación en forma de Y o T, con un diámetro entre 4,2 y 6,7 cm y una longitud visible entre 50,5 y 59 cm.

Sin estructura interna, con un relleno similar al de la roca encajante. Producida por crustáceos, es interpretada como una estructura de fodinichnia-domichnia con relleno pasivo. Se registra desde el Triásico.

Icnoespecie *Rhizocorallium* ichnoesp. indet. (Fig. 1.3a-b)

Descripción: Tubos subverticales en forma de U normal con limbos más o menos paralelos o divergentes en su parte proximal, estrechos, con una anchura que varía entre 0,6 y 1 cm. Encierran una zona ocupada por conexiones (*spreite*) protrusivas que consisten en láminas muy finas, que se disponen subparalelas a la forma de U distal del tubo, curvándose en ocasiones hacia arriba a modo de una J. Los limbos de la U están separados entre 1,5 y 4,7 cm en la zona proximal y entre 3-4 cm en la zona distal. La longitud de los tubos en U varía entre 18 y 20 cm. Estos tubos presentan un relleno más oscuro, probablemente más rico en materia orgánica y quizá de origen peletoidal. No existe consenso sobre el productor o productores de *Rhizocorallium*, aunque la mayoría de los autores se inclinan por los crustáceos.

Un esquema con la situación de los icnoespecímenes más representativos de las cuatro fachadas del recinto y del Patio de los Naranjos, puede verse en la Figura 2, la cual permite su utilización como recurso didáctico y representa el embrión para confeccionar futuros itinerarios paleontológicos en los que se incluyan otros grupos fósiles presentes en el monumento.

PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES

Aunque existen canteras en los municipios cercanos de Alcolea, Villafranca y Almodóvar, los bloques de la mezquita-catedral, debieron proceder fundamentalmente de las canteras más próximas a Córdoba, incluidas hoy dentro de su casco urbano; y que son de este a oeste, las de La Campiñuela, Carrera del Caballo, Barrio del Naranjo, El Brillante-La Arruzafa, El Patriarca y La Albaida; sin descartar las de los alrededores de Medina Azahara, empleadas mayoritariamente en la construcción de esta ciudad palatina.

Un análisis de los materiales de estas canteras permite concluir que las fachadas norte y oeste del monumento contienen bloques calizos del tramo inferior de la formación carbonatada con numerosos cantos (calcirruditas); tentativamente procedentes de las canteras del Barrio del Naranjo, y quizá también de la cantera de El Patriarca.

Los sillares del tramo medio de la formación carbonatada (tramo II) son mayoritarios en el monumento y ricos en icnofósiles. Su procedencia geográfica y estratigráfica debió ser más variada que la del tramo inferior (tramo I), dada la variedad de biofacies presentes y el largo periodo de ampliaciones sucesivas que tuvo el monumento.

CONCLUSIONES

Se estudia la icnoasociación presente en los sillares exteriores de la mezquita-catedral de Córdoba y se relaciona con la que se encuentra en la formación Carbonatada del Mioceno superior de los afloramientos de la Sierra de Córdoba. Del estudio se deduce que la variedad de icnofósiles en el Mioceno de la Sierra de Córdoba es baja y que los materiales constructivos del monumento contienen numerosos especímenes de madrigueras de las que se han determinado: *Ophiomorpha nodosa* Lundgren 1891, *Rhizocorallium* icnoesp. indet. y *Thalassinoides* icnoesp indet., con *Ophiomorpha* como icnogénero predominante; resultando ser las primeras citas de *Ophiomorpha* y *Rhizocorallium* en el Tortoniense superior de la Cuenca del Guadalquivir-golfo de Cádiz en la provincia de Córdoba y también en los afloramientos miocenos del borde de la Sierra en el curso medio del río Guadalquivir (provincias de Jaén, Córdoba y Sevilla). Los organismos productores de estos icnofósiles se relacionan con crustáceos decápodos (Callianassidos), organismos vermiformes, gusanos anélidos y probablemente peces.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido publicado en el marco del proyecto PID2019-104625RB-100, financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y ha contado con el apoyo financiero de la Junta de Andalucía al Grupo de Investigación RNM276 y del Centro Científico-Tecnológico de Huelva (CCTH).

REFERENCIAS

Aguilar de Dios, J.E., Liñán, E. y Dies, M.E. (2021): La Mezquita-Catedral de Córdoba como herramienta en la enseñanza formal. En: *XXXVI Jornadas de la SEP. Comunicaciones sobre la enseñanza de la Paleontología. Lucas Mallada*, 23: 87-88.

Barrios-Neira, J., Montealegre, L., Nieto, M. y Palma, J. (2003): Contribución al estudio litológico de los materiales empleados en monumentos de Córdoba de distintas épocas. *Arqueología de la Arquitectura*, 2: 47-53.

Buatois, L.A. y Mángano, M.G. (2011): *Ichnology: Organism-substrate interactions in space and time*. Cambridge University Press, Cambridge, 744.

Liñán Guijarro, E. (1978): *Bioestratigrafía de la Sierra de Córdoba.* Tesis doctoral. Univ. de Granada, 212 p.

Lundgren, B. (1891): Studier öfver fossilförande lösa block. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 13(2): 111-121.

Montealegre, L. (1996): Geología del borde norte de la Depresión del Guadalquivír, *Revista de la Asociación Cordobesa de Mineralogía y Paleontología* (ACMIPA), 30: 13-16.

Portero García, J.M. y Álvaro López, M. (1984): La depresión del Guadalquivir, cuenca de antepaís durante el Neógeno: génesis, evolución y relleno final. En: *I Congreso Español de Geología*. Comunicaciones, III: 241-252.

Rojas Molina, J.A. (1996): Estudio de los articulados (Phyllum Tentaculata, Clase Brachiopoda) en materiales neógenos de la Provincia de Córdoba, *Revista de la Asociación Cordobesa de Mineralogía y Paleontología* (ACMIPA), 30: 28-32.

Roldán, F.J. (1996): El Mioceno de Córdoba, su evolución paleogeográfica. *Revista de la Asociación Cordobesa de Mineralogía y Paleontología (ACMIPA)*, 30: 4-12.

Un yacimiento de preservación excepcional: El Cerro de los Batallones

An exceptional fossil site: El Cerro de los Batallones

P.M. Carro-Rodríguez[1], M.S. Domingo[1], J. Abella[2], Ó. Caballero-Chordá[2,3], J.L. Cantalapiedra[3], L. Domingo[1], S. Fraile[3], B.A. García Yelo[4], A.R. Gómez Cano[5], E. Galli[1], V. Hernández-Ballarín, D. Hontecillas[6,7], R. López-Antoñanzas[8], P. López-Guerrero, D.M. Martín-Perea[1], I. Menéndez[9], A. Oliver[10], A. Quesada[1], M. Ríos[11,12], Ó. Sanisidro[13], D. Sanz-Pérez[1], L.R. Sualdea[1], A. Valenciano[1], E. Cantero[3], M. Hernández Fernández[1], M.Á. Álvarez-Sierra[1], P. Peláez-Campomanes[3], J. Morales[3]

1 Dpto. GEODESPAL, Fac. CC Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, España patcarro@ucm.es
2 Dpto. Botánica y Geología, Universidad de Valencia, España
3 Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC), Madrid, España.
4 Dpto Didáctica Ciencias Experimentales, Sociales y Matemáticas, Fac. Educación Universidad Complutense de Madrid, España
5 Transmitting Science, Madrid, España
6 CONICET, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
7 MORPHOS, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
8 Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier, Francia
9 Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, Berlín, Alemania
10 Mapas Lab, Grupo TERRA, Centro de Investigación Mariña (CIM), Universidade de Vigo, Vigo, España.
11 Department of Earth Sciences Universidade NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal
12 Museu da Lourinhã, R. João Luís Moura, 95, 2530-158, Lourinhã, Portugal
13 Dpto. Ciencia de la Vida, Universidad de Alcalá, Madrid, España

Palabras clave: conservación excepcional, patrimonio paleontológico, lugar de interés geológico

Resumen

El Cerro de los Batallones es un conjunto de 9 yacimientos paleontológicos que se encuentra en el centro de la Península Ibérica. Incluidos en la Cuenca de Madrid, tienen una edad aproximada de 9 Ma. Fueron descubiertos en 1991, en 2001 fueron nombrados BIC de la Comunidad de Madrid y en 2016 el IGME los incluyó en el catálogo nacional como LIC. Desde su descubrimiento, se han hallado miles de elementos anatómicos de diversidad de grupos. Entre ellos, destacan los mamíferos, ya que se trata del grupo mejor representado. En este conjunto de yacimientos destaca Batallones-10, por la relevancia que alcanza su registro de grandes herbívoros y micromamíferos dentro de la asociación faunística. Entre los hallazgos más relevantes de Batallones-10 se encuentran individuos nonatos del género *Hipparion*, cráneos completos del hámster *Hispanomys moralesi* o esqueletos prácticamente completos de individuos de *Decennatherium rex*. El Cerro de los Batallones destaca por la abundancia, conservación y preservación de los restos hallados, convirtiéndose en uno de los yacimientos más importantes del Mioceno a nivel mundial.

Abstract

The Cerro de los Batallones is a group of 9 paleontological sites in the Iberian Peninsula's centre. Located in the Madrid Basin, they are approximately 9 million years old. Discovered in 1991, they were designated as Cultural Interest Sites (BIC) by the Comunidad de Madrid in 2001, and in 2016, the IGME included them in the national catalogue as LIC (Sites of Geological Interest). Since their discovery, thousands of anatomical elements from various groups have been found. Among them, mammals stand out as the best-represented group. Within this group of sites, Batallones-10 stands out for the relevance of its record of large herbivores and micromammals within the faunal association. Among the most relevant findings of Batallones-10 are unborn individuals of the genus *Hipparion*, complete skulls of the hamster *Hispanomys moralesi*, or practically complete skeletons of individuals of *Decennatherium rex*. The Cerro de los Batallones stands out for the abundance, conservation, and preservation of the remains found, becoming one of the most important Miocene sites worldwide.

Paleodiversidad y bioestratigrafía de trilobites del Marianiense (Serie 2 del Cámbrico) de la Zona de Ossa-Morena, SO de Iberia

Trilobite paleodiversity and biostratigraphy from the Marianian (Cambrian Series 2) of the Ossa-Morena Zone, SW Iberia

L. Collantes[1]

1 Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal. luis.collantes.geo@gmail.com

Palabras clave: Cámbrico, paleontología, Trilobita, sistemática, bioestratigrafía.

Resumen

En el presente trabajo se muestra la paleodiversidad e implicaciones bioestratigráficas de los trilobites del Marianiense de la Zona de Ossa-Morena, en el suroeste del Macizo Ibérico. El Piso Marianiense se correlaciona a nivel internacional con la Serie 2 del Cámbrico, una división cronoestratigráfica a escala global pendiente de ser formalizada. Hoy en día, la subdivisión del Marianiense sigue siendo problemática, habiendo sufrido varias modificaciones conceptuales desde su erección original. Este Piso se caracteriza por una baja diversidad y abundancia de trilobites, y su utilidad a lo largo de la Península Ibérica es aún objeto de debate. La revisión de los trilobites del Marianiense de la Zona de Ossa-Morena ha permitido reconocer un total de 23 especies: *Acanthomicmacca*? sp., *Alanisia guillermoi*, *Andalusiana cornuta*, *Atops calanus*, *Callavia choffati*, *Calodiscus* cf. *lobatus*, *Chelediscus garzoni*, *Delgadella souzai*, *Eops eo*, *Gigantopygus* cf. *bondoni*, *Hebediscus* sp., *Hicksia elvensis*, *Kingaspis* (*Kingaspoides*) cf. *velata*, *Perrector perrectus*, *Protaldonaia morenica*, *Pseudatops reticulatus*, *Rinconia schneideri*, *Saukianda andalusiae*, *Serrodiscus bellimarginatus*, *Strenuaeva sampelayoi*, *Strenuella* n. sp., *Termierella sevillana* y *Triangulaspis fusca*. Desde el punto de vista bioestratigráfico, los nuevos datos mejoran y afinan la correlación intra- e interregional, y permiten establecer nuevas conexiones faunísticas con la Zona Centroibérica y las Cadenas Ibéricas. En la Zona de Ossa-Morena, la base del Marianiense está caracterizada por el FAD de *Strenuella*, la del Marianiense medio está definido por el FAD de *S. sampelayoi*, y la del Marianiense superior está marcada por el FAD de *S. bellimarginatus*.

Abstract

This work shows the paleodiversity and biostratigraphic implications of the Marianian trilobites from the Ossa-Morena Zone, southwestern Iberian Massif. The Marianian Stage correlates internationally with the Cambrian Series 2, a global chronostratigraphic division pending formalization. The Marianian Stage subdivision is currently problematic, having undergone several conceptual modifications since its original erection. This Stage is characterized by a low trilobite diversity and abundance, and its usefulness through the Iberian Peninsula is still a subject of debate. The review of the Marianian trilobites of the Ossa-Morena Zone has recognised a total of 23 species: *Acanthomicmacca*? sp., *Alanisia guillermoi*, *Andalusiana cornuta*, *Atops calanus*, *Callavia choffati*, *Calodiscus* cf. *lobatus*, *Chelediscus garzoni*, *Delgadella souzai*, *Eops eo*, *Gigantopygus* cf. *bondoni*, *Hebediscus* sp., *Hicksia elvensis*, *Kingaspis* (*Kingaspoides*) cf. *velata*, *Perrector perrectus*, *Protaldonaia morenica*, *Pseudatops reticulatus*, *Rinconia schneideri*, *Saukianda andalusiae*, *Serrodiscus bellimarginatus*, *Strenuaeva sampelayoi*, *Strenuella* n. sp., *Termierella sevillana* and *Triangulaspis fusca*. From a biostratigraphic point of view, the new data improve and refine intra- and interregional correlation, and new faunal links with the Central Iberian Zone and the Iberian Chains have been found. In the Ossa-Morena Zone, the base of the Marianian Stage is characterized by the FAD of *Strenuella*, the middle Marianian is defined by the FAD of *S. sampelayoi*, and the base of the upper Marianian is marked by the FAD of *S. bellimarginatus*.

Aplicación de métodos geoquímicos para reconstruir la evolución paleoambiental del yacimiento de La Pedrera de Meià (Montsec)

Using geochemical proxies to reconstruct the paleo-environmental evolution of La Pedrera de Meià fossil site (Montsec range)

A. Gil-Delgado[1,6], D. Cruset[2], O. Oms[1], E. Botero[3], J. Ibáñez-Insa[2], X. Delclòs[4], A. Sellés[5,6], À. Galobart[5,6] y R. Mercedes-Martín[1]

1 Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de Geología, Edifici Cs, 08193, Cerdanyola del Vallés, España. Alejandro.gil@uab.cat, JosepOriol.Oms@uab.cat, Ramon.Mercedes@uab.cat
2 Geosciences Barcelona (GEO3BCN-CSIC), Lluís Solé i Sabarís, s/n, 08028, Barcelona, España. dcruset@geo3bcn.csic.es, jibanez@geo3bcn.csic.es
3 Technische Universitaat Hamburg-Harburg, Institute of River and Coastal Engineering, Am Schwarzenber g-Campus 1, 21073 Hamburgo, Alemania. Edgarent93@gmail.com
4 Universitat de Barcelona, Facultat de Ciències de la Terra, Departament de dinàmica de la Terra i l'Oceà, C/ Franquès s/n, 08028, Barcelona, España. xdelclos@ub.edu
5 Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont, C/ Escola Industrial, 23, 08201, Sabadell, España. Albert.garcia@icp.cat, angel.galobart@icp.cat
6 Museu de la Conca Dellà, C/ del museu, 4, 25650, Isona, España

Palabras clave: Barremiense, konservat-lagerstätte, geoquímica multiproxy, calizas litográficas.

Resumen

Los yacimientos Barremienses de las calizas litográficas lacustres de La Pedrera de Meià (LPM) en el Montsec se han reestudiado para dilucidar sus condiciones deposicionales y paleoambientales. LPM consiste en 50 m de calizas micríticas, depositadas en ambientes lacustres litorales a profundos y que alternan cíclicamente. Las condiciones de baja energía, la anoxia de las facies distales y la posible acción microbiana pudieron favorecer la preservación del tejido blando, convirtiendo los yacimientos en Konservat-lagerstätten (Gil-Delgado et al., 2023). Los resultados isotópicos sugieren lagos formados en sistemas hidrológicamente cerrados y disoxia/anoxia en la mayor parte de la sucesión. La relación Sr/Ba y otras evidencias paleontológicas sugieren un aumento de salinidad y los análisis elementales apuntan a una paulatina reducción en la entrada de terrígenos y agua meteórica.

Abstract

The Barremian record of lacustrine lithographic limestones from La Pedrera de Meià (LPM) in the Montsec range (Lleida) has been reassessed. This reassessment aims to shed light on the depositional and paleoenvironmental conditions associated with their formation. LPM consists of 50 m of micritic limestones formed in lacustrine environments, which range from littoral to profundal, featuring cyclic alternations. Low-energy conditions and anoxia in distal facies, combined with potential microbial mediation, may have favored the preservation of soft tissues, thus making the site a Konservat-lagerstätten. Isotopic and ICP-MS results suggest that lakes formed in hydrologically closed conditions, with dysoxia prevalent in most of the LPM section. Sr/Ba indicate a slight increase in salinity, and trace-element analysis suggests a gradual reduction in terrigenous and meteoric water input into the lake. This study emphasizes the importance of integrating geochemical and sedimentological data to understand the vertical evolution of depositional environments that host exceptionally-preserved biotic assemblages.

Referencias

Gil-Delgado, A., Cruset, D., Oms, O., Botero, E., Ibáñez-Insa, J., Delclòs, X., Sellés, A., Galobart, À., Mercedes-Martín, R. (2023). *Geochemical approach for decoding the paleoenvironmental and depositional evolution of a coastal lacustrine Konservat-Lagerstätte (Early Cretaceous, south-Central Pyrenees)*. Sedimentary Geology, 453,106440, 1-15, doi: 10.1016/j.sedgeo.2023.106440

Registro paleontológico de las facies lacustres-palustres de la sección de Cucho, Mioceno (Cucho-Trebiño, Cuenca Miranda-Trebiño)

Paleontological study of the lacustrine-palustrine facies of Cucho Section, Miocene (Cucho-Trebiño, Miranda-Trebiño basin)

Z. Larena[1], J. Sanjuan[2], A. Pascual[1], M. Larraz[3], A. Valenzuela[1], C. Arenas[4], X. Murelaga[1] y J.I. Baceta[1]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología. Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU Apartado 644, E-48080 Bilbao. zurine.larena@ehu.eus, ana.pascual@ehu.eus, asiervalenzuela5@gmail.com, xabier.murelaga@ehu.eus, juanignacio.baceta@ehu.eus

2 Departamento de Dinámica de la Tierra y del Océano, Facultad de Ciencias de la Tierra Martí i Franqués, s/n, E-08028 Barcelona. josepsanjuan@ub.edu

3 Departamento de Biología Ambiental (Zoología). Facultad de Ciencias, Universidad de Navarra, Apartado 177, E-31080. mlarraz@external.unav.es

4 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, E-50009-Zaragoza. carenas@unizar.es

Resumen: Este trabajo presenta los resultados del estudio paleontológico de la sección de Cucho-Trebiño (Miranda de Ebro, Burgos), formada por facies aluviales y palustre-lacustres del Mioceno inferior-medio. Se han muestreado 14 niveles margosos donde se han identificado restos de gasterópodos, carofitas, ostrácodos y un posible resto de vertebrado.

Palabras clave: Cuenca Miranda-Trebiño, lacustres-palustres, carofitas, gasterópodos, ostrácodos, Mioceno.

Abstract: *This work presents the results of the paleontological study of the Cucho-Trebiño section (Miranda de Ebro, Burgos), formed by alluvial and palustrine-lacustrine facies from the lower-middle Miocene. fourtheen levels of marls have been sampled where different remains of gastropods, charophytes, ostracods and a vertebrate have been identified.*

Key words: *Miranda-Trebiño basin, palustrine-lacustrine, charophytes, gastropods, ostracods, Miocene.*

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Miranda-Trebiño está formada principalmente por depósitos continentales formados por facies fluviales a lacustres. El mayor problema que nos encontramos al estudiar estas sucesiones continentales es la del contexto cronoestratigráfico debido sobre todo a la falta de registro fósil. En los últimos años se está realizando un estudio estratigráfico en detalle de esta cuenca y paralelamente también un muestreo de niveles margosos con potencial para contener restos de micromamíferos y otro en detalle en busca de restos de invertebrados (carofitas, ostrácodos y gasterópodos). En ausencia de microvertebrados las carofitas están siendo de gran ayuda para correlacionar las diferentes secciones y darles un contexto temporal. En este trabajo se presentan los resultados del muestreo paleontológico realizado en la sección levantada entre las poblaciones de Trebiño y Cucho.

CONTEXTO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO

La sección estudiada, sección de Cucho, se encuentra al norte de la Cuenca de Miranda-Trebiño (MT) (Fig. 1). Esta cuenca de unos 30-40 Km de longitud se trata de una cuenca de *piggy-back* que formó durante el Eoceno superior hasta el Mioceno al sur de la Cuenca Vasco-Cantábrica debido al levantamiento y emplazamiento de la lámina cabalgante Sierra de Cantabria- Montes Obarenes (prolongación occidental de la cordillera Pirenaica) sobre la cuenca de antepaís Cuenca del Ebro.

El relleno de la cuenca MT está formado por más de 3000 m de materiales continentales desde aluviales-fluviales hasta palustre-lacustres dispuestos asimétricamente debido al desplazamiento del eje de máxima sedimentación hacia el norte de la cuenca durante el relleno de la misma. Estos materiales son de edades de entre el Eoceno superior hasta el Mioceno superior que fueron divididos en cinco macrosecuencias granocrecientes principales separadas por discordancias angulares: 1) Eoceno superior; 2) Oligoceno inferior-medio, 3) Oligoceno superior-Mioceno inferior, 4) Mioceno inferior-medio y 5) Mioceno superior-Plioceno. (Riba, 1956, 1961; Martín Alafont et al., 1978).

Este trabajo está centrado en los últimos 160 m de la macrosecuencia 3 que aflora entre los pueblos de Cucho y Trebiño. Se compone de una sucesión de margas, margocalizas, calizas, areniscas y lutitas de tres ambientes deposicionales principales: aluvial, palustre y lacustre. Dentro de esta sucesión ha sido posible

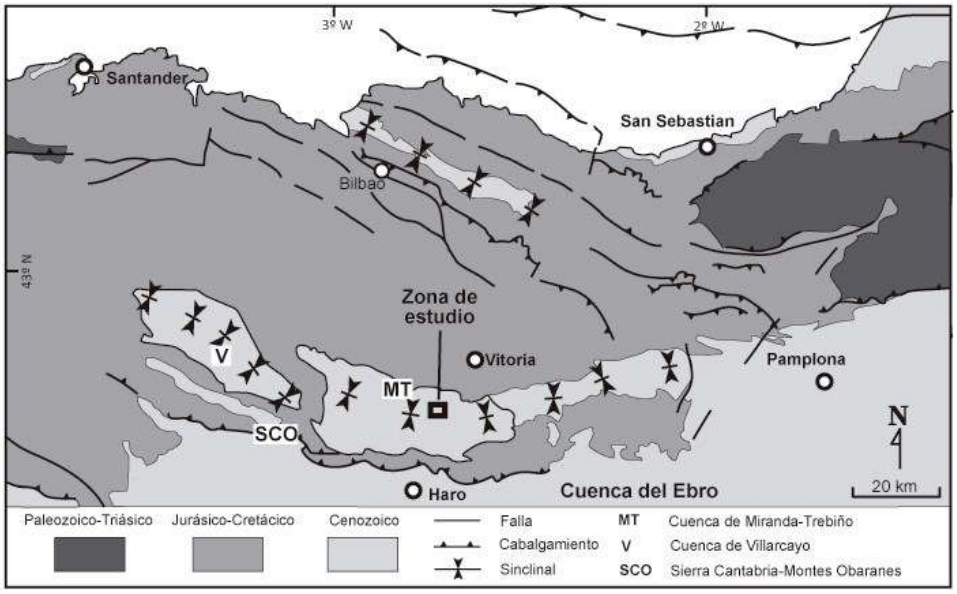


FIGURA 1.- *Posición del área de estudio al norte de la Cuenca de Miranda-Trebiño (margen sur de la Cuenca Vasco-Cantábrica).*

identificar 5 secuencias estratigráficas, S1 a S5, de entre 28 y 43 m de potencia (Fig. 2). El límite entre secuencias es abrupto identificado por el cambio neto de depósitos lacustres a fluviales. Excepto la primera, que no se muestra completa, en el resto se ha observado una tendencia similar: depósitos clásticos en la base que gradan verticalmente a depósitos carbonatados. Muestran una tendencia granodecreciente, siendo la tendencia general del conjunto de la sección de Cucho granocreciente, aumentando la potencia de los materiales clásticos en las secuencias superiores.

METODOLOGÍA

En la sección estudiada se han recogido 14 muestras en niveles margosos de colores grisáceos con posibilidad disgregar y lavar (Fig. 2). En cada uno de los niveles se han obtenido alrededor de 3 kg de muestra que después de dejarlas secar se han lavado-tamizado usando como tamiz inferior el de 0,25 mm de luz de malla. En el caso de los ostrácodos se han contabilizado los individuos encontrados en 0,8g por muestra.

El estudio taxonómico se ha realizado a partir de lupa binocular.

RESULTADOS

De las 14 muestras estudiadas cinco no han proporcionado ningún resto fósil, en cuatro se han encontrado carofitas y ostrácodos, en dos carofitas y gasterópodos y en tres solo ostrácodos. En una de las muestras CU-p-63.5 se ha encontrado un fragmento de lo que parece ser una cáscara de huevo de cocodrilo. Al ser este el único resto de cocodrilo, hemos tomado este dato con reservas. En el Mioceno inferior de las vecinas Cuenca del Ebro y de Medina de Pomar se suelen encontrar restos de cocodrilos (dientes, osteodermos y cáscaras de huevo) en el Mioceno inferior, no habiéndose encontrado hasta la fecha en niveles del Mioceno inferior en esta zona estudiada.

Carofitas

Se han encontrado restos de carofitas (varias decenas de girogonitos) en cuatro muestras de la sección de Cucho (CU-P-8.3, CU-P-52, CU-P-102 y CU-P-118.5) (Tabla I). La gran mayoría de girogonitos están mal conservados y aplastados debido a procesos diagenéticos. Los pocos especímenes bien conservados pertenecen al género *Chara,* ya que presentan una forma elipsoidal, una estructura apical de tipo psilocaroide, una base redondeada y un poro basal pequeño y simple. En la muestra C1-3 se han encontrado también tallos corticados de carofitas del mismo género *Chara*. La presencia de girogonitos y tallos de carofitas indica un medio lacustre somero, de agua dulce y alcalina. El género *Chara* es el más común en las asociaciones de carofitas actuales y del Neógeno y su registro empieza en el Cretácico superior (Feist et al., 2005).

Ostrácodos

En las muestras dominan las valvas sueltas de ostrácodos. La especie más abundante en todas ellas es *Pseudocandona parallela* (Müller). Esta es una especie que habita en los bordes de lagos con agua permanente, substrato limo-arcilloso y abundante vegetación. Se trata de una especie que soporta temperaturas templadas a frías y salinidad menor del 5.5 o/oo (Meisch, 2000; Martínez-García et al., 2014).

La aparición en la muestra CU-P-118.5 de un gran número de caparazones completos de ostrácodos junto con algunos ejemplares de *Pseudocandona compressa* (Koch) o *Ilyocypis bradyi* Sars, indican un medio más tranquilo con poca corriente y aguas más frías (Martín Rubio, 2003) y menos profundas (<4 m de profundidad).

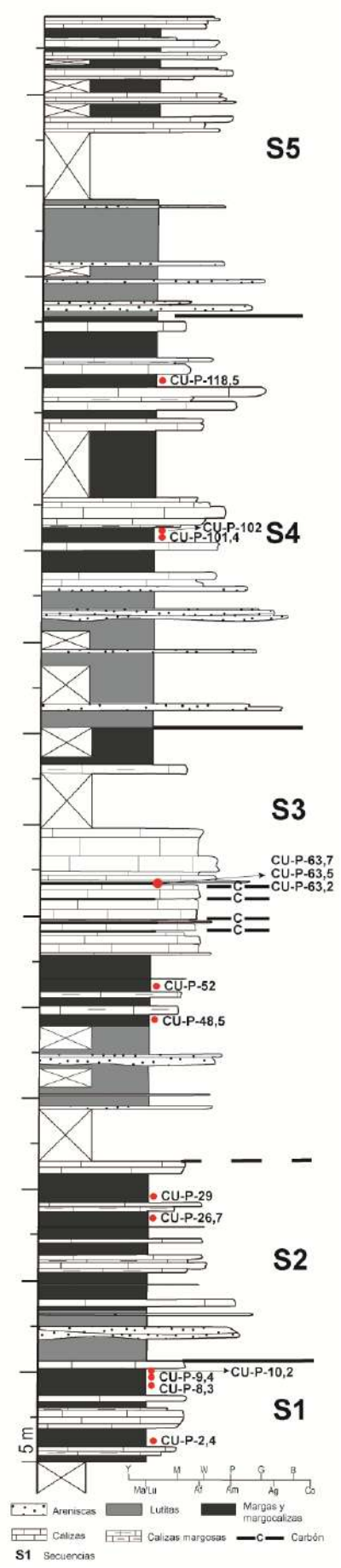


FIGURA 2.- ***Localización de las muestras en la sección estratigráfica estudiada.***

De cualquier forma, las aguas de este medio lacustre debían de ser semipermanentes, puesto que algunas de las muestras carecen de ostrácodos, gasterópodos y carofitas o son muy pobres en restos fósiles (Tabla I).

Gasterópodos

Los pocos restos que se han conservado (12) están asociados a niveles con abundante materia carbonosa y se encuentran muy aplastados por lo que la atribución sistemática que realizamos la hacemos con reservas.

Las conchas presentan suturas profundas, la última vuelta es grande, tienen la abertura ovalada terminada en una angulosidad y presentan ombligo. A nuestro parecer estos ejemplares podrían encajar dentro del género *Valvata* Müller, 1773 de la familia Valvatidae.

Representantes actuales de este género viven en aguas limpias, con abundante vegetación y escasa corriente.

Muestra	Nº ostrácodos/80 gr	Presencia carofitas	Presencia gasterópodos
CU-P-118,5	121	si	
CU-P-102	8	si	
CU-P-101,5	1		
CU-P-63,7	3		si
CU-P-63,5	1		si
CU-P-63,2			
CU-P-52	5	si	si
CU-P-48,5			
CU-P-29	33		
CU-P-26,7			
CU-P-10,2			
CU-P-9,4			
CU-P-8,3	70	si	
CU-P-2,4	55		

TABLA I. *Presencia de restos de ostrácodos, carofitas y gasterópodos en las muestras estudiadas. La numeración de la muestra corresponde a su posición en la columna estratigráfica*

CONSIDERACIONES FINALES

De las cinco secuencias deposicionales en la secuencia 3 y en la 5 no se han encontrado restos de ostrácodos a techo de las mismas debido sobre todo por la dificultad de encontrar margas para el lavado y tamizado. En las otras tres secuencias deposicionales las muestras de mayor riqueza en ostrácodos son las obtenidas al techo de las mismas. Este dato coincidiría con los momentos de depósito de sedimentos carbonatados indicando el fin de la secuencia que va de depósitos fluviales a lacustres. Los ostrácodos indican que estas masas de agua eran de templadas a frías y que podía encontrarse abundante vegetación. En la secuencia 3 han aparecido unos niveles muy ricos en materia vegetal que son los que han aportado los pocos restos de gasterópodos de la familia Valvatidae. La presencia de

esta familia en estos niveles casa con la cantidad de materia vegetal presente en un medio de escasa corriente.

La mala conservación de los restos de carofitas no permite precisar dentro del género *Chara* por lo que no podemos afinar la edad con este taxón. Si se confirma que el resto de cáscara de huevo es de cocodrilo podríamos afirmar que se tratan de niveles más antiguos que el Mioceno medio. Este dato casaría con la correlación que sitúa a la sección estudiada por encima de los niveles con huellas de Salinas de Añana atribuidas al Mioceno inferior-medio.

AGRADECIMIENTOS

La primera firmante (Z. L.) disfruta de una beca predoctoral de la UPV/EHU. Este trabajo ha recibido financiación del Gobierno Vasco (IT-1602-22 y IT-976-16), de la Agencia Española de Investigación (PID2020-113912GB- 100/AEI/10.13039/501100011033) y de la Generalitat de Catalunya (2021 SGR- Cat 00349).

REFERENCIAS

Feist, M., Grambast-Fessard, N., Guerlesquin, M., Karol, K., Lu, H., Mc-Court, R.M., Wang, Q., Shenzen, Z., (2005): Treatise on Invertebrate Paleontology. Part B, Protoctista 1. Charophyta, volume 1. The Geological Society of America, Lawrence, Kansas.

Larena, Z., Arenas, C., Baceta, J.I. y Murelaga, X. (2024): Stratigraphy and sedimentology of a Lower-Middle Miocene section in the Miranda-Trebiño Basin, NE Iberia. *Geogaceta*, 75: 7-10. In press

Martín Alafont, J.M., Ramírez del Pozo, J. y Portero, J.M. (1978): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 138 (Puebla de Arganzón) y memoria.* IGME, Madrid.

Martín-Rubio, M. (2003): *Ostrácodos del Plioceno y reciente en el Sector occidental de la cuenca del Ebro: paleoecología y geoquímica.* Tesis Doctoral. Univ. País Vasco/EHU, 312 p.

Martínez-García, B., Suarez-Hernando, O., Suárez-Bilbao, A., Pascual, A., Ordiales, A., Larrasoaña, J.C., Murelaga, X., y Ruiz-Sánchez., F.J. (2014): Lower-Middle Miocene ostracod assemblages of Loma Negra (Bardenas Reales de Navarra, Ebro Basin): palaeoenvironmental evolution of a lacustrine system. *Ameghiniana* 51(5): 405-419.

Meisch, C. (2000): Freshwater Ostracoda of Western and Central Europe. En: *Süßwasserfauna von Mitteleuropa (J. Schwoerbel, J. y P. Zwick, Eds.).* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin. 522 p.

Riba, O. (1956): *La Cuenca Terciaria de Miranda Treviño*. Informe inédito CIEPSA, 28 p.

Riba, O. (1961): *Nuevas observaciones sobre el Terciario continental de la Cuenca de Miranda Treviño.* Informe inédito CIEPSA, 19 p.

Nanofósiles calcáreos del Eoceno de la Formación Arenisca de Sabiñánigo en la Cuenca de Jaca (Cuenca Surpirenaica central)

Eocene calcareous nannofossils assemblages from the Sabiñánigo Sandstone Formation in the Jaca Basin (Central Southern Pyrenees)

E. R. Lasluisa[1], O. Oms[2], E. Remacha[2], A. González-Lanchas[3], H. Blanchar-Roca[2], M. Alonso Garcia[1] y J. Abel Flores[1]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca, Salamanca, 37008, Spain; idu021262@usal.es, montseag@usal.es, flores@usal.es.
2 Departament de Geología, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra (Barcelona), 08193, Spain: joseporiol.oms@uab.cat, eduard.remacha@uab.cat, hug.blanchar@uab.cat.
3 Department of Earth Sciences, University of Oxford. Oxford (United Kingdom): alba.gonzalez-lanchas@earth.ox.ac.uk

Palabras clave: Pirineos (España), bioestratigrafía, Arenisca de Sabiñánigo, nanofósiles calcáreos, Eoceno.

Resumen

La Formación Arenisca de Sabiñánigo aflora en el sinclinal de Santa Orosia, en la Cuenca de Jaca (Cuenca Surpirenaica central), y es una secuencia sedimentaria constituida principalmente por depósitos deltáicos y de plataforma externa. Esta formación ha sido estudiada por varios autores tanto con un enfoque descriptivo como genético, sin embargo, los datos bioestratigráficos de esta formación eran muy escasos.

Los depósitos siliciclásticos de la Arenisca de Sabiñánigo contienen una asociación de microfósiles con una preservación de moderada a buena, que nos ha permitido realizar el primer estudio bioestratigráfico detallado con nanofósiles calcáreos para esta formación. La asociación de nanofósiles calcáreos identificada se encuentra dominada por las especies: *Cyclicargolithus floridanus*, *Coccolithus pelagicus*, *Clausicoccus fenestratus*, *Zygrhablithus bijugatus*, además, se registran ocasionalmente especies de los géneros de *Sphenolithus*, *Chiasmolithus* y *Helicosphaera*.

Los datos bioestratigráficos han permitido caracterizar biohorizontes del Eoceno medio, de acuerdo con las escalas estratigráficas globales, y mejorar la correlación temporal y evolución general de los depósitos de esta cuenca. El depósito de la secuencia sedimentaria de la Arenisca de Sabiñánigo tuvo lugar entre la parte superior de la biozona NP16 y la base de la NP17, durante el Bartoniense, y bajo condiciones marinas cálidas y oligotróficas.

Abstract

The Sabiñánigo Sandstone Formation outcrops in the Santa Orosia syncline, in the Jaca Basin (central South Pyrenees Basin). This formation is a sedimentary succession mainly composed of deltaic and outer-shelf sediments. This formation has been studied by several authors with both a descriptive and genetic approach, however, biostratigraphic data was very limited.

The siliciclastic deposits of Sabiñánigo Sandstone contain moderate to well-preserved microfossil assemblages, allowing us to develop the first detailed calcareous nannofossil study from this formation. The identified calcareous nanofossil assemblage is dominated by the species: *Cyclicargolithus floridanus*, *Coccolithus pelagicus*, *Clausicoccus fenestratus*, *Zygrhablithus bijugatus*, and several species belonging to the genus *Sphenolithus* and *Chiasmolithus*.

The biostratigraphic results enabled the characterization of the middle Eocene biohorizons, based on global stratigraphic scales and the improvement of the temporal correlation and lateral evolution of this basin's deposits. The sedimentary sequence of the Sabiñánigo Sandstone was deposited during the middle Eocene, between the upper part of biozone NP16 and the base of NP17, in the Bartonian. The calcareous nannoplankton assemblage suggests warm and oligotrophic surface waters for the Bartonian interval in the Jaca basin.

Conservación excepcional de las conchas cretácicas de bivalvos de agua dulce de Ariño (Teruel)
Exceptional preservation of Cretaceous freshwater bivalve shells from Ariño (Teruel, Spain)

R. P. Lozano[1], G. Delvene[1], M. Munt[2], E. Espílez[3] and L. Mampel[3]

1 CN Instituto Geológico y Minero de España, (IGME-CSIC). C/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, Spain. r.lozano@igme.es; g.delvene@igme.es
2 Dinosaur Isle Museum, Culver Parade, Sandown, Isle of Wight, PO36 8QA, United Kingdom; martin.munt@iow.gov.uk
3 Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis, Avda. Sagunto s/n, 44002 Teruel, Spain. espilez@fundaciondinopolis.org; mampel@fundaciondinopolis.org

Palabras clave: aragonito, calcita, yeso, microestructura, reemplazamiento.

Resumen

Las conchas de los bivalvos están hechas de carbonato cálcico biogénico, tanto de calcita como de aragonito. Estos animales sintetizan carbonato dentro de matrices orgánicas y dependiendo de los componentes orgánicos que las formen (principalmente proteínas, quitina y polisacáridos) producen calcita o aragonito, con diferentes texturas, tamaños y orientaciones cristalinas (Song *et al*., 2019). En contacto con el agua, las conchas aragoníticas de los bivalvos de agua dulce son reemplazadas por calcita con bajo contenido de magnesio durante la diagénesis. Las conchas de bivalvos de agua dulce del Albiense procedentes de la mina de carbón Santa María (SAMCA) de Ariño (Teruel, España), conocida por sus numerosos restos de vertebrados fósiles incluidos dinosaurios (Alcalá *et al*., 2012) y ámbar con bioinclusiones, conservan las dos capas originales de aragonito (capa prismática y nacarada), sólo con reemplazamientos incipientes de calcita, pirita y yeso. La capa nacarada está ligeramente deformada ya que se comportó como una roca con marcada foliación o esquistosidad, que dio lugar a zonas de pliegue tabulares (kink-bands). El objetivo es determinar las características petrográficas y químicas de los cristales de aragonito, para establecer su grado de conservación y aproximarnos al paleoambiente del Cretácico, donde vivieron estos animales junto a los dinosaurios y los árboles productores de resina. El estudio de la roca que incluye los bivalvos, rica en pirita framboidal, también permite formular hipótesis que expliquen la conservación excepcional de las conchas (Janiszewska *et al*., 2018). Esta es una contribución a los proyectos CREI; PID2022-137316NB-C22 y FOCONTUR E04_20R.

Abstract

Bivalve shells are made of biogenic calcium carbonate, as either calcite or aragonite. During life bivalves synthesises carbonate within organic matrices and depending on the organic components (mainly proteins, chitin and polysaccharides), they produce either calcite or aragonite, with different textures, sizes and crystal orientations (Song *et al*., 2019). Typically, during diagenesis the aragonitic shells of freshwater bivalves are replaced by low-Mg calcite. The open-pit Santa María coalmine at Ariño (Teruel, Spain) owned by SAMCA, is well known for its Albian vertebrates including dinosaurs (Alcalá *et al*., 2012) and amber with bioinclusions. Commonly, the freshwater bivalve shells from the mine have two original layers of aragonite (the nacreous, and prismatic layers) preserved, albeit with some incipient replacement by calcite, pyrite and gypsum. These shells frequently show slight deformation resembling foliation or schistosity, which formed tabular folds (kink-bands) in the nacreous layer. Focused on the bivalves the objectives of this research are to determine the petrographic and chemical characteristics of their aragonite crystals and establish their degree of preservation. Moreover, to study the framboidal pyrite rich rock to enable us to hypothesise how this exceptional preservation of the shells occurred (Janiszewska *et al*., 2018), to help us interpret this very special Cretaceous palaeoenvironment. This is a contribution to CREI; PID2022-137316NB-C22 and FOCONTUR E04_20R projects.

Referencias

Alcalá, L., Espílez, E., Mampel, L., Kirkland, J.I., Ortiga, M., Rubio, D., González, A., Ayala, D., Cobos, A., Royo-Torres, R. y Gascó, F. (2012). *Geoheritage* 4 (4), 275-286.

Janiszewska, K., Mazur, M., Machalski, M. y Stolarski, J. 2018. *Plos One* 13-2, e0208598.

Song, X., Liu, Z., Wang, L. y Song, L. (2019). *Frontiers in Marine Science* 6, 41.

Sesgo tafonómico en la silicificación selectiva registrada en lumaquelas cámbricas de las Cadenas Ibéricas, NE España

Taphonomic bias of selective silicification in Cambrian shelly pavements from the Iberian Chains, NE Spain

B. Martínez-Benítez[1], J. Esteve[2] y J. J. Álvaro[1-2]

1 Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Dr. Severo Ochoa 7, 28040 Madrid, blanca.m@igeo.ucm-csic.es, jj.alvaro@csic.es
2 Facultad Ciencias Geológicas, UCM, José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid. jorgeves@ucm.es

Palabras clave: Tafonomía, Registro fósil, Sílice, Cámbrico, Gondwana.

Resumen

El tránsito "Cámbrico inferior-medio" de las Cadenas Ibéricas se caracteriza por alternancias de calizas y lutitas pertenecientes a la Formación Valdemiedes. Las calizas representan, en su mayor parte, tempestitas, cuyos eventos de alta energía episódicamente afectaron a praderas de chancelóridos, echinodermos y esponjas hexactinélidas, acompañadas por trilobites, braquiópodos, psamosféridos y serpúlidos. La porosidad intra e interparticular fue cementada por calcita y posteriormente afectada por la circulación de aguas ácidas, cuya porosidad de disolución fue finalmente cementada por mosaicos de cuarzo. Esta silicificación ha favorecido la extracción, mediante ataque al ácido acético, de gran cantidad de bioclastos en 3D. La silicificación desarrollada durante la diagénesis temprana ha permitido el reconocimiento de altas tasas de biodiversidad. Sin embargo, la recristalización (probablemente Varisca) a mosaicos de macrocuarzo impide en gran medida el reconocimiento de taxones a nivel genérico y específico. Este sesgo tafonómico contrasta con el alcanzado en conchas originalmente fosfáticas (braquiópodos linguliformes), apenas afectados por procesos de silicificación. Aunque las hexactinélidas aportaron parte de la sílice, los procesos tectónicos que controlaron los consiguientes procesos de productividad carbonatada favorecieron la circulación de aguas hidrotermales. Este trabajo realiza una aproximación geoquímica al dilema de la procedencia de la sílice, mediante el análisis (catodoluminiscencia cálida y tierras raras) del propio cuarzo diagenético. Los resultados avalarían la coexistencia de ambas procedencias.

Abstract

The traditional "lower-middle Cambrian" transition of the Iberian Chains, NE Spain, consists of limestone/shale couplets belonging to the Valdemiedes Formation. The limestones mainly represent storm-induced deposits. Their high energy events episodically affected meadows of chancelloriids, echinoderms and hexactinellid sponges, accompanied by trilobites, brachiopods, psammosphaerids and serpulids. The intra- and interparticle porosity was wholly occluded by calcite and subsequently affected by the circulation of acidic waters, whose secondary porosity was finally cemented by quartz mosaics. The silicification of most of these remains has favoured the extraction, by acid etching, of a large amount of 3D skeletons. As a result, the early-diagenetic silicification has allowed the recognition of high biodiversity rates. However, recrystallization (probably Variscan) to macroquartz mosaics largely precludes taxonomic assignations at generic and specific levels. This taphonomic bias contrasts with that achieved in originally phosphatic shells (linguliform brachiopods), hardly affected by silicification. Although hexactinellid spicules partly contributed to the circulating silica, the tectonic processes that controlled the subsequent carbonate productivity processes controlled the circulation of hydrothermal waters. This work performs a geochemical approach, through the analysis (warm cathodoluminescence and rare earth elements) of the diagenetic quartz itself. The results would support the coexistence of both origins.

New human footprints in the Middle Pleistocene of Doñana (Huelva, Spain)

Nuevas pisadas humanas en el Pleistoceno medio de Doñana (Huelva, España)

E. Mayoral[1,2], J. Duveau[3,4], I, Díaz-Martínez[5], A. Rodríguez Ramírez[1,2], J. A. Morales[1,2], R. Díaz-Delgado[6], A. Gómez Olivencia[7,8,9] y A. Santos[10]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Campus de El Carmen, Universidad de Huelva, 21071 Huelva, Spain, mayoral@uhu.es
2 CCTH-Centro de Investigación Científico Tecnológico, Universidad de Huelva, 21071, Huelva, Spain
3 DFG Center for Advanced Studies ''Words, Bones, Genes, Tools: Tracking Linguistic, Cultural and Biological Trajectories of the Human Past'', Eberhard Karls University of Tübingen, Rümelinstrasse 23, 72070 Tübingen, Germany, jeremy.duveau@mnhn.fr
4 UMR 7194 Histoire Naturelle de l'Homme Préhistorique, CNRS, Muséum National d'Histoire Naturelle, Université Perpignan Via Domitia, Paris, France.
5 Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, Cantabria, Spain, inaportu@hotmail.com
6 LAST (Remote Sensing & GIS Lab), Estación Biológica de Doñana-CSIC, 41092 Sevilla, Spain, rdiaz@ebd.csic.es
7 Dept. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, Spain, asier,gomezo@ehu.eus
8 Sociedad de Ciencias Aranzadi, Zorroagagaina 11, 20014 Donostia-San Sebastián, Spain.
9 Centro Mixto UCM-ISCIII de Investigación Sobre Evolución y Comportamiento Humanos. Avda. Monforte de Lemos, 5 (Pabellón 14), 28029 Madrid, Spain.
10 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 33005, Oviedo, Spain, asantos@uniovi.es

Abstract: Research carried out in the Doñana coastline has revealed the existence of 78 new human footprints as several hundred footprints produced by artiodactyls, canids and likely rhinocerotids in an area of 6,000 m^2 located on the El Coto beach in Matalascañas (Huelva). The age of this surface is 160.4 ± 9.0 ka, which places it in the Middle Pleistocene. This surface has so far yielded a total of 15 longitudinally complete footprints, which has made it possible to establish the biometric parameters, as well as the minimum number of individuals and their comparison with the footprints from the El Pichilín site located about 6 km NW of this point.
Their study determined age classes, with two of them corresponding to adolescents or small-sized adult individuals and thirteen to a larger, adult individual. The minimum number of individuals represented in this association would be two. The footprints, whose length varies between 19.5 and 24.7 cm, could have been left by either an adolescent or a small-sized individual of 153.7-156.9 cm in stature. In turn, the footprints measuring 21.7 and 31.2 cm in length could have been left by an individual 168.2-179.6 cm tall, based on modern human comparative samples.

Key words: Human palaeoichnology, Biometric characterisation, Group composition, Quaternary

Resumen: *Investigaciones llevadas a cabo en el litoral de Doñana han revelado la existencia de 78 nuevas pisadas humanas y cientos de huellas de artiodáctilos, cánidos y probablemente rinocerontidos en una superficie de 6.000 m^2 en la playa de El Coto, en Matalascañas (Huelva). Su edad es de 160.4 ± 9.0 ka, por lo que se sitúa en el Pleistoceno medio. Contiene 15 huellas longitudinalmente completas, lo que ha permitido establecer los parámetros biométricos, así como el número mínimo de individuos y su comparación con las del yacimiento de El Pichilín situado a unos 6 km al NO de esta nueva localización.*
A partir de su estudio, se han determinado las clases de edad, correspondiendo dos de ellas a, al menos, un adolescente o adulto de pequeña talla y trece a un adulto de mayor talla. El número mínimo de individuos serían dos. Las huellas cuya longitud varía entre 19,5 y 24,7 cm podrían haber sido dejadas por un adolescente o individuo pequeño de 153,7-156,9 cm de altura. A su vez, las huellas de entre 21,7 y 31,2 cm de longitud podrían haber sido dejadas por un individuo de 168,2-179,6 cm de altura, en base a muestras de comparación modernas.

Palabras clave: *Paleoicnología humana, Caracterización biométrica, Composición grupal, Cuaternario.*

INTRODUCTION

New research carried out on the coast of the Doñana Natural Area has led to the detection of a new site of hominin footprints. The detailed study of the almost one thousand photograms obtained in 2020 has made it possible to determine and verify its undoubted existence, complementing the record of this type of evidence for the Pleistocene in the south of the Iberian Peninsula. This new site is located on the El Coto beach in Matalascañas (Huelva), over a surface of 6,000 m^2 and approximately

6 km SE of the El Pichilín site described by Mayoral et al. (2021).

This surface would be related to the evolution of an ancient fluvio-deltaic coastal plain belonging to an edaphogenic cycle that would have acted in the area during the Middle-Late Pleistocene transition (Roquero et al., 2013).

BACKGROUNDS

The first reference to hominin footprints on this coast was made by Mayoral et al. (2021), who attributed them to Neandertals since the surface where they were recorded was below a level of dunes dated at 106 ± 19 ka (Zazo et al., 2005). Subsequently, new dating (Mayoral et al., 2022) attributed their age for the first time at 295.8 ± 17 ka, opening up the possibility that these footprints belonged to preneandertals. However, Neto de Carvalho et al. (2023), in new dating, establish it at 151 ± 11 ka, again attributing the production of the footprints to Neandertals. As additional evidence, they provide the presence of lithic industry of Mousterian affinity. In this respect, it should be noted that: 1) the samples collected for the radiometric dating were not obtained from the same ichnological site, which makes it difficult to establish comparisons between the two; 2) the presence of lithic industry is not a definitive argument for associating the site with the Upper Pleistocene, nor with the presence of Neandertals (de Lombera-Hermida et al., 2020).

METHODS

Descriptions, measurements and photos of the footprints were made directly in the field. A low altitude programmed flight was carried out using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on September the 20th 2021, 12 AM UTC. A multirotor DJI PHANTOM 4+ with a 4 k 20 Mpix RGB CMOS camera collected at an average height of 7 m above the ground a total amount of 999 photographs over the study area (6.000 m^2). A photogrammetric orthomosaic was produced using both PIX4DMAPPER and AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL softwares.

A sample for dating by Optically Stimulated Luminescence (OSL) was carried out at the Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) in Burgos. The methodology for sampling and sample preparation procedure followed is similar to that expressed in Mayoral et al. (2022).

For the footprint measurements and morphometric characterisation the methodology proposed in Mayoral et al. (2021) has been followed. For stature estimation three experimental relationships between footprint length and stature were used (Dingwall et al., 2013; Bennett et Morse, 2014; Duveau, 2022), because using only the width of the footprints is not viable, given the correlation between total length and width is too low (r^2 = 0.27). These studies were performed under similar substrate conditions.

In order to estimate age classes, two growth models (stature vs age) were used. The first one was defined from Neandertal remains. The second was defined from anthropometric data from modern populations.

On the other hand, to determine a Minimum Number of Individuals (MNI), the intraindividual dispersion of footprint total length was used.

RESULTS

The sample taken from the El Coto surface to obtain its absolute OSL dating has revealed an age of 160 ± 9.0 ka. The calculated dose rate (Gy/ka), the estimated dose equivalent (Gy) and the derived age were found. Uncertainties are quoted at 1-sigma (k=1) (Table I).

Lab code CENIEH	Depth (m)	Dose rate (Gy/ka)	Burial doce (Gy)	Age (ka)
LM21157-09	0.2	1,38 ± 0.06	220.60 ± 8.52	160.4 ± 9.0

TABLE I. *Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating results*

A total of 78 footprints were determined by combining measurements in situ and from UAV models. Only footprints longitudinally complete (called total length) are considered to establish final considerations and width-to-length ratio was determined. The values determined for the stature according to the above procedure are summarised in Table II.

	Frequency	Min.	Mean	Max.	s.d.
Total length	15	19.5	27.5	31.2	3.5
Width	78	3.8	9.0	14.5	2.4
width / length	15	0.27	0.36	0.47	0.06
Stature	15	143.4	179.8	196.4	16.0

TABLE II. *Descriptive statistics of the variables measured. All values in cm.*

The statures estimated from the footprints were placed on the curves of these models to estimate an age class (Fig. 1).

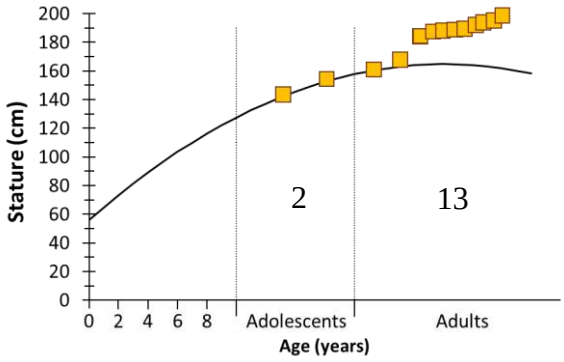


FIGURE 1. Position of the estimated statures on a curve representing the stature variation with age,

According to the two growth models mentioned above, the age classes obtained are summarised in the Table III.

	Child	Adolescent	Adult
Neandertal model	0	2	13
Modern model	0	4	11

TABLE I. *Age classes considering Neandertal and modern models.*

Considering that the experimental data show that the maximum deviation from the individual mean for the footprint length is 13.4%, the results are summarised in Table IV.

	Individual 1	Individual 2
Footprint length	19.5-24.7 cm	21.7-31.2 cm
Stature (center of the interval)	155.1 cm	174.6 cm
Age class	Adolescent or adult	Adult

TABLE IV. *Determination of hominin group composition.*

DISCUSSION

The new trampled surface at El Coto presents a series of characteristics that differentiate it from the one initially described at the site of El Pichilín, like the absence of children footprints. Thus, the minimum number of individuals is lower while at El Pichilín the number of individuals is higher (at least 3). In this latter site, the group is dominated by non-adult individuals (71%), of which 25% were children (Mayoral et al., 2021). This figure contrasts sharply with El Coto, where 86% are adults footprints (some of the statures inferred at this latter site appear large, possibly due to the large intra-individual morphological variation), and the remaining 14% belong to an adolescent or small sized adult individual.

On the other hand, in both sites, the footprints are oriented SW-NE, although in El Coto, the dispersion is much greater (Figure 2), and they do not seem to be directed towards a specific place as in El Pichilín. The latter site has been interpreted as an extensive flooded corridor covered by a thin layer of water that favoured the appearance of an extensive microbial mat (Mayoral et al., 2021). The orientation of those tracks indicates that the hominins were moving towards a ponded area with a particular, for example, the intention of stalking small carnivores, waterfowl and wading birds, or even fishing or searching for fish or molluscs (Mayoral et al., 2021).

According to Neto de Carvalho et al. (2021), Neandertals visited the surface containing the tracks to hunt or scavenge weakened or dead elephants, and most probably calves. However, the typology and size of the lithic industry they found are unsuitable for such an activity (no fossil bones have been found either). Furthermore, they consider that their tracks were temporary (no more than hours or a day) without providing any ichnological evidence to support this hypothesis, except for a trail made up of three tracks compared to thousands of others left by large herbivores (Neto de Carvalho et al., 2023).

Moreover, the surface of El Coto, which shows a shallow degree of ferruginization compared to El Pichilín, contains ichnites of artiodactyls, canids and probably rhinocerotids. In contrast, no ichnites of proboscideans and birds have been identified, as at El Pichilín.

All these differences could be because, in both sites, the environments and their inhabitants were different. After all, their ages are also different. This would imply that the faunas and hominins are also distinct (e.g. Preneandertals vs. Neandertals).

As for the possible authorship of these footprints, due to their chronology within the Upper Pleistocene coincides with the time when Neandertals were the only known hominin species in Western Europe (see Mayoral et al., 2021). However, if we compare these footprints and the characteristics of this surface with those of the El Pichilín site, we can see that the two groups appear pretty different. For this reason, we think that the conservative decision is to assign the authorship of these footprints to hominins of the Neandertal lineage until new sites and new dating confirm solidly either of the two hypotheses.

CONCLUSIONS

The on-site and detailed study of a thousand photograms taken by a drone during the autumn of 2020 has revealed the existence of a new trampled surface where 78 human ichnites have been recorded so far, as well as several hundred footprints produced by artiodactyls, canids and rhinocerotids. The human ichnites contain 15 longitudinally complete footprints, and it has been possible to identify the age classes, with two of them corresponding to adolescents and thirteen to adults, the minimum number of individuals being two. One of the individuals, which would correspond to an adolescent or adult, would have a stature of 153.7-156.9 cm, corresponding to a footprint length of 19.5 and 24.7 cm. The other, an adult, would be between 168.2-179.6 cm in stature and have a footprint length of between 21.7 and 31.2 cm.

The El Coto trampled surface has been dated to 160.4 ± 9.0 ka, which would place it whitin the Upper Pleistocene. When comparing its characteristics and its ichnological assemblage, as well as the composition of the hominin group, its biometry, age classes and spatial distribution, with the trampled surface of El Pichilín, it is observed that there are very notable differences. It is also worth mentioning the geological problems in which the two study areas are framed, which may have led to the difference in ages obtained. Pending further data, we believe that we are in the presence of two distinct surfaces. So, both surfaces represent different chronological events, El Coto being far more modern

than the latter. In this context, the authorship of these footprints would be related to hominins of the Neandertal lineage.

ACKNOWLEDGEMENTS

This communication contributes to Research Project 2993/2023, "Characterisation, monitoring and control of the human ichnite site in the Doñana Natural Area: a challenge in the face of Global Change", granted by the Organismo Autónomo de Parques Nacionales and by the support received from the ICTS-RBD (Instalación Científico Técnica Singular de la Reserva Biológica de Doñana). ID-M is supported by a Ramón y Cajal fellowship (RYC-2022) and by the Ministry of Science and Innovation of Spain.

.

REFERENCES

Bennett, M.R. y Morse, S.A. (2014): Human Footprints: Fossilised Locomotion? .Springer, 216 p.

de Lombera-Hermida, A., Rodríguez-Álvarez, X.P., Mosquera, M., Ollé, A., García-Medrano, P. et al. (2020): The dawn of the Middle Paleolithic in Atapuerca: the lithic assemblage of TD10.1 from Gran Dolina. *Journal of Human Evolution*, 145: 102812.

Dingwall, H.L., Hatala, K.G., Wunderlich, R.E. y Richmond, B.G. (2013): Hominin stature, body mass, and walking speed estimates based on 1.5 million-year-old fossil footprints at Ileret, Kenya. *Journal of Human Evolution*, 64: 556–568.

Duveau, J. (2022): From footprint morphometrics to the stature of fossil hominins: A common but uncertain estimate. *L'Anthropologie*, 126: 103067.

Mayoral, E., Díaz-Martínez, I., Duveau, J. et al. (2021): Tracking late Pleistocene Neandertals on the Iberian coast. *Scientific Reports*, 11: 4103.

Mayoral, E., Duveau, J., Santos, A., et al. (2022): New dating of the Matalascañas footprints provides new evidence of the Middle Pleistocene (MIS 9-8) hominin paleoecology in southern Europe. *Scientific Reports*, 12: 17505.

Neto de Carvalho, C., Belaústegui, Z., Toscano, A., et al. (2021): First tracks of newborn straight-tusked elephants (*Palaeoloxodon antiquus*). *Scientific Reports*, 11: 17311.

Neto de Carvalho, C., Muñiz, F., Cáceres, L.M., et al. (2023): Neanderthal footprints in the "Matalascañaas trampled surface" (SW Spain): new OSL dating and Mousterian lithic industry. *Quaternary Science Reviews*, 313: 108200.

Roquero, E., Silva, P.G., Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J. y Borja, F. (2013): Micromorphology of hydromorphic soils developed in fluviomarine sediments during the Middle-Late Pleistocene transit in the Gulf of Cadiz (Atlantic South Spain). *Spanish Journal of Soil Science*, 3(3): 184-200.

Zazo, C., Mercier, N., Silva, P.G., et al. (2005): Landscape evolution and geodynamic controls in the Gulf of Cadiz (Huelva coast, SW Spain) during the late quaternary. *Geomorphology*, 68: 269-290.

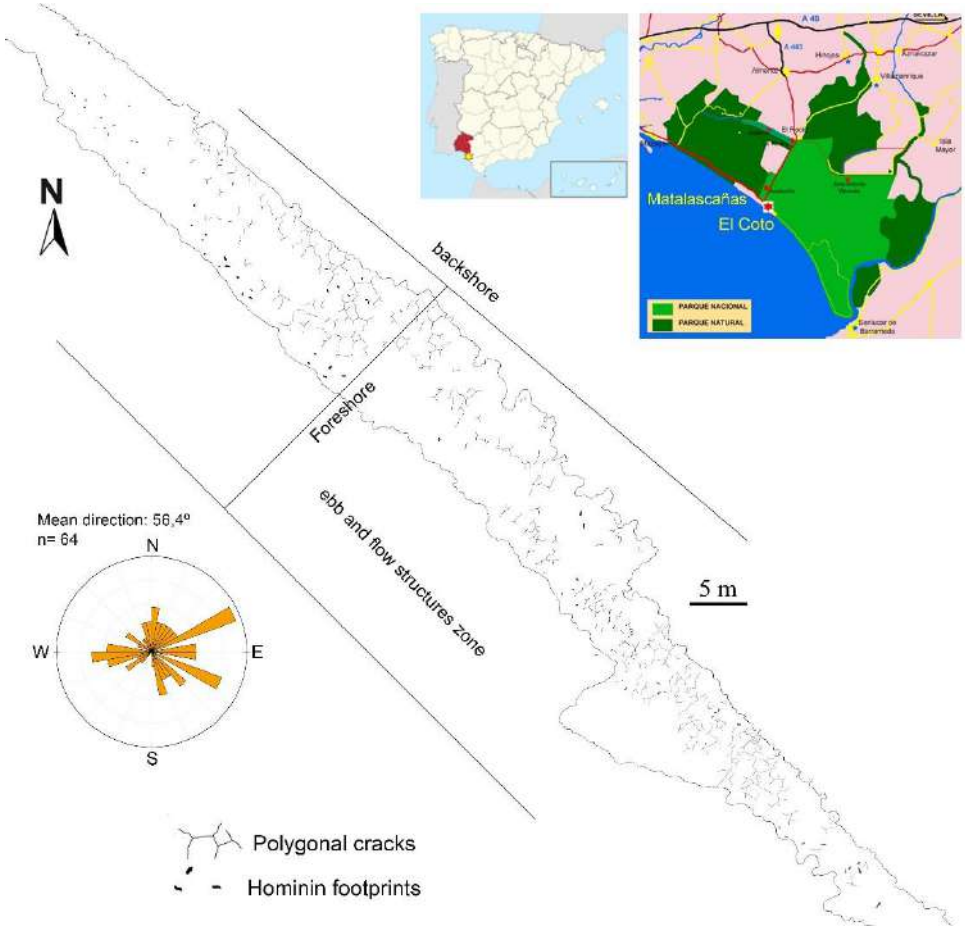


FIGURE 2. Geographical location and spatial distribution and orientation of the hominin footprints on the beach of El Coto (Matalascañas, Huelva).

El legado micropaleontológico del Dr. Ramírez del Pozo en el Museo Geominero (IGME-CSIC).

The micropaleontological legacy of Dr. Ramírez del Pozo in the Geominero Museum (IGME-CSIC).

S. Menéndez[1], C. Herrero[2] e I. Díaz[2]

1 Museo Geominero, IGME-CISC, C/ Ríos Rosas, 23 28003, Madrid. s.menendez@igme.es.
2 Dpto. GEODESPAL, Falcultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis, 12, 28040 Madrid. cherrero@ucm.es. idiazmeg@ucm.es.

Palabras clave: Microfósiles, Foraminíferos, Ostrácodos, Carofitas, Patrimonio Paleontológico.

Resumen

En 2017 se integra en los fondos del IGME el legado científico del Dr. José Ramírez del Pozo donado por sus herederos. Este consta, por un lado, de numerosa documentación e informes que se depositan en la Litoteca y Biblioteca del IGME. Mientras que en el Museo Geominero se incorpora una colección didáctica de microfósiles (Ma, 2020), y una colección micropaleontológica de comparación, constituida principalmente por foraminíferos, ostrácodos y carofitas. Sobre esta colección se ha procedido al inventario, contabilizándose 3.623 registros; limpieza superficial de todas las preparaciones y más detallada de parte de ellas; contaje de ejemplares con análisis tafonómico preliminar de parte de las preparaciones; y transcripción en una hoja de cálculo de toda la información manuscrita en las preparaciones, más los campos necesarios para el posterior trasvase a la base de datos del Museo Geominero. Tras estas labores se estima que la colección podría estar compuesta por más de 30.000 ejemplares. El suborden Rotaliina es el mayoritario dentro de los foraminíferos, todos los ostrácodos pertenecen al orden Podocopida y la familia Characeae es la mejor representada dentro de las carofitas. La mayoría de las muestras son españolas y en menor medida del Sahara Occidental. Acciones para la actualización y puesta en valor de esta colección ofrecen excelentes posibilidades para el desarrollo de prácticas curriculares y trabajos de iniciación a la investigación dentro del ámbito universitario.

Abstract

In 2017, the scientific legacy of Dr. Ramírez del Pozo was donated by his heirs, to the IGME. This consists, on the one hand, of numerous documentation that are deposited in the IGME's Lithotheque and Library. On the other hand, a didactic collection of microfossils (Ma, 2020) and a comparison collection, mainly consisting of foraminifera, ostracods and charophytes, are incorporated in the Geominero Museum. The tasks done so far on this collection are: inventory of the slides, 3,623 records; external cleaning of the slides and more detailed cleaning of part of them; counting of specimens with preliminary taphonomic analysis of part of them; and transcription in a spreadsheet of all the handwritten information on the slides, plus the necessary fields for the subsequent transfer to the Geominero Museum database. After this work, it is estimated that the collection could be composed of more than 30,000 specimens. The suborder Rotaliina, the order Podocopida and the family Characeae are the best represented groups in foraminifera, ostracods and charophytes, respectively. Most of the samples come from Spain and to a lesser extent from Western Sahara. Actions to update and enhance the value of this collection offer excellent possibilities for the development of curricular practices and master's tesis at the university.

Referencias

Ma, H. (2020). *Continuando con la labor docente del Dr. José Ramírez del Pozo: preparación de colecciones didácticas de microfósiles para enseñanzas pre-universitarias*. Trabajo Fin de Máster. Univ. Complutense de Madrid, 54 p. (inédito).

Descubrimiento del primer trilobites en el Ordovícico de Andorra.

Discovery of the first Ordovician trilobite from Andorra.

S. Pereira[1], J. Colmenar[2] y G. Silvério[3, 4]

1 Universidade de Coimbra, Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra, Coimbra, Portugal. ardi_eu@hotmail.com
2 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, La Calera 1, 28760 Madrid. j.colmenar@igme .es
3 Instituto de Ciências da Terra, Polo-Évora, 7002-554, Évora, Portugal. gsilverio@uevora.pt
4 Instituto de Investigação e Formação Avançada, Palácio do Vimioso, Largo Marquês de Marialva, 94, 7002-554, Évora, Portugal.

Palabras clave: Katiense, Berouniense, Formación Cavá, *Calymenella*, braquiópodos.

Resumen

Se presenta el primer registro de trilobites en el Ordovícico de Andorra, donde la única mención a este grupo de artrópodos eran unos fragmentos de *Odontochile hausmanni* identificados por Llopis LLadó (1969) en el Devónico del valle del Valira. El material ordovícico proviene de las lumaquelas del denominado "miembro limolítico" de la parte media de Formación Cavá, en dos puntos localizados en el alto de La Rabassa y en los alrededores del parking de Naturland (Sant Julià de Lòria). Los restos estudiados consisten en un pigidio y un fragmento cranidial, identificados como *Calymenella* cf. *boisseli* Bergeron, en base al número de costillas pleurales pigidiales (seis) y al área preglabelar ancha y larga, con perfil lateral inflado en la parte media, respectivamente. Su estado fragmentario y extrema rareza sugieren que fueron transportados desde otros sectores. Junto con el trilobites aparecen restos abundantes de otros grupos de invertebrados, principalmente braquiópodos, representados por *Svobodaina havliceki*, *Rostricellula termieri*, *Kjaerina* (*Villasina*) *pyrenaica* e *Iberomena sardoa*, además de briozoos ramosos, tentaculítidos incrustantes (*Cornulites*) y gasterópodos. Dicha asociación es característica del Berouniense superior del dominio perigondwánico de alta latitud, en facies someras como las representadas por ejemplo en la Fm Glauzy de la Montaña Negra, en la parte inferior de la Fm St.-Germain-sur-Ille, del Macizo Armoricano, en las "Cuarcitas con *Calymenella*" y en los "Bancos Mixtos" de la Zona Centroibérica española, así como en el techo de las fms Louredo y Cabeço do Peão de su sector portugués.

Abstract

We present the first record of trilobites in the Ordovician of Andorra, where the only previous report on the group was based on isolated fragments found in the Devonian of the Valira valley, identified as *Odontochile haussmanni* by Llopis Lladó (1969). The Ordovician discovery comes from the coquinas of the so-called "siltstone member" of the middle part of the Cavá Formation in the coll de la Rabassa and around Naturland parking (Sant Julià de Lòria). This formation crops out mainly in the southern part of the Principality and extends widely in the Spanish part of the Pyrenees. The trilobite remains, a pygidium and a cranidial fragment, have been assigned to the species *Calymenella* cf. *boisseli* Bergeron, based on its number of pygidial pleural ribs (six) and its wide and long pre-glabellar area, with a centrally inflated lateral profile. Their fragmentary state and extreme rarity suggest they were transported from other sectors. Associated with this trilobite, abundant remains of other invertebrate groups occur, mainly brachiopods, represented by *Svobodaina havliceki*, *Rostricellula termieri*, *Kjaerina* (*Villasina*) *pyrenaica* and *Iberomena sardoa*, in addition to ramose bryozoans, encrusting tentaculitoids (*Cornulites*) and gastropods. This fauna is characteristic of the upper Berounian of the high-latitude peri-Gondwananan domain, in shallow facies such as those represented, for example, in the Glauzy Fm of the Montagne Noire, the lower part of the St.-Germain-sur-Ille Fm, of the Armorican Massif, the "*Calymenella* Quartzites" and the "Bancos Mixtos" of the Spanish Central Iberian Zone as well as at the top of the Louredo and Cabeço do Peão fms on its western Portuguese part.

Referencias

Llopis Lladó, N. (1969). *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona* 39(7), 219-290.

La fauna de gasterópodos del Devónico Inferior de la costa asturiana (Zona Cantábrica). Resultados preliminares.

The Lower Devonian gastropods of the Asturian coast (Cantabrian Zone). Preliminary results.

M. Ramos Sarralde[1], A. Santos[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Geología. 33005 Oviedo. UO289392@uniovi.es, asantos@uniovi.es

Resumen: Los gasterópodos son uno de los grupos fósiles menos estudiados del Devónico cantábrico, contando con una única obra de referencia de finales del siglo XIX. En el presente trabajo se describe una fauna de gasterópodos devónicos pertenecientes a las familias Platyceratidae, Orthonychiidae y Tropidodiscidae proveniente de la sección costera de la Formación Pizarras de La Ladrona (Emsiense, Zona Cantábrica) cercana a Santa María del Mar (Asturias, España). Se comparan los resultados obtenidos con los mencionados arriba, y a su vez se estudian sus relaciones paleobiogeográficas y se analizan brevemente sus relaciones paleoecológicas.

Palabras clave: Gasterópodos, Platyceratidae. Devónico Inferior, Asturias, Zona Cantábrica.

Abstract: *The Devonian gastropods from the Cantabrian Zone haven't been properly studied since the XIX century. In this paper, a Devonian gastropods fauna belonging to the families Platyceratidae, Orthonychiidae and Tropidodiscidae from the coastal section of the La Ladrona Shale Formation (Emsian, Cantabrian Zone) near Santa María del Mar, (Asturias, Spain) is described. The results are compared with those mentioned above, and their paleobiogeographical and paleoecological implications are briefly studied.*

Key words: *Gastropods, Platyceratidae, Lower Devonian, Asturias, Cantabrian Zone.*

INTRODUCCIÓN

Los gasterópodos devónicos de la Zona Cantábrica no han recibido apenas atención desde el siglo XIX, siendo los *Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice* de Charles Barrois (1882) la primera y única obra que entra en detalle en este grupo. Desde entonces, se han sucedido trabajos que han ampliado el conocimiento de la estratigrafía y paleontología del Devónico cantábrico empleando las series del litoral asturiano (Truyols et al., 1990 y García-Alcalde, 1992), pero los gasterópodos han sido sistemáticamente ignorados quizás por su escasez, falta de valor bioestratigráfico y/o complicada taxonomía. Esto produce un sesgo en el conocimiento de las comunidades bióticas devónicas que no afecta únicamente a los gasterópodos, experimentando los bivalvos, nautiloideos, receptaculítidos, conularios y otros grupos poco abundantes una situación similar. El objetivo de este trabajo es una primera descripción de una fauna de gasterópodos del Devónico Inferior de la costa asturiana. A su vez, pretendemos que estos resultados sirvan como soporte para estudios más avanzados en la paleoecología, sistemática, evolución y paleobiogeografía de este grupo.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El conjunto de gasterópodos estudiados proviene de la formación Pizarras de La Ladrona (entre el Cabo La Vela y la isla de La Ladrona), de edad Emsiense Inferior

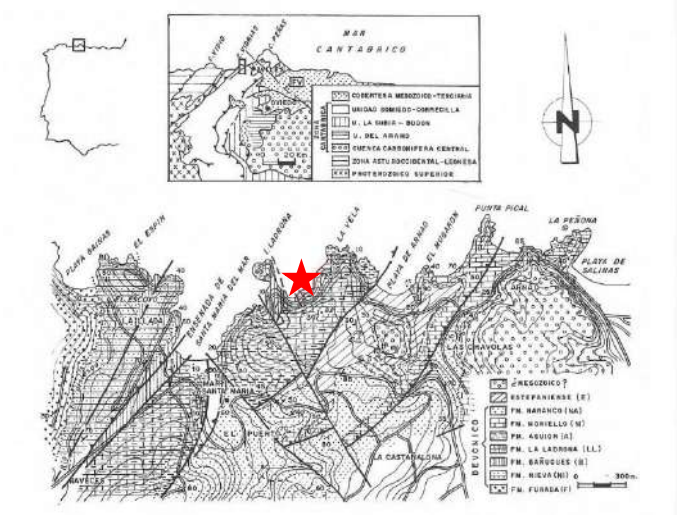


FIGURA 1. Mapa de situación y mapa geológico del área de estudio. La sección de la que provienen los ejemplares está señalada con asterisco. Extraído de García-Alcalde (1992).

– Emsiense Superior de acuerdo con García Alcalde (1992), englobada dentro del Grupo Rañeces (Fig.1). A su vez, el Grupo Rañeces se engloba dentro de la Unidad de Somiedo de la Zona Cantábrica (Truyols et al., 1990). Las Pizarras de La Ladrona afloran alrededor del Cabo Peñas y en las cercanías de Santa María del Mar, y corresponden a una serie de pizarras y margas negras con abundante fauna nerítica intercaladas por gruesos bancos de calizas bioclásticas, interpretadas como

correspondientes a un ambiente de rampa carbonatada (García-Alcalde, 1992) (Fig. 2). En la sección estudiada, a pesar de la intensa deformación, la calidad de conservación de los restos fósiles, que son extremadamente abundantes tiende a ser de buena a muy buena, razón por la que se ha elegido como punto de partida para el estudio. Cabe destacar que los gasterópodos son uno de los elementos faunísticos más raros de la unidad, pero, aun así, destacan en abundancia frente a otras formaciones devónicas de la Zona Cantábrica.

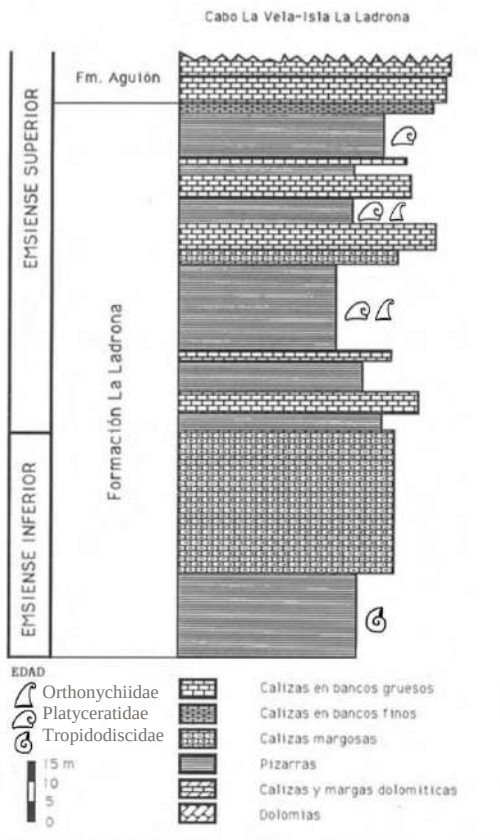


FIGURA 2. Columna simplificada de la Formación Pizarras de La Ladrona. Modificado de García-Alcalde (1992).

MÉTODOS

El material se ha recolectado a lo largo de varias visitas al afloramiento entre los años 2022 y 2024. Todas las muestras fueron preparadas empleando micropercutores neumáticos y chorro de arena con polvo de hierro y dolomita de 90 μm, y posteriormente se estudiaron empleando una lupa binocular. Las fotografías de los especímenes se tomaron con una cámara Canon EOS 250D SLR equipada con un objetivo Canon EF 100mm f/2,8L Macro IS USM, todo ello montado en un Kaiser RS XA KA5411. Se utilizaron técnicas de "apilamiento de enfoque", que consiste en la toma de una serie de fotos del mismo espécimen, enfocando diferentes planos para obtener una imagen final, permitiendo imágenes con la profundidad de campo necesaria. Dependiendo del tamaño, han sido tomadas entre tres y diez fotos de cada espécimen. Las fotos se fusionaron con el programa Helicon Focus (Helicon Soft Ltd. 2000-2021).

Los ejemplares se encuentran depositados en la Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo.

SISTEMÁTICA

En total se han identificado 15 ejemplares de gasterópodos pertenecientes a 7 especies.

Clase Gastropoda Cuvier, 1797
Orden Bellerophontida Ulrich and Scofield, 1897
Familia Tropidodiscidae Knight, 1956
Género *Tropidodiscus* Meek y Worthen, 1866
***Tropidodiscus* sp.** (Fig. 3A)

Un ejemplar, proveniente de las pizarras negras de la parte inferior de la Fm. La Ladrona, conservado como un molde interno comprimido lateralmente y con un grado de conservación bastante pobre. Concha con enrollamiento isostrófico, oxycónica y ornamentada con finas lamelas imbricadas.

Subclase Neritimorpha Koken, 1896
Orden incierto
Superfamilia Platyceratoidea Hall, 1859
Familia Platyceratidae Hall, 1859
Género *Praenatica* Perner 1903
Praenatica cheloti (Oehlert y Oehlert, 1887)

Dos ejemplares provenientes de la parte superior de la serie, conservados como conchas calcíticas con las últimas vueltas deterioradas. Concha naticiforme sin senos, con la vuelta exterior mucho más ancha que las interiores que le da un aspecto de "castaña" característico. Ornamentación compuesta por lamelas de crecimiento.

Género *Platyceras* Conrad 1840
Platyceras priscum (Goldfuss, 1844) (Fig. 3B)

Tres ejemplares provenientes de la parte superior de la serie, conservados como conchas calcíticas, por lo general comprimidas o fracturadas. Corresponden a una forma típica ardeno-renana, con concha irregularmente capuliforme de no más de tres vueltas, siendo la última considerablemente más ancha que las anteriores. Presentan una ornamentación compuesta por lamelas relativamente gruesas. Puesto que en ocasiones crecen sobre las tecas de los crinoideos, son una especie muy polimórfica que se va adaptando a la forma de su anfitrión y puede ir desarrollando pliegues y otras irregularidades, especialmente en el área de la apertura.

Platyceras compressus (Goldfuss, 1832) (Fig. 3C)

Tres ejemplares provenientes de la parte superior de la serie, conservados como conchas calcíticas con un buen grado de conservación, ocasionalmente fracturadas o algo aplastadas. Especie reconocible por su forma estrecha y gancho minúsculo en proporción con la última vuelta, apretado hacia adentro. Superficie lisa con finas estrías de crecimiento.

Género *Platyostoma* (Conrad, 1842)
Platyostoma lineata (Conrad, 1842) (Fig. 3D)

Dos ejemplares, por lo general bien conservados y con gruesas conchas naticiformes de naturaleza calcítica. Conchas con varias vueltas, con un surco leve en la última y sin irregularidades aperturales. Ornamentación compuesta por finas lamelas de crecimiento y liras longitudinales que no siempre se conservan.

Orden Cyrtoneritida
Familia Orthonychiidae Bandel & Frýda, 1999
Género *Orthonychia* Hall 1843
Orthonychia protei (Oehlert, 1883)

Un ejemplar bien conservado proveniente de la parte alta de la Fm. La Ladrona. Concha calcítica gruesa y alta, cyrtocónica, con las primeras vueltas fuertemente apretadas y la última vuelta extremadamente dilatada y sin enrollamiento, dándole un aspecto patelliforme. Al menos dos surcos longitudinales y ornamentación compuesta por lamelas de crecimiento de mediano grosor.

Orthonychia sp. (Figs. 3E, 3F)

Tres ejemplares bastante bien conservados como conchas calcíticas finas, provenientes de la parte media-alta de la Fm. La Ladrona. Concha patelliforme con una única vuelta que se enrolla sobre sí misma y entre 3 y 6 surcos longitudinales. Ornamentación compuesta por lamelas de crecimiento que se van volviendo progresivamente más gruesas hacia la abertura En uno de los ejemplares con mejor conservación se observan estructuras flabelliformes en la apertura que se asemejan a una "falda" y se proyectan hacia la parte posterior de la concha.

DISCUSIÓN

En lo que a antecedentes se refiere, Barrois (1882) describe una fauna de gasterópodos relativamente variada de edad devónica, asignándola a diferentes unidades que, a lo largo de casi un siglo y medio, se han redefinido varias veces por varios autores (Truyols et al., 1990, García-Alcalde 1992). En este artículo se emplea la estratigrafía definida por García-Alcalde (1992), por lo que es bastante probable que las unidades de procedencia que cita Barrois sean en su mayoría las actuales formaciones La Ladrona y Moniello. A su vez, algunos de los taxones que describe el autor anterior han sido reclasificados: "*Platystoma*" *janthinoides*, que probablemente sea equivalente a *Praenatica cheloti*, (de acuerdo a las mismas razones expuestas por Frýda et al. 2009). Es posible que incluso pertenezcan a otro taxón con características polimórficas, como es el caso del *Platyceras priscus* var. *undulatus* descrito por Barrois. Esta especie probablemente sea asignable a *Platyceras priscus* dentro de su reconocida variabilidad intraespecífica o incluso al género *Orthonychia* puesto que se tratan de organismos cuyo modo de vida ocasionalmente los lleva a crecer en torno a la superficie de su anfitrión. A su vez, Barrois (1882) no menciona la presencia de bellerophontidos en los materiales correspondientes al Devónico Inferior, pero la existencia de un ejemplar en el material estudiado confirma su presencia en, al menos, los materiales del Emsiense Inferior.

Respecto a la tafonomía, en el caso de la familia Tropidodiscidae no se conserva la concha, pero en los platycerátidos y ortoníquidos las gruesas conchas de naturaleza calcítica se conservan relativamente bien, aunque es común que aparezcan comprimidas, fracturadas, o las dos cosas a la vez. Puesto que el medio de la Fm. La Ladrona es interpretado como una rampa carbonatada con un gran aporte de detritos finos (García-Alcalde, 1992), es lógico pensar que las conchas de estos animales actuaban como sustrato para otros organismos de la misma forma que los propios gasterópodos vivían sobre braquiópodos y crinoideos (Horný, 2000). El estudio de las muestras permitió la identificación de braquiópodos inarticulados del género *Petrocrania* incrustando las conchas, al igual que las cicatrices de dicha incrustación (Figs. 3C-D). También se observaron perforaciones asociadas a briozoos ctenostomados afectando tanto a las conchas de los gasterópodos como a las de los braquiópodos incrustantes.

La paleoecología de los platycerátidos y ortoníquidos es compleja y está sujeta a discusión, con algunos autores defendiendo un modo de vida parasitario sobre el tegmen de los crinoideos sobre los que se suelen encontrar (Gahn y Baumiller, 2003). Otros autores (Hinde, 1885) proponen un modo de vida coprófago. Sin embargo, Horný (2000), propone que estos organismos eran detritívoros. En los ejemplares estudiados no se halló ningún gasterópodo asociado a un crinoideo, lo que implica que se deben seguir recolectando muestras para valorar sus relaciones en la Fm. La Ladrona. Más aún, resulta interesante que se haya puesto en duda (Nützell et al, 2023) que los pliegues y anomalías en la abertura de los ortoníquidos se deban a su modo de vida, ya que esto podría implicar que algunos de los ejemplares estudiados pudiesen tratarse de nuevas especies.

Por último, la presencia de estas faunas refuerza las ya conocidas afinidades ardeno-renanas (*Platyceras priscum*, *Platyceras compressus*) de las faunas del Emsiense asturleonés. A su vez, *Praenatica cheloti* y *Orthonychia protei* son propios del Emsiense de Bretaña (Frýda et al., 2008; Frýda et al., 2009), indicando también afinidades armoricanas.

CONCLUSIONES

En la sección Cabo la Vela - La Ladrona se han identificado un total de 7 especies de gasterópodos con afinidades paleobiogeográficas armoricanas y ardeno-renanas. Los ejemplares tienen una edad Emsiense Inferior-Emsiense Superior y presentan incrustaciones de braquiópodos inarticulados y perforaciones de briozoos ctenostomados. Es necesaria más investigación para determinar sus relaciones paleoecológicas y, en algunos casos, su taxonomía. También es imprescindible la prospección futura de más secciones de edad devónica,

con el objetivo de aumentar el conocimiento disponible de este grupo.

AGRADECIMIENTOS

Especiales agradecimientos a R. Domínguez Ugidos y Dr. E. Mayoral (UHU) por la preparación y fotografía de las muestras respectivamente. Queremos agradecer también a F. Höbich, J. Álvaro, J. Manzano, M. Mier y D. Alonso por su ayuda durante la recolección de los ejemplares en el campo. Este artículo ha sido publicado en el marco del proyecto PID2019-104625RB-100, financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

Barrois, C. (1882): Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice. *Mémoires de la Societé Géologique du Nord*, 2 (1): 1-630.

Frýda, J., Racheboeuf, P.R. y Frýdova, B. (2008): Mode of life of early Devonian *Orthonychia protei* (Neritimorpha, Gastropoda) inferred from its post-larval shell ontogeny and muscle scars. *Bulletin of Geosciences*, 83: 491–502.

Frýda, J., Racheboeuf, P.R., Frýdova, B., Ferrova, L., Mergl, M. y Berkyova, S. (2009): Platyceratid gastropods - stem group of patellogastropods, neritimorphs or something else? *Bulletin of Geosciences*, 84: 107–120.

Gahn, F.J. y Baumiller, T.K. (2003): Infestation of Middle Devonian (Givetian) camerate crinoids by platyceratid gastropods and its implications for the nature of their biotic interaction. *Lethaia*, 36(2): 71–82.

García-Alcalde, J.L. (1992): El Devónico de Santa María del Mar (Castrillón, Asturias, España). *Revista Española de Paleontología*, 7 (1): 53-79.

Hinde, G.J. (1885): Description of a new species of crinoids with articulated spines. *Annals and Magazine of Natural History*, 5: 157–173.

Horný, R.J. (2000): Mode of life of some Silurian and Devonian platyceratids. *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 75(2): 135–143.

Knight, J.B., Cox, L.R., Batten, R.L. y Yochelson, E.L. (1960): Descripciones sistemáticas. En *Treatise on invertebrate paleontology. Part I. Mollusca 1* (Moore, R.C., ed). University of Kansas Press, Lawrence, Kansas, 84-241.

Nützell, A., Ebberstad, J.O., Seuss, B., Munnecke A., Mapes, R.H. y Cook, A.G. (2023): On Paleozoic platycerate gastropods. *Zitteliana*, 97: 29-51.

Truyols, J., Arbizu, M.A., García-Alcalde, J.L., García-Lopez, S., Méndez-Bedia, I., Soto, F., y Truyols-Massoni, M. (1990): The Asturian-Leonese Domain (Cantabrian Zone) Part II: Cantabrian and Palentine Zones. 2: Stratigraphy. En *Pre-Mesozoic Geology of Iberia* (Dallmeyer, R.D. y Martínez García, E., eds). Springer Verlag, Berlín, 10-19.

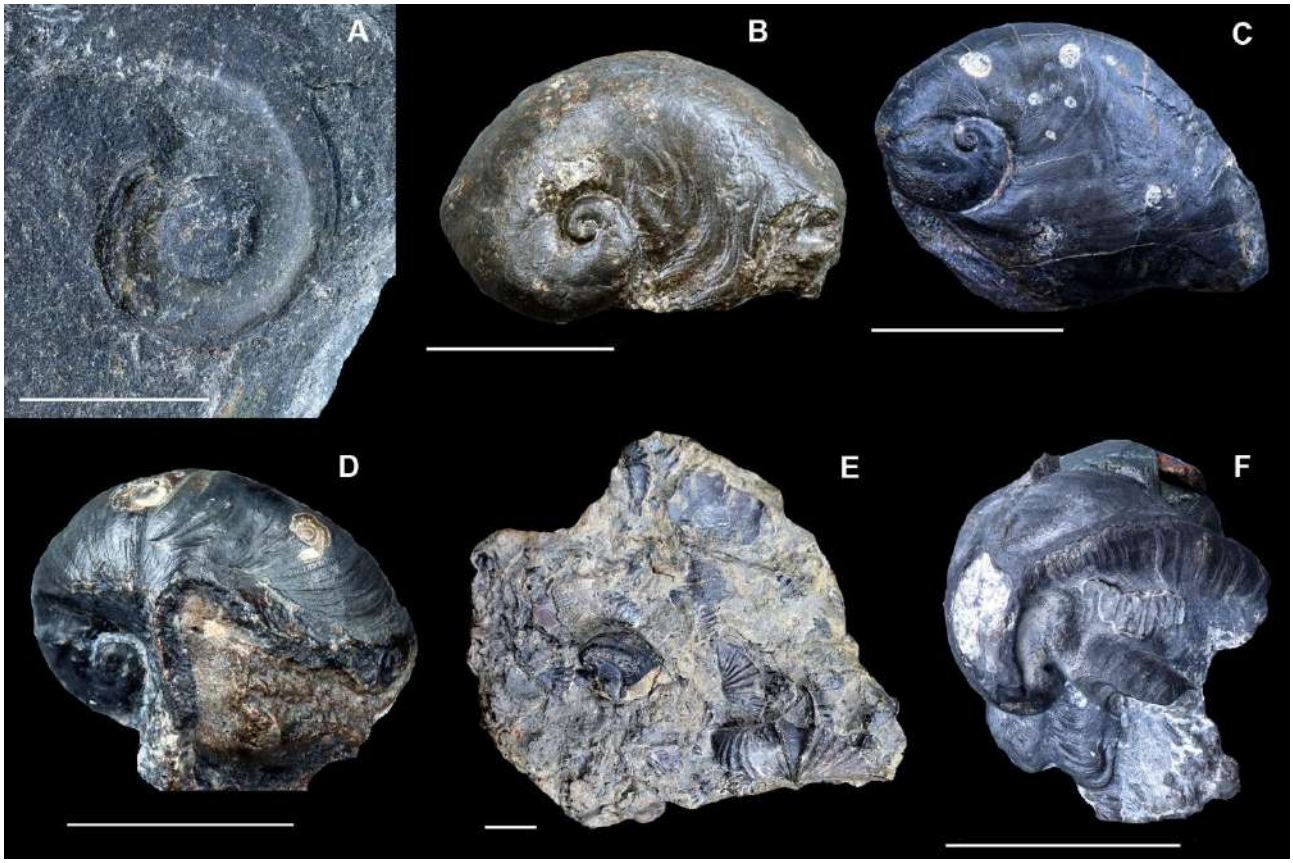


FIGURA 3. A) *Tropidodiscus* sp., vista apical. B) *Platyceras priscus*, vista apical. C) *Platyceras compressus*, vista apical con incrustaciones y cicatrices de incrustación de braquiópodos inarticulados. D*) Platyostoma lineata*, vista apical en detalle mostrando las incrustaciones y cicatrices de incrustación de braquiópodos inarticulados. E) *Orthonychia* sp., vista general de la muestra con el ejemplar en el centro, acompañado de braquiópodos, briozoos y crinoideos. F) *Orthonychia* sp., vista lateral. Escala:1 cm.

Bioestratigrafía del Luteciense – Bartoniense (SBZ 16 – 17) en el flanco oeste del anticlinal de Boltaña (cuenca de Jaca-Pamplona, Zona Surpirenaica)

Biostratigraphy of the Lutetian – Bartonian boundary (SBZ 16 – 17) in the western flank of the Boltaña anticline (Jaca-Pamplona Basin, South-Pyrenean Zone)

R. Silva-Casal[1,2], P. Arbués[1,2], A. Vinyoles[1,2], M. López-Blanco[1,2], M. Garcés[1,2], L. Valero[1,2], E. Beamud[2,3], P. Santolaria[1,2]

1 Dpto. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, UB. 08028 Barcelona. m.lopezblanco@b.edu
2 Institut de Recerca UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, UB. 08028 Barcelona.
3 Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB GEO3BCN. 08028 Barcelona.

Palabras clave: SBZ, *Nummulites*, límite Luteciense – Bartoniense, magnetoestratigrafía

Resumen

En este trabajo se analiza, desde un punto de vista bioestratigráfico, las faunas de macroforaminíferos del límite Luteciense–Bartoniense a lo largo de una serie estrátigrafica localizada en el flanco oeste del anticlinal del Boltaña, en el margen sur del río Ara (Zona Surpirenaica, Cuenca de Jaca–Pamplona).

En un intento por recalibrar las SBZ (Shallow Benthic Zones) con la escala tiempo de polaridad magnética (GPTS), la Zona Surpirenaica ha proporcionado series adecuadas para una recalibración fiable de las SBZ del Luteciense, en las Sierras Exteriores, y del Bartoniense–Priaboniense inferior, en la cuenca Surpirenaica oriental. Sin embargo, la ausencia de una serie continua en facies someras con presencia de macroforaminíferos, a lo largo del límite Luteciense–Bartoniense, ha impedido hasta la fecha la recalibración de dicho límite (SBZ 16–17).

La sección compuesta de Aguilar–Planiello ofrece un registro continuo a lo largo del límite Luteciense–Bartoniense en facies marinas someras. En la base de esta sección, el Luteciense superior (SBZ 16) se encuentra caracterizado por una asociación de *Nummulites deshayesi* y *N.* cf. *dufrenoyi*. A techo, una asociación compuesta por *N. perforatus* y *N. puschi* caracteriza el Bartoniense (SBZ 17). La obtención de biomarcadores típicos del Luteciense superior (SBZ 16) y del Bartoniense (SBZ 17) muestra el potencial de la sección compuesta de Aguilar–Planiello para la recalibración magnetoestratigráfica de este límite.

Abstract

This work deals with the biostratigraphic analysis of larger foraminiferal faunas of the Lutetian – Bartonian boundary along a succession located at the western flank of the Boltaña anticline, in the southern margin of the Ara River (South Pyrenean Zone, Jaca–Pamplona Basin).

In the attempt to recalibrate the SBZs (Shallow Benthic Zones) with the Geomagnetic Polarity Time Scale (GPTS), the South Pyrenean Zone has provided adequate sections for a reliable recalibration of the Lutetian SBZs in the External Sierras and the Bartonian–lower Priabonian in the eastern South-Pyrenean Basin. Nevertheless, the absence of a continuous outcrop with larger foraminiferal facies for the Lutetian–Bartonian transition has prevented a precise recalibration of this boundary (SBZ 16–17).

The stratigraphic record of the Aguilar–Planiello composite section on the western flank of the Boltaña anticline offers a continuous shallow marine succession for the Lutetian–Bartonian transition. At the base of this succession the association of *Nummulites deshayesi* and *N.* cf. *dufrenoyi* allows the definition of the upper Lutetian or SBZ 16. The Bartonian (SBZ 17) is characterized by the association of *N. perforatus* and *N. puschi*. The identification of these biomarkers evidences de potential of the composite section of Aguilar–Planiello for the magnetostratigraphic recalibration of the SBZ 16-SBZ 17 boundary.

Micro-fluorescencia de rayos X y su incorporación a estudios paleontológicos

Micro-XRF and its incorporation in paleontological studies

R. A. Tagle[1], y A. H. Menzies[1]

1 Bruker Nano Analytics GmbH, Am Studio 2D, Berlin 12489, Germany: roald.tagle@bruker.com

Resumen: El desarrollo de técnicas analíticas espectroscópicas no invasivas ha sido fundamental para satisfacer las necesidades en ámbitos del arte y la conservación (A&C), debido a la ventaja de operar con una preparación mínima o nula de la muestra. Las técnicas basadas en rayos X pueden ser usadas sin una cámara cerrada de análisis, evitando limitaciones en tamaño o transporte. Estas técnicas han experimentado mejoras en: reducción del tamaño de los equipos, resolución espacial, transportabilidad y detectabilidad de elementos livianos y trazas. No obstante, en la paleontología no se han adoptado estas técnicas. Por esto, se expone cómo estas pueden integrarse satisfactoriamente a estudios paleontológicos. Con la fluorescencia de rayos X se puede determinar composiciones químicas *in situ*, durante excavaciones o en laboratorio. Entre sus aplicaciones, se cuentan el estudio no invasivo de materiales fósiles y su matriz circundante, la reubicación de especímenes antiguos o saqueados, e información sobre la procedencia e identificación de estratos originales de especímenes antiguos, mediante el estudio quimioestratigráfico del área fuente. Se presentan ejemplos de estudios basados en la fluorescencia de rayos X y equipos portátiles y de microanálisis. La discusión acerca de las potencialidades de esta técnica puede abrir nuevos horizontes en estudios paleontológicos.

Palabras clave: micro-XRF, microanálisis, paleontología, fósiles, elementos trazas

***Abstract*:** *The development of non-invasive spectroscopic analytical techniques has been essential to meet the needs in the fields of art and conservation (A&C), due to the advantage of operating with minimal or no sample preparation. X-ray-based techniques can be used without a closed analysis chamber, avoiding limitations in size or transportation. These techniques have experienced improvements in: reduction in equipment size, spatial resolution, transportability and detectability of light and trace elements. However, these techniques have not been adopted in paleontology. For this reason, it is shown how these can be satisfactorily integrated into paleontological studies. With X-ray fluorescence, chemical compositions can be determined in-situ, during excavations or in the laboratory. Its applications include the non-invasive study of fossil materials and their surrounding matrix, the relocation of ancient or looted specimens, and information on the provenance and identification of original strata of ancient specimens, through the chemostratigraphic study of the source area. Examples of studies based on X-ray fluorescence and portable and microanalysis equipment are presented. The discussion about the potential of this technique can open new horizons in paleontological studies.*

Key words: *micro-XRF, microanalysis, paleontology, fossils, trace elements*

Los últimos años han sido testigos del desarrollo de una amplia gama de técnicas analíticas no invasivas, especialmente usadas en el ámbito del arte y la conservación (A&C). Estas técnicas, basadas en diversos principios espectroscópicos, usan la interacción de ondas electromagnéticas como son los rayos X, el infrarrojo (IR) y el ultravioleta (UV), con las muestras. Estas técnicas han sido fundamentales para satisfacer las necesidades y requisitos de los estudios en A&C. Su principal ventaja radica en la capacidad de operar con una preparación mínima o nula de la muestra, una opción prácticamente indispensable en muchos de estos estudios.

En particular, las técnicas basadas en rayos X pueden también ser usadas de forma abierta, es decir sin la necesidad de una cámara cerrada para el análisis de la muestra, evitando limitaciones en tamaño o transporte. Estas técnicas también han experimentado avances significativos en términos de reducción del tamaño de los instrumentos, mejoras en resolución espacial, transportabilidad y sensibilidad en la detección de elementos livianos y trazas. Este progreso ha generado una revolución en el campo de los estudios de materiales en el ámbito del arte y la conservación, transformando museos e instituciones que trabajan en esta disciplina, considerada relativamente "conservadora" en la ciencia, en pioneros de numerosas tecnologías de vanguardia. No obstante, es interesante observar que otros campos, que no enfrentan desafíos similares en términos de preparación de muestras, no han adoptado estas técnicas de la misma manera. Un ejemplo destacado es el campo de la paleontología, que, a pesar de albergar muchos

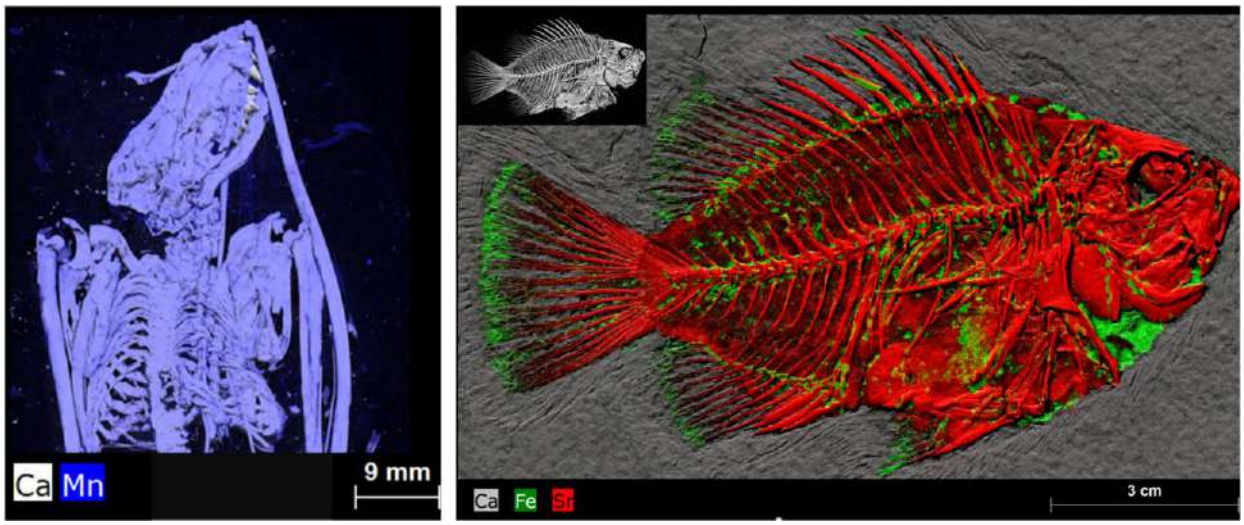


FIGURA 1. *Distribución elemental obtenida con M4 TORNADO de un murciélago fósil de Messel Pit, Alemania (izq.) así como un pez fosilizado de la formación Green River (der.).*

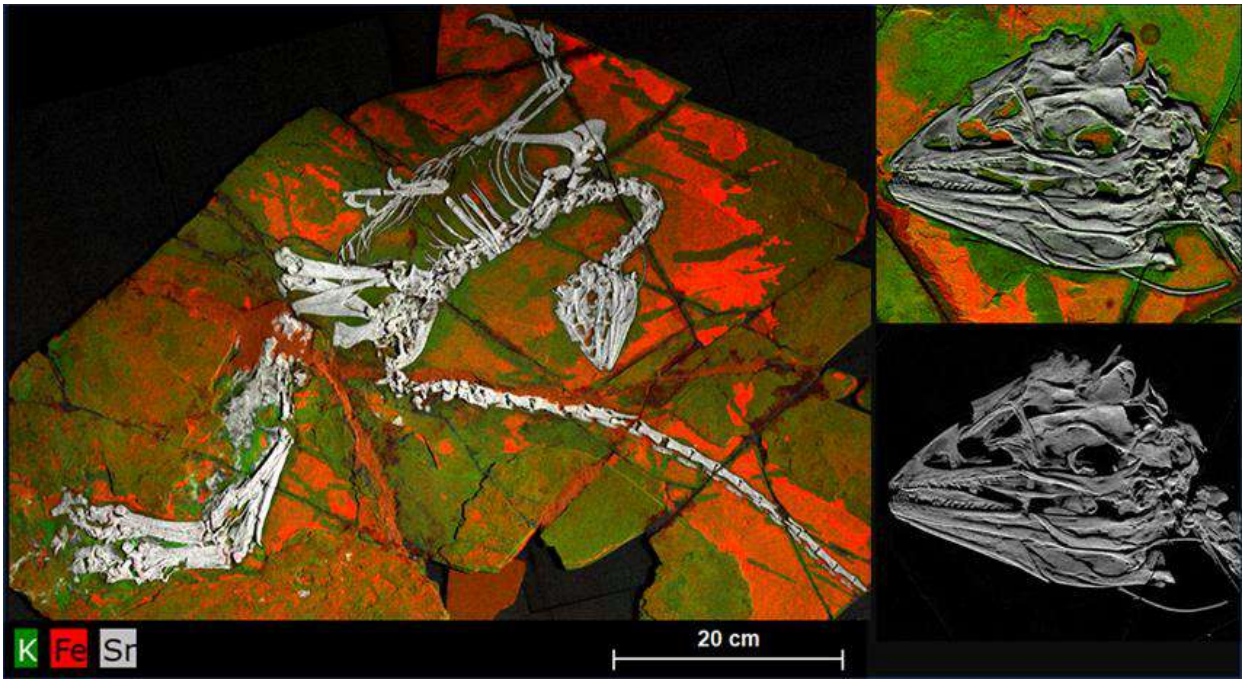


FIGURA 2. *Estudio de micro-XRF del dinosaurio troodóntido Jianianhualong Tengi, que revela nuevas señales biológicas y tafonómicas (Li et. al, 2021).*

especímenes únicos y valiosos en museos y colecciones, no ha incorporado estas técnicas de manera generalizada, a excepción de algunos casos particulares. En este contexto, el propósito de este trabajo es presentar cómo las técnicas basadas en la fluorescencia de rayos X pueden integrarse de manera satisfactoria en los estudios paleontológicos, aprovechando las lecciones aprendidas en el ámbito del arte y la conservación.

La fluorescencia de rayos X posee la capacidad de determinar composiciones químicas de manera rápida e in situ durante excavaciones o procesos de preparación en el laboratorio. Estas técnicas resultan invaluables para abordar una variedad de problemas analíticos, desde la selección óptima de muestras hasta el análisis de aquellas que no son fácilmente transportables, ya sea debido a su tamaño, consistencia, o incluso por restricciones locales. Esto brinda una oportunidad única para llevar a cabo estudios químicos bajo rigurosos criterios de preservación del sitio.

La lista de aplicaciones es extensa, permitiendo no solo el estudio no invasivo de materiales fósiles, sino también de la matriz de sedimento circundante, el cual representa un testigo químico único del espécimen estudiado. Las composiciones determinadas tanto de los sedimentos como del propio fósil pueden facilitar la reubicación de especímenes antiguos o saqueados para los cuales la información estratigráfica y geográfica no está bien documentada. La combinación de datos de elementos mayores y traza de la muestra con un estudio quimioestratigráfico detallado del área fuente, puede proporcionar información sobre la procedencia y posiblemente la capacidad de identificar los estratos

originales de especímenes antiguos, incluso holotipos (Fig.1).

Varios estudios de fósiles han ayudado a revelar procesos interesantes de enriquecimiento de elementos como Ni, Cu y Zn asociados a órganos blandos internos como el hígado y los pulmones. De manera similar, el enriquecimiento de elementos como Cu y Ti se puede observar asociado a plumas fósiles. Otro ejemplo, el escaneo mediante micro-XRF de superficies óseas de especímenes de dinosaurios excepcionalmente bien conservados ha revelado una preservación única de tejidos blandos, abriendo una ventana para la reconstrucción de la evolución de los dinosaurios (Fig. 2) Las secciones pulidas de material óseo, comúnmente utilizadas en estudios osteohistológicos para examinar los patrones de crecimiento de vertebrados fósiles, son candidatos ideales para escaneos de micro-XRF.

Los equipos y ejemplos de estudios que presentaremos se basan en la fluorescencia de rayos X, tanto portátil como en microanálisis, e incluyen equipos como TRACER 5g, M4 TORNADO, así como M6 JETSTREAM de la firma Bruker. La discusión con especialistas en este campo, así como el intercambio de experiencias sobre las potencialidades de esta técnica en el marco de este congreso, pueden abrir nuevos horizontes en los estudios paleontológicos.

REFERENCIAS

Li, J., Pei, R., Teng, F., Qiu, H., Tagle, R., Yan, Q., Wang, Q., Chu, X., y Xu, X. (2021). Micro-XRF Study Of The Troodontid Dinosaur Jianianhualong Tengi Reveals New Biological And Taphonomical Signals. *Atomic Spectroscopy*, 41(1): 1-11.

Nuevas Perspectivas y Hallazgos en Macroforaminíferos Hialinos del Cretácico Superior a través del Proyecto IBERINSULA y ForamLab

New Perspectives and Findings in Upper Cretaceous Hyaline Larger Foraminifera through the IBERINSULA Project and ForamLab

V. Vicedo[1] y R. Robles-Salcedo[2]

1 Museu de Ciències Naturals de Barcelona, Passeig Picasso s/n, 08003, Barcelona, España. vvicedov@bcn.cat
2 Myrmex. Serveis tècnics a les Ciències Natural, Barcelona, España. r.robles@myrmex.cat

Palabras clave: paleobiogeografía, paleobiodiversidad, ecosistemas marinos, difusión científica.

Resumen

En el contexto del proyecto "IBERINSULA" (PID2020-113912GB-100) y dentro de la línea de investigación "ForamLab" del Museu de Ciències Naturals de Barcelona, hemos proporcionado nuevas perspectivas sobre las relaciones paleobiogeográficas y las condiciones paleoambientales de los macroforaminíferos hialinos durante el Cretácico superior (Vicedo y Robles-Salcedo, 2022; Robles-Salcedo y Vicedo, 2023). Nuestros estudios amplían el conocimiento sobre la paleobiodiversidad de los ecosistemas marinos al definir nuevos taxones. También proponemos nuevas relaciones filogenéticas entre poblaciones occidentales y orientales de la cuenca del Tetis durante el Campaniense y Maastrichtiense, incluyendo la identificación del registro más antiguo de los grupos Lockhartiinae y Praelockhartiinae en la cuenca Bética. Además, sugerimos diferentes patrones migratorios al revelar similitudes entre algunos grupos de hialinos en las cuencas Pirenaica y Bética, claramente distintos de las especies en cuencas americano-caribeñas. Estos descubrimientos, en el marco de proyectos colaborativos financiados, representan un avance significativo en el conocimiento científico y ejemplifican la importancia de seguir profundizando en la comprensión de la paleontología global y regional. El objetivo de esta comunicación es compartir estos hallazgos con la comunidad científica y poner énfasis en la necesidad de la difusión de los resultados de proyectos financiados para fortalecer la transparencia y fomentar la colaboración científica.

Abstract

In the context of the "IBERINSULA" project (PID2020-113912GB-100) and within the "ForamLab" research line of the Museu de Ciències Naturals de Barcelona, we have provided new perspectives on the palaeobiogeographic relationships and palaeoenvironmental conditions of hyaline larger foraminifera during the Late Cretaceous (Vicedo and Robles-Salcedo, 2022; Robles-Salcedo & Vicedo, 2023). Our studies expand knowledge about the palaeobiodiversity of marine ecosystems by defining new taxa. We also propose new phylogenetic relationships between western and eastern populations of the Tethys basin during the Campanian and Maastrichtian, including the identification of the oldest record of the Lockhartiinae and Praelockhartiinae groups in the Baetic basin. In addition, we suggest different migratory patterns by revealing similarities between some groups of hyalines in the Pyrenean and Baetic basins, clearly distinct from species in American-Caribbean basins. These discoveries, in the framework of funded collaborative projects, represent a significant advance in scientific knowledge and exemplify the importance of continuing to deepen the understanding of global and regional palaeontology. The aim of this communication is to share these findings with the scientific community and to emphasize the need to disseminate the results of funded projects to strengthen transparency and foster scientific collaboration.

Referencias

Robles-Salcedo, R., Vicedo, V. (2023). Palaeoenvironments of an Upper Cretaceous mixed carbonate-siliciclastic shelf of the external Prebetic domain (Valencia, SE Spain). *Facies* 69, 13. https://doi.org/10.1007/s10347-023-00670-x.

Vicedo, V., Robles-Salcedo, R. (2022). Late Cretaceous larger rotaliid foraminifera from the westernmost Tethys. *Cretaceous Research* 133, 105-137. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2022.105137.

Actualización del mapa geológico de Cataluña: Estrategia, metodología y resultados preliminares

Update of the geological map of Catalonia: strategy, methodology and preliminary results

J. Belenguer[1], R. Pi[1], G. Subiela[1], M. Vilà[1]

1 Institut Catogràfic i Geològic de Catalunya, 08038 Barcelona
jorge.belenguer@icgc.cat, roser.pi@icgc.cat, guillem.subiela@icgc.cat, miquel.vila@icgc.cat

Palabras clave: mapa geológico, Catalunya, geología regional, Sistemas de información geográfica, NE península Ibérica

Resumen

Desde 2022, una parte significativa de los recursos que el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya dedica a la cartografía geológica se centran en la revisión y la actualización del mapa geológico de Cataluña 1:50.000. La previsión es que a finales de 2026 se disponga de una nueva versión de este mapa, que abarca todo el territorio de Cataluña, el cual se estructurará en tres capas de información cartográfica independientes: terrenos antrópicos, depósitos cuaternarios y basamento pre-Cuaternario.

En este trabajo se presenta la estrategia, la metodología, y algunos de los avances más relevantes de este proceso de revisión que incluyen: 1) Una nueva cartografía del basamento paleozoico del bloque del Priorat-Prades; 2) El análisis estructural de las unidades mesozoicas del sector meridional de la Cadena Costera Catalana; 3) La correlación de los depósitos paleógenos del ámbito catalán de la cuenca de antepaís del Ebro; 4) Una nueva interpretación de los depósitos neógenos de las cuencas del Baix Ebre y Mora; 5) La mejora de la traza de los contactos y la correlación de los depósitos cuaternarios de la cuenca del Segre; 6) La cartografía de los principales terrenos antrópicos asociados a viales o a la modificación de la red fluvial natural; 7) La síntesis y encaje de la información derivada del mapa geológico 1:25.000 (que actualmente cubre poco más de una tercera parte del territorio de Cataluña); 8) El sistema de caracterización de las unidades geológicas; y 9) El planteamiento de la revisión del basamento pre-cuaternario de los Pirineos catalanes.

Más allá del objetivo de conseguir una nueva versión del mapa geológico, esta revisión tiene como objetivo lograr que a medio plazo el mapa geológico de Cataluña se convierta en un sistema de información que permita la actualización de sus contenidos de forma sencilla y periódica.

Abstract

Since 2022, in terms of geological mapping, a significant amount of resources from the Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya are dedicated to the review and update of the geological map of Catalonia at 1:50.000 scale. A new version of this map is expected by the end of 2026, including three main layers of information covering the entire territory: anthropogenic grounds, Quaternary deposits, and pre-Quaternary basement.

Strategy, methodology and some of the most relevant updates are shown in this communication. Some of this examples include: 1) a new geological map of the Paleozoic of the Priorat-Prades Block; 2) the geomorphological and structural adjustment of the Mesozoic rocks in south-western areas of the Catalan Coastal Ranges; 3) a correlation of the Paleogene rocks of the Ebro Foreland Basin; 4) a new interpretation of the Neogene sedimentary model in the Baix Ebre and Mora Basins; 5) a correlation and geomorphological analysis of the Quaternary sediments of the Segre Basin; 6) a remote mapping of the main artificial grounds related to the road network or the channeling of the fluvial network; 7) a synthesis and integration of the information of the 1:25.000-scale geological map of Catalonia (which covers about 1/3 of the territory); 8) the systematic characterization of the geological units; and 9) the planning of the review of the pre-Quaternary rock units in the Pyrenean domain of Catalonia.

Beyond the goal of obtaining a new geological map of Catalonia, this revision aims to ensure that the geological map becomes an information system that allows the updating of its contents in a simple and periodic way.

Identificación de estructuras mayores usando la cartografía geológica: ejemplos de los orógenos Cadomiense, Varisco y Alpino de Iberia

Recognition of major structures using geological mapping: examples from the Cadomian, Variscan, an Alpine orogens of Iberia

R. Díez Fernández[1]

1 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Salamanca, España. r.diez@igme.es

Palabras clave: Cartografía Geológica, Geología Estructural, Tectónica, Orogenia, Iberia.

Resumen

Los mapas geológicos permiten abordar la distribución espacial de los objetos geológicos a lo largo de la superficie de un planeta. La Geología Estructural permite clasificar la estructura de un objeto geológico en base a parámetros matemáticos, quedando estos objetos definidos y ubicados en el espacio a través de la cartografía geológica. La combinación de Cartografía Geológica y Geología Estructural resulta una poderosa herramienta que permite tanto predecir la estructura y distribución de un objeto geológico en el subsuelo como la identificación de aspectos geométricos básicos de estructuras aflorantes al interferir con la superficie irregular del planeta. Al ser objetos fractales, las estructuras geológicas dibujan trazados, y a su vez patrones de afloramiento, iguales e independientes del tamaño del objeto geológico en cuestión. Por este motivo, los mapas geológicos son una herramienta a partir de la cual poder identificar, caracterizar y analizar la existencia, influencia y extensión de grandes estructuras. En esta comunicación se mostrarán y analizarán ejemplos, a varias escalas, de cartografías geológicas a partir de las cuales ha sido posible identificar grandes estructuras. Se utilizarán ejemplos ligados a las orogenias Cadomiense, Varisca, y Alpina, destacando el avance fundamental en el conocimiento que la identificación de dichas estructuras ha podido suponer en cada caso.

Abstract

Geological maps allow us to address the spatial distribution of geological objects along a planet's surface. Structural Geology allows the structure of a geological object to be classified based on mathematical parameters, these being defined and georeferenced through geological mapping. The combination of Geological mapping and Structural Geology is a powerful tool that allows predicting the structure and subsurface distribution of a geological object. It is also key to identifying basic geometric characteristics of outcropping structures through the analysis of their interference with the irregular surface of a planet. Being fractal objects, geological structures define traces and outcrop patterns that remain the same regardless of the size of the geological object in question. For this reason, geological maps are a tool from which we can identify, characterize and analyse the existence, influence and extent of large structures on our planet. In this communication, examples will be shown and analysed, at various scales, of geological maps from which it has been possible to identify large structures. Examples linked to the Cadomian, Variscan, and Alpine orogenies will be used, highlighting for each of them the fundamental advance in knowledge that the identification of said structures has represented.

La cartografía geológica: ¿una herramienta oxidada o con futuro?

Geological mapping: a rusty tool or one with a future?

P. Farias[1]

1 Dpto. Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Asturias. pfarias@uniovi.es

Palabras clave: Cartografía geológica, Mapas geológicos, Ciencias de la Tierra

Resumen

Desde el nacimiento de la Geología como ciencia moderna, la cartografía geológica ha resultado ser una herramienta esencial en el desarrollo del conocimiento geológico tanto en las ramas clásicas como en los modernos campos de la ingeniería civil, geología ambiental y de riesgos. Y esto es así por su capacidad de absorción de las nuevas tecnologías a medida que éstas van apareciendo, del mismo modo que la escala a la que se ejecutan los mapas geológicos, originalmente limitada al territorio terrestre, ha pasado a ser modernamente desde microscópica hasta planetaria. Los mapas geológicos contienen la información que, del terreno, un geólogo o, idealmente, un equipo de geólogos, es capaz de extraer, interpretar, sintetizar y transmitir en un determinado momento. Se trata por tanto de una obra artesanal, subjetiva, intemporal, eficaz e insustituible. Sin embargo, presenta un grave hándicap: requiere mucho tiempo, de modo que actualmente, dado el sistema global de valoración de la actividad científica basado en la cantidad en perjuicio de la calidad, cada vez escasean más los trabajos de investigación sustentados en un buen mapa geológico, y los datos son sustituidos por ideas o hipótesis, presentadas como ciertas en forma de esquemas y modelos sobre los que resulta estéril debatir. La cartografía geológica tiene en consecuencia en este momento un futuro incierto e irremediablemente ligado al de la Geología en su conjunto.

Abstract

Since the birth of Geology as a modern science, geological mapping has proven to be an essential tool in the development of geological knowledge, both in the classical and in the modern fields of engineering and environmental geology and risk. And this is because of its capacity to absorb new technologies as they appear, in the same way that the scale at which geological maps are executed, originally limited to terrestrial territory, has modernly become from microscopic to planetary. Geological maps contain the information that a geologist, ideally a team of geologists, can extract interpret, synthetize and transmit from the terrain at a given time. It is therefore a handmade, subjective, and timeless, effective and irreplaceable. However, it has the serious drawback that it requires a long time to complete. So that currently, given the global system of assessment of scientific activity based on quantity, research work supported by good geological maps is becoming increasingly scarce, and data are replaced by ideas or hypotheses, presented as true in the form of sketches and models about which it is sterile to debate. Geological mapping consequently has an uncertain future currently and is irremediably linked to that of Geology as a whole.

Referencias

Butler, R.W.H., Torvela, T. y Williams, L. (2024). En: *Geological mapping of our world and others* (R.W.H. Butler, T. Torvela y L. Williams, eds.). Geological Society, London, Special Publication 541, doi: 10.1144/SP541-2023-201

La importancia de revisar, aumentar la escala y actualizar cartografías geológicas y geomorfológicas para la diagnosis de inestabilidades del terreno

The importance of reviewing, downscaling, and updating geological and geomorphological maps for the diagnosis of ground instabilities

J.P. Galve[1], D. Torre[2], C. Reyes-Carmona[3], D. Alfonso-Jorde[1], D. Ballesteros[4], M. Menichetti[2], D. Piacentini[5], F. Troiani[5], J.M. Azañón[1,6].

1 Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada 18071 Granada. jpgalve@ugr.es,
2 Dpto. di Scienze Pure e Applicatte, Università di Urbino, 61029 Urbino. d.torre@campus.uniurb.it, marco.menichetti@uniurb.it
3 Dpto. delle Scienze dell'ambiente e della Terra, Università di Milano-Bicocca, 20126 Milano. cristirecar@gmail.com
4 Dpto. de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria, 39005 Santander. ballesterosd@unican.es
5 Dpto. di Scienze della Terra, Università di Roma, 00185 Roma. Daniela.piacentini@uniroma1.it, francesco.troiani@uniroma1.it
6 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR 18100 Armilla. jazanon@ugr.es

Palabras clave: Cartografía geológica-geomorfológica, Deslizamientos, Teledetección, InSAR.

Resumen

La investigación sobre inestabilidades del terreno (movimientos en masa o subsidencias) ha avanzado notablemente gracias a las técnicas de teledetección, tales como la interferometría satelite (InSAR). Sin embargo, la cantidad de datos disponibles en este momento puede llegar a ser contraproducente en la identificación de áreas peligrosas, al focalizarse los estudios solo en las zonas con movimientos detectados en la actualidad y obviando aquellos rasgos distintivos de actividad menos reciente. En La Herradura (Granada), en un área ampliamente estudiada combinando múltiples técnicas de teledetección, hemos aplicado metodologías clásicas apoyadas con la última tecnología para actualizar cartografías geológico-geomorfológicas de detalle. La nueva cartografía, que mejora en precisión y exactitud la hasta el momento disponible, puso de relevancia que los movimientos en masa activos forman parte de masas deslizadas mayores donde se desarrollan varios procesos de ladera, desde desprendimientos y flujos lentos superficiales a deslizamientos roto-traslacionales profundos. La revisión de los límites de los deslizamientos previamente cartografiados reveló un área afectada por movimientos de ladera casi cinco veces mayor de la que se había considerado. Estos hallazgos resaltan la necesidad de revisar, aumentar la escala y actualizar las cartografías geológicas y geomorfológicas existentes, dada la importancia que tiene esta investigación básica como complemento de las tecnologías más modernas.

Abstract

Research on ground instabilities (mass movements or subsidence) has advanced notably thanks to remote sensing techniques such as satellite interferometry (InSAR). However, the amount of data nowadays available can, on the other hand, be harmful for the identification of areas affected by most active instabilities, as the studies focus only on the currently detected zones in motion and ignore those features indicating less recent activity. In La Herradura (Granada), an area extensively studied combining diverse remote sensing techniques, we have applied traditional methodologies supported by the latest technology to update geological-geomorphological maps. The new mapping, which improved in precision and accuracy the one available so far, highlighted that active mass movements are part of larger landslide bodies where several slope processes are developed, from rock falls and slow-moving flows to deep-seated roto-translational landslides. Revision of previously mapped landslide boundaries and geometry revealed an area affected by slope movements almost five times larger than previously considered. These findings highlight the need to review, downscale, and update existing geologic and geomorphological maps, given the importance of this research as a basic complement to most modern technologies.

Cartografía de fracturas superpuestas en un contexto poliorogénico. Fallas variscas y alpinas en el valle del Duje (Picos de Europa, Cordillera Cantábrica, NO de España)

Mapping of superimposed faulting in a poly-orogenic context. Variscan and Alpine faults in Duje Valley (Picos de Europa, Cantabrian Mountains, NW Spain)

B. Gonzalo-Guerra[1-2], N. Heredia[1], P. Farias[2], J. García-Sansegundo[2], F. Martín-González[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), E33005, Oviedo
b.gonzalo@igme.es, n.heredia@igme.es
2 Universidad de Oviedo, Departamento de Geología, E33005 Oviedo
pfarias@uniovi.es, jgsansegundo@uniovi.es
3 Universidad Rey Juan Carlos, Área de Geología, C /Tulipán s/n, E28933 Móstoles, Madrid
fidel.martin@urjc.es

Palabras clave: Orogenia Varisca, Ciclo Alpino, Cordillera Cantábrica, Superposición de estructuras

Resumen

La elaboración de un nuevo mapa geológico del valle del Duje (Picos de Europa, Cordillera Cantábrica), ha permitido el análisis detallado de una zona intensamente fracturada del basamento varisco, afectada por estructuras frágiles relacionadas con los ciclos orogénicos varisco y alpino (Heredia *et al*., 2022). Se han diferenciado cuatro conjuntos de fallas superpuestas basándose en el tipo de rocas de falla asociadas, así como en criterios geométricos, cinemáticos, y relaciones de corte y de tectónica-sedimentación, extraídas a partir de evidencias de campo, cartográficas y de los cortes geológicos. Estos conjuntos son, de más antiguo a más moderno: Cabalgamientos Variscos, Fallas de Desgarre Tardi-Variscas, Fallas Normales Permo-mesozoicas y Fallas Inversas Cenozoicas. Muchas de estas fallas, en todo su trazado o en segmentos del mismo, constituyen reactivaciones de estructuras previas. El estudio de las interrelaciones entre los sistemas de fallas permite plantear 15 posibles tipos de reactivación, de los cuales 12 se reconocen en esta zona (Gonzalo-Guerra *et al*., 2024). Las características geométricas de las discontinuidades generadas en los diferentes eventos de fracturación, han determinado sus reactivaciones.

Abstract

A new geological map of the Duje River Valley in the Picos de Europa, Cantabrian Mountains, has been meticulously prepared. This map has facilitated the examination of a highly fractured zone within the Variscan basement, affected by brittle faults associated with the Variscan and Alpine orogenic cycles (Heredia et al., 2022). Four superimposed fault sets have been defined, based on geometrical and kinematical criteria, their fault-related rocks as well as crosscutting and tectonic-sedimentation relationships, obtained from field observations, mapping, and cross-section analysis. These fault sets are, from oldest to newest: Variscan thrusts, Late-Variscan strike-slip faults, Permian-Mesozoic normal faults, and Cenozoic reverse faults. Many of these faults represent reactivations of previous faults, occurring along their entire path or only in specific segments. The interrelations between these fault sets were thoroughly studied, resulting in the identification of 15 possible reactivation scenarios, 12 of which have been confirmed in this zone (Gonzalo-Guerra et al., 2024). The geometric characteristics of prior discontinuities generated during different faulting events, have influenced their reactivations.

Referencias

Heredia, N., Martín-González, F., Farias, P., García-Sansegundo, J., Pedreira, D., Gonzalo-Guerra, B., García-Davia, G., Mateos, G. y Flórez-Rodríguez, A. (2022). *Journal of Maps*, doi: 10.1080/17445647.2021.2010612

Gonzalo-Guerra, B., Heredia, N., Farias, P., García-Sansegundo, J. y Martín-González, F. (2024). En: *Geological mapping of our world and others* (R.W.H. Butler, T. Torvela y L. Williams, Eds.). Geological Society, London, Special Publication 541, doi: 10.1144/SP541-2022-276

La integración del IGME en el CSIC: Incertidumbres sobre el futuro del Servicio Geológico Nacional y la gestión de la Cartografía Geológica

The integration of IGME into CSIC: Uncertainties regarding the future of the Spanish Geological Survey and the management of the Geological Mapping

P. P. Hernaiz Huerta

CN IGME-CSIC. c/ Calera 1, 28760, 28760 Tres Cantos, Madrid, p.hernaiz@igme.es

Resumen: Este trabajo hace un balance de la integración del IGME en el CSIC poniendo el foco en las repercusiones que ésta ha tenido en la función del IGME como Servicio Geológico (SG) y lo que ello supone para la gestión y desarrollo de la cartografía geológica. El SG y el desarrollo de la cartografía, que son el origen de la institución, se han visto debilitados desde la integración en el CSIC. Las principales consecuencias de la integración han sido la perdida de entidad jurídica y autonomía, la dilución del IGME dentro del CSIC, una financiación dependiente de proyectos competitivos, una marcada distinción entre tareas y personal técnico y científico, y la inadecuada valoración de los trabajos de SG en las productividades. La gestión de la cartografía geológica está siendo especialmente damnificada tras la integración. Es necesario revisar y mejorar la cartografía geológica del territorio nacional y el IGME-CSIC es el organismo responsable de esta tarea. Se precisa la revisión de al menos la mitad de los mapas geológicos del Plan MAGNA realizados hace más de 40 años, antes del desarrollo de la mayoría de avances del conocimiento en Ciencias de la Tierra. La información geoespacial derivada de estas cartografías es fundamental y tiene un impacto directo en la sociedad.

Palabras clave: IGME, CSIC, integración, Servicio Geológico, Cartografía Geológica

***Abstract**: This paper assesses the integration of IGME into CSIC, emphasizing its impact on the role of IGME as a Geological Survey and its implications for the management and development of the geological mapping. The GS and the development of geological mapping, which are the origin of the institution, have been weakened since the integration into the CSIC. The main consequences of the integration have been the loss of legal entity and autonomy, the dilution of the IGME within the CSIC, funding dependent on competitive projects, a marked distinction between technical and scientific tasks and staff, and the inadequate valuation of GS work in productivity. The management of geological mapping is particularly suffering after integration. There is a need for revision and improvement of the geological mapping of the national territory, and the IGME-CSIC is the responsible for this. It is necessary to revise at least half of the geological maps in the MAGNA Plan, which were performed more than 40 years ago, before most of the advances in earth science were developed. The geospatial information derived from these maps is fundamental and has a direct impact on society.*

***Key words**:* IGME, CSIC, integration, Geological Service, Geological Mapping

INTRODUCCIÓN

Transcurridos tres años y medio desde la integración del IGME en el CSIC es posible hacer algunas reflexiones sobre la actividad científico-técnica que se está desarrollando en el organismo y sus perspectivas de futuro. La actividad científica dentro del nuevo Centro Nacional (CN) del CSIC se ha visto probablemente fortalecida con la nucleación de nuevos grupos de investigación. Sin embargo, este primer balance también revela un debilitamiento del Servicio Geológico Nacional (SGN), papel que el IGME ha venido ejerciendo desde su fundación hace 175 años y que, precisamente, estamos celebrando en esta XI edición del Congreso Geológico de España. Estas atribuciones están perfectamente recogidas y salvaguardadas en el RD 202 de 30/04/2021 que determinó la anexión del IGME (y otros OPIs) al CSIC.

El objetivo de este artículo es hacer algunas reflexiones sobre la integración del IGME en el CSIC y el futuro del Servicio Geológico Nacional, así como de su incidencia en la gestión y producción de la Cartografía Geológica. Es una visión personal tras mi tardía incorporación al IGME en diciembre de 2019, después de más de 38 años de experiencia profesional en el ámbito privado de la geología, de los cuales, un 70-80% de la actividad desarrollada ha sido como contratante, colaborador o socio del IGME.

Las principales cuestiones a discutir son: (1) ¿Es compatible la actividad como Servicio Geológico Nacional con la promoción de la actividad científica en el IGME? (2) ¿Puede el país prescindir de un Servicio Geológico Nacional ante los nuevos desafíos de la sociedad? (3) ¿Es necesario revisar y mejorar la cartografía geológica del territorio nacional?

BREVES ANTECEDENTES

InvestOPI, una Asociación Profesional formada por investigadores de los Organismos Públicos de

Investigación, nació en el 2007 para defender los intereses de los investigadores de los OPIs «sectoriales» (CIEMAT, IAC, IEO, IGME, INIA, INTA, ISCIII) y equipararlos al resto de investigadores del CSIC. La equiparación de todos los OPIs se hizo efectiva con el RD 310 de 25/05/2019 y culminó con la integración en el CSIC en 2021. El principal argumento para la integración fue la necesidad de mejorar la situación económica de estos OPIs, especialmente precaria en el caso del IEO. Las posturas escépticas y discrepantes que existían dentro del IGME no lograron coordinar una respuesta a la integración.

CONSECUENCIAS DE LA INTEGRACIÓN DEL IGME EN EL CSIC

(1) La consecuencia más relevante ha sido la pérdida de la entidad jurídica del IGME y por tanto de su autonomía y libertad de acción. Es decir, el IGME está sujeto a la Dirección del CSIC, quedando relegada su propia dirección a un equipo gestor.

(2) De lo anterior deriva la dilución del IGME y de su personal (unos 400 técnicos y científicos) dentro de una entidad con cerca de 14.000 empleados que incluye numerosos institutos y estamentos.

(3) Las fuentes de financiación han cambiado y ahora se nutre fundamentalmente de proyectos competitivos y resulta más complejo conseguir financiaciones relacionadas con convenios. Este marco de financiación incide de manera directa en la viabilidad del Servicio Geológico que, como cualquier servicio público, debería estar dotado de un presupuesto vinculado a una actividad planificada.

(4) La integración del IGME en el CSIC no era imprescindible para asegurar la excelencia en la actividad científica e investigadora del organismo. Esta dualidad, establecida desde que el IGME se convirtió en un OPI, ya funcionaba y estaba impulsada por una interacción constructiva entre las investigaciones científicas y las funciones del servicio geológico.



FIGURA 1. *Organigrama del IGME tras su integración en el CSIC*

(5) Desde su integración en el CSIC, el nuevo organigrama del IGME (Figura 1) contempla dos Vicedirecciones. La Vicedirección Científica incluye a todo el personal científico (científicos titulares, investigadores científicos y profesores de investigación) y la Vicedirección Técnica incluye al resto de personal. Bajo la Vicedirección Científica se articulan los cuatro departamentos que desarrollan la actividad investigadora del IGME. De la Vicedirección Técnica dependen tres instalaciones importantes que son los Laboratorios, el Repositorio/Litoteca y el Museo Geominero, así como los Sistemas de Información Geográfica. En dicho organigrama se puede ver que la relevancia que se le otorga al Servicio Geológico Nacional es mínima. En su estructura previa a la ley de la Ciencia de 2010, el IGME era en sí mismo el Servicio Geológico Nacional. El acrónimo IGME equivalía al SGN. La actividad principal del SGN ha quedado reducida a hacer informes preceptivos (informes que la legislación vigente obliga a que realice, revise o valide el IGME).

(6) Los trabajos relacionados con la actividad del Servicio Geológico no están apenas valorados en los Sexenios de Investigación, que suponen buena parte de la productividad de los investigadores. Esto va en detrimento de una adecuada actividad del SGN y no contribuye a fomentar la participación del personal científico en dichas tareas.

(7) La marcada distinción entre tareas y personal técnico y científico no favorece la colaboración ni la convivencia entre el personal del IGME. Como ejemplo, el personal técnico no puede participar en el Claustro Científico, órgano donde periódicamente se discute la actividad del Centro y se planifican las líneas de futuro.

UN CASO CONCRETO: LA GESTION Y DESARROLLO DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

La regulación del Plan Cartográfico Nacional establecida en la Ley 14 de 5/07/2010 sobre infraestructuras y servicios de información geográfica, define al IGME como el centro de referencia nacional en esta materia, y así se reconoce en el mencionado RD de 202/2021 de anexión del IGME al CSIC.

Conviene recordar que, después de la información topográfica y del relieve, la siguiente capa de información del territorio imprescindible para el adecuado desarrollo y gestión de un territorio/país y sus recursos es la capa de información geológica. Tiene aplicaciones en hidrogeología, obras públicas, minería, recursos energéticos, riesgos, educación y patrimonio entre otros. El SGN, tiene especial incidencia en la gestión y el desarrollo de la Cartografía Geológica y Geotemática.

La cartografía ha sido una de las actividades fundamentales del IGME a lo largo de su historia. El Plan MAGNA de cartografía geológica realizado entre los años 1970 y 2004 consiguió cubrir todo el territorio nacional a escala 1:50.000 en un tiempo relativamente corto con una rápida amortización y alta tasa de retorno para el desarrollo del país (García Cortés et al., 2005; Herrero de Egaña et al., 2020). Estos mapas son la base de la que derivan productos como los servidores de geología continua y los mapas temáticos de información geocientífica. En paralelo y después del Plan MAGNA, el IGME ha venido elaborando otras cartografías geológicas entre las que cabe citar algunas a escala 1:25.000 en convenio con las CCAA, la síntesis del mapa continuo digital a escala 1:50.000 por dominios geológicos o GEODE, y otras cartografías geológicas y geotemáticas más específicas. El conocimiento y capacidades generada con el desarrollo de estas series cartográficas son una referencia para el desarrollo de nueva cartografía geológica en otros países. Se ha participado en proyectos de cartografía geológica y geotemática internacionales, como los realizados en Argentina, la República Dominicana o en Angola, con un notable éxito científico-técnico y un importante retorno económico.

Sin embargo, la actividad cartográfica del IGME ha decaído notablemente. En la última etapa del proyecto MAGNA, desde los años 90, se observa una disminución del número de mapas elaborados por el IGME en el territorio nacional. También se ha visto incrementado el tiempo que transcurre entre el año de realización y el de publicación de cada mapa. En los últimos años, la actividad cartográfica es prácticamente testimonial, con excepciones como los mapas a escala 1:50.000 y 1:200.000 elaborados en el marco de un convenio con la Junta de Andalucía y el proyecto de cartografía a escala 1:25.000 en convenio con el Institut Cartogràfic Valencià. Las políticas científicas actuales dependen casi exclusivamente de proyectos competitivos, lo que no favorece la revisión y mejora de los mapas geológicos. En la actualidad, no existen proyectos cartográficos internos, ni una planificación a medio o largo plazo para mantener actualizada la cartografía. Por otra parte, en materia de edición, hay un buen número de mapas ya elaborados y todavía pendientes de editar y publicar sin que se hayan concretado todavía colecciones editoriales específicas.

Se podría pensar que toda la cartografía del país está ya realizada a escala 1:50.000 y no hace falta su actualización y mejora. La cartografía MAGNA tiene una calidad media aceptable, pero la calidad de cada uno de los mapas es intrínsecamente variable. Su realización se extiende a lo largo de más de 30 años y ha sido ejecutada por técnicos pertenecientes sobre todo a empresas, pero también a institutos geológicos y otros organismos públicos de investigación. La primera desigualdad proviene de la propia naturaleza ya que existen áreas de geología más compleja que otras a lo que se suma una distinta calidad de afloramiento. Más determinante todavía es el conocimiento en geología disponible en el momento de realización de la cartografía y el tiempo disponible para su realización. La mayoría de las hojas fueron realizadas antes de que se produjeran los principales avances en el conocimiento geológico. La mitad del territorio nacional ya estaba cubierto por hojas antes de 1982. Así pues, parece razonable que algunos de estos mapas sean revisados y actualizados.

La cartografía geológica es una actividad que requiere una formación específica a medio y largo plazo con abundante y variado trabajo de campo. La generación de geólogos que participaron y se formaron en la elaboración del Plan MAGNA y cartografías posteriores, no tiene relevo en las generaciones actuales. De hecho, apenas salen al mercado geólogos con formación en trabajo de campo y es posible que el país no tenga gente cualificada para hacer cartografía en el futuro.

Por otro lado, la cartografía geológica ha estado y está muy penalizada en el sistema científico-académico tanto a nivel nacional como mundial. Cualquier artículo científico publicado en una revista indexada se valora más que la ejecución de mapas geológicos. Esto tiene el efecto pernicioso de disuadir a los geólogos "científicos" de realizar esta tarea y, en consecuencia, la total devaluación de la misma.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este artículo se han analizado algunas implicaciones derivadas de la integración del IGME en el CSIC y su papel como Servicio Geológico Nacional. Un análisis similar realizado por Durán Valsero y Martínez Orío fue publicado en 2011 en el diario El País (https://elpais.com/sociedad/2011/03/02/actualidad/1299020408_850215.html). El artículo expuso diversos argumentos, y manifestaba la necesidad de que el país mantuviera un Servicio Geológico Nacional. Prácticamente todos los argumentos siguen siendo válidos en la actualidad. Si en aquel artículo ya se indicaba que la situación del IGME en su función de SGN

era crítica, ahora, sin ningún presupuesto habilitado para tal efecto, se puede afirmar que es moribunda. Ni la dirección actual del Centro ni las políticas generales del CSIC ofrecen perspectivas de cambios significativos que mejoren esta situación.

Aquel artículo estaba dirigido principalmente a la opinión pública y por ello en él se explicaba, de manera breve, algunas de las actividades fundamentales que desarrolla un SGN. El XI Congreso Geológico Nacional al que se presenta esta comunicación, es un foro científico adecuado para volver a incidir en la necesidad de recuperar las competencias del SGN. Estas atribuciones se han venido realizando, en las décadas de los 70, 80 y 90 del siglo pasado y, también, hasta épocas más recientes por el IGME. Creo que es compatible la actividad como Servicio Geológico Nacional con la promoción de la actividad científica en el IGME. Algunos organismos internacionales de referencia, como, el USGS de EEUU, el BGS de Gran Bretaña o el BRGM de Francia, compatibilizan su principal actividad como servicios geológicos con la promoción de la actividad científica. Un ejemplo mucho más cercano es el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña que, en su función de servicio geológico, desarrolla una efectiva labor de servicio público enfocada en esta Comunidad Autónoma.

El Instituto Geográfico Nacional es otro buen ejemplo de organismo público dinámico que da un servicio a la sociedad en los asuntos que le competen en armonía con su actividad científica. Algunas de estas competencias están relacionadas con las Ciencias de la Tierra como la planificación y gestión de sistemas de vigilancia de la sismicidad y el vulcanismo del país que, por afinidad temática, podrían haber correspondido gestionar al IGME. Una posible solución para preservar el Servicio Geológico de España podría haber sido su integración dentro del IGN preservando sus atribuciones al completo. Cualquier otra alternativa sería deseable, incluida que el CSIC y el Ministerio correspondiente hagan viable el funcionamiento del IGME como Servicio Geológico Nacional, tal y como lo venía haciendo, pero adaptándolo a los nuevos tiempos, y sobre todo cumpliendo con las atribuciones que se le reconocen en el RD de 202/2021 de anexión al CSIC.

Después de 175 años de labor ininterrumpida sería absolutamente imperdonable que el país prescindiera de su Servicio Geológico Nacional. La geología puede proporcionar respuestas eficaces a algunos de los retos más importantes a los que nos enfrentamos en la actualidad. Entre otras cuestiones, estamos en un escenario donde necesitamos identificar minerales críticos y otros recursos importantes, caracterizar estructuras con potencial para almacenar hidrógeno verde, una alternativa a los hidrocarburos fósiles, reconstruir la geometría de los acuíferos para gestionar mejor el agua subterránea frente a las sequías, y mitigar los riesgos geológicos.

Es necesario revisar y mejorar la cartografía geológica del territorio nacional y el IGME-CSIC es el organismo encargado de hacerlo y su dirección la responsable de velar por el cumplimiento de estas funciones. La actividad cartográfica debería tener una asignación presupuestaria específica que garantice su revisión y mejora continua. Se precisa la revisión de al menos la mitad de los mapas geológicos del Plan MAGNA realizados hace más de 40 años, antes del desarrollo de la mayoría de avances del conocimiento en Ciencias de la Tierra. Los datos geoespaciales derivados de estas cartografías son fundamentales para la sociedad con aplicaciones en hidrogeología, minería, recursos energéticos, almacenamiento de recursos energéticos, obras públicas, ordenación del territorio, riesgos y patrimonio entre otros. La actividad cartográfica debería ser considerada de manera específica en las productividades de las escalas científicas para incentivar su ejecución por parte del personal científico. Estas medidas garantizarían futuros profesionales con formación en cartografía geológica.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece las revisiones realizadas por Alejando Robador, Nemesio Heredia y Antonio Pedrera que han mejorado notablemente el manuscrito original. REViSE- Betics- PID2020-119651RBI00.

REFERENCIAS

BOE (2010): *Ley 14/2010, de 5 de julio, sobre las infraestructuras y los servicios de información geográfica en España*

BOE (2019): *Real Decreto 310/2019, de 26 de abril, por el que se regula el régimen retributivo del personal investigador funcionario de las escalas científicas de los Organismos Públicos de Investigación de la Administración General del Estado.*

BOE (2021): *Real Decreto 202/2021, de 30 de marzo, por el que se reorganizan determinados organismos públicos de investigación de la Administración General del Estado y se modifica el Real Decreto 1730/2007, de 21 de diciembre, por el que se crea la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas y se aprueba su Estatuto, y el Real Decreto 404/2020, de 25 de febrero, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Ciencia e Innovación*

Durán Valsero, J.J. y Martínez Orío, R (2011): *Hace falta un Servicio Geológico*. Diario el País (2 de marzo)

García-Cortés, A., Vivancos J. y Fernández-Gianotti J. (2005). Evaluación económica y social del Plan MAGNA. *Boletín Geológico y Minero*, 116 (4), 291-305.

Herrero de Egaña, A.; Vivancos, J.; García-Cortés, A. (2020): Análisis del impacto y actualización hasta 2018 del valor económico y social del Plan MAGNA de cartografía geológica a escala 1:50.000. *Boletín Geológico y Minero*, 131 (4): 817-829

Nuevo mapa geológico de las rocas prevariscas de Andorra, Pirineos Centrales

New geological map of pre-Variscan rocks of Andorra. Central Pyrenees

A. Margalef[1], P. Clariana[2], J.M. Casas[3], J. García-Sansegundo[4]

1 Andorra Research + Innovation, AD600; Sant Julià de Lòria, Andorra. amargalef@ari.ad
2 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), Unidad de Zaragoza, Campus de Aula Dei, 50059 Zaragoza. p.clariana@igme.es
3 Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. casas@ub.edu
4 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 33005 Oviedo. jgsansegundo@uniovi.es

Palabras clave: Mapa**,** Paleozoico, Zona Axial pirenaica**,** Andorra, Deformación Varisca y Alpina.

Resumen

En el marco del proyecto "Mapa Geológico de Andorra a escala 1:25.000" desarrollado por el CENMA–IEA (actualmente AR+I, Andorra Research+Innovation) se ha llevado a cabo la cartografía geológica de Andorra, país localizado íntegramente en la Zona Axial pirenaica. Este nuevo mapa recoge a su vez los resultados de diferentes trabajos de investigación llevados a cabo durante las dos últimas décadas que han permitido la caracterización estratigráfica y estructural de las rocas neoproterozoicas y paleozoicas en esta zona. Al igual que en el resto de la Zona Axial, estas rocas están afectadas por deformación y metamorfismo variscos e involucradas posteriormente en la orogenia alpina que dio lugar a la cordillera de los Pirineos. En este mapa no se han representado los depósitos cuaternarios con el objetivo de obtener una visión continua de las formaciones estratigráficas y una mejor representación cartográfica de las estructuras que las deforman.

La elaboración de este mapa ha permitido: (i) avanzar en la diferenciación de las formaciones de las sucesiones neoproterozoica y paleozoica, (ii) obtener nuevos datos geocronológicos y cronoestratigráficos, tanto de rocas ígneas como sedimentarias y (iii) establecer la cronología de la deformación diferenciando las estructuras variscas y alpinas.

Todos los datos obtenidos han sido integrados en un sistema de información geográfica que facilitará su representación y visualización, así como su uso en posteriores investigaciones.

Abstract

Within the frame of the project "Geological Map of Andorra 1:25,000" developed by CENMA–IEA (currently AR+I, Andorra Research+Innovation), the geological mapping of Andorra has been carried out. This country is located entirely in the Pyrenean Axial Zone. The new map incorporates the results of various research studies conducted over the past two decades, which have allowed the stratigraphic and structural characterization of the Neoproterozoic and Palaeozoic rocks in this area. As in other sectors of the Axial Zone, these rocks are affected by Variscan deformation and metamorphism and involved in the later Alpine Orogeny that gave rise to the Pyrenees. Quaternary deposits are not represented on the map in order to achieve a continuous view of both the lithostratigraphic formations and the structures deforming them.

The construction of this map has allowed us: (i) to improve the differentiation of the Neoproterozoic and Palaeozoic formations in this zone, (ii) to obtain new geochronological and chronostratigraphic data from both igneous and sedimentary rocks and (iii) to establish a chronology of the deformation by differentiating structures of Variscan and Alpine ages.

All the data obtained have been integrated into a geographic information system that will facilitate their representation and visualization, as well as its use in subsequent research.

Análisis Cartográfico-Ambiental del Paisaje en el Parque Natural Arribes del Duero (España)

Landscape Analysis of the Arribes del Duero Natural Park (Spain): Cartography of Quality and Fragility

L. Merchán[1], M. Criado[1], A. Martínez-Graña[2] y C. Nieto[2]

1 Departamento de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Universidad de Salamanca. Avenida Filiberto Villalobos, 119, 37007, Salamanca. leticiamerchan@usal.es, marcocn@usal.es
2 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced, 37008, Salamanca. amgranna@usal.es, carlosenriquenm@usal.es

Resumen: El paisaje presenta un gran interés para la planificación y la gestión sostenible del territorio, debido que los factores ambientales que lo componen son muy importantes en la calidad de vida de la población. Por este motivo, es necesario realizar un análisis correcto del paisaje, siendo difícil su ejecución, pero gracias a las tecnologías actuales, como las herramientas SIG, se facilita su realización. Esta metodología, en primer lugar, elabora un mapa de unidades de paisaje, derivadas de la unión de los diferentes componentes, siendo la geomorfología el componente primario y la litología el secundario. A continuación, una vez realizado este mapa se procede a la realización de los análisis de calidad y fragilidad paisajística. Se han diferenciado 12 unidades homogéneas en la zona de estudio, siendo cartografiadas y comprobadas en campo. En cuanto a la calidad paisajística, las zonas con valores más altos se observan en zonas del cañón del Duero y los valores más bajos en la superficie. Por otra parte, las zonas más frágiles son sectores de elevadas pendientes que impiden el desarrollo de actividades humanas, como el encajamiento del Duero. Como conclusión, este análisis constituye una herramienta útil para las administraciones públicas en la gestión sostenible de los espacios naturales y otras zonas.

Palabras clave: Unidades de Paisaje, Calidad paisajística, Fragilidad Paisajística, Técnicas SIG, Arribes del Duero

Abstract: *The landscape is a resource to be taken into account in the planning and sustainable management of the territory of natural spaces, such as the Arribes del Duero Natural Park. It is conditioned by environmental factors. They are highly influential on the quality of life of the people who live there. A historical analysis of the landscape was carried out with a qualitative and partially subjective character. In this work, we took advantage of current technologies, such as GIS techniques, to objectively and quantitatively calculate the variables. Firstly, it was necessary to draw up a map of landscape units, which is derived from the union of the abiotic (geomorphology and lithology) and biotic (vegetation) components in the background. Twelve homogeneous landscape units were identified by analysing the quality and perceptual fragility of each one and considering intrinsic and extrinsic factors. The results obtained showed that the landscape quality presents areas with very high values in the fluvial canyon of the Duero river. The lowest values were found in very degraded and vegetated polygenic areas. On the other hand, the most fragile areas were those with some vulnerable character that prevents the development of human activities, such as areas with steep slopes. The procedure and results obtained constitute a useful tool for public administrations to carry out sustainable management of natural areas.*

Key words: *Landscape units, Landscape quality, Landscape fragility, GIS, Arribes del Duero*

INTRODUCCIÓN

El paisaje representa un recurso que indica el grado de naturalidad e integridad del entorno natural, por lo tanto, su preservación es clave para la calidad de vida de la población (Turner et al., 2001). Se establece la necesidad de llevar a cabo un correcto análisis del paisaje, el cual es complejo, debido a que se tiene que tener en cuenta todos los componentes del medio físico (geología, geomorfología, vegetación, fauna, suelos y actividades humanas) y sus interacciones (García-Quintana et al., 2005).

El paisaje es una variable estratégica que debe tenerse en cuenta a la hora de planificar las actividades humanas, como premisa para llevar a cabo un correcto análisis. Para ello, en primer lugar, se debe elaborar un mapa de unidades de paisaje, derivadas de la unión de sus componentes significativos, siendo el factor geomorfológico el componente primario y el litológico el secundario (Martínez-Graña et al., 2017).

El estudio del paisaje también está ligado a los espacios naturales y a la ordenación del territorio, debido a que contribuye a la correcta localización y disposición de los elementos y usos del territorio, descubriendo el grado de acogida y el impacto del uso del medio físico. Así, el paisaje constituye un punto de encuentro entre los aspectos técnicos, científicos, sociales y políticos,

permitiendo la participación civil en las propuestas de ordenación del territorio (Martínez-Graña et al., 2013).

El objetivo de este trabajo es la realización de una cartografía de paisaje, teniendo en cuenta los componentes temáticos que lo confieren, realizando, por separado, cartografías de cada uno de ellos, mediante el uso de técnicas SIG. Además, esta cartografía constituye un punto clave en otros aspectos, permitiendo establecer propuestas de ordenación del territorio, en el Parque Natural de Arribes del Duero.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Fig. 1) en la cual se va a llevar a cabo este estudio, es el Parque Natural de Arribes del Duero. Se trata de un espacio protegido de 1.061 km^2 situado al oeste de las provincias de Salamanca y Zamora, haciendo frontera con Portugal. Cuenta con una población de unos 17.000 habitantes y está conformado por 38 municipios. En cuanto al clima, se puede hablar de dos diferentes, en las zonas de valle, se caracteriza por tener inviernos suaves y veranos muy calurosos y largos (temperaturas medias de 17,1ºC y precipitaciones de 500 mm), en cambio, en la llanura, existe un clima continental extremo, con temperaturas de 12,2ºC y precipitaciones de 750 mm (Martínez-Graña et al, 2015). Por su parte, el paisaje se caracteriza, por un lado, por una penillanura de superficie ondulada (con unas cotas uniformes de unos 700-800m) y por otro, por las acusadas pendientes que conforman los cañones (con alturas de 130m) tallados por el sistema fluvial (ríos Duero, Tormes, Uces, Huebra y Águeda). Por último, es de destacar que se trata de una de las zonas con mayor potencial hidroeléctrico de la península ibérica, con grandes presas y centrales hidroeléctricas.

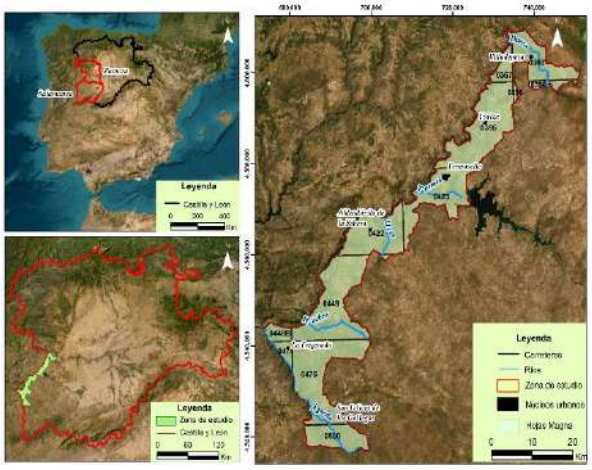


FIGURA 1. *Área de Estudio*

METODOLOGÍA

La metodología utilizada (Fig. 2) para el estudio del paisaje permite cartografiar las unidades de paisaje, integrando métodos indirectos que analizan el paisaje total, reagrupando los componentes naturales (Martínez-Graña et al., 2013) y describiendo los elementos del paisaje "estético" con métodos directos. Para ello, se divide espacialmente el territorio en unidades de paisaje mediante una agregación ordenada y coherente de los componentes elementales de cada sector, los cuales se clasifican, ponderan y reclasifican para ser cartografiados posteriormente, mediante la denominada Cartografía de Unidades de Paisaje (Martínez-Graña et al., 2015).

A continuación, una vez cartografiadas las unidades de paisaje, se procede al análisis de la calidad y fragilidad paisajística. El primero, sirve para identificar áreas donde la agregación de sus componentes muestra mayor relevancia, singularidad e importancia, requiriendo, por tanto, de una mayor preservación. Para realizar un análisis más detallado se tiene en cuenta, por un lado, la calidad paisajística intrínseca, la cual se refiere a la percepción que tienen un observador, en cualquier punto del territorio, desde donde es visible cada unidad. Esto se realiza a partir del estudio de los componentes de cada sector territorial y adyacentes, ponderándose los diferentes parámetros, para lo que se tiene en cuenta la preferencia paisajística de diversos autores, además de consultas a expertos de la zona (Yeomans, 1986). Por otro lado, la calidad paisajística extrínseca se refiere a aquellos elementos que forman el patrimonio natural y cultural y, también, a la presencia de asentamientos urbanos, agregando valor a la calidad de un paisaje.

En cuanto a la fragilidad del paisaje, se puede definir como la susceptibilidad del paisaje a cambiar frente a determinadas acciones humanas u otros impactos externos, encargándose de analizar la capacidad de respuesta del medio natural provocada por su uso. Para realizar la valoración de la fragilidad paisajística, es necesario llevar a cabo el análisis cartográfico de la fragilidad intrínseca y extrínseca, obteniendo así el mapa de fragilidad del paisaje. Para ello, se han considerado varios parámetros, como la geomorfología y la vegetación que ya han sido utilizados para valorar la calidad del paisaje, aunque no significa que puedan afectar de la misma forma a la fragilidad (Martínez-Graña et al., 2013).

Los parámetros estudiados, así como la metodología seguida se pueden observar en la Figura 2.

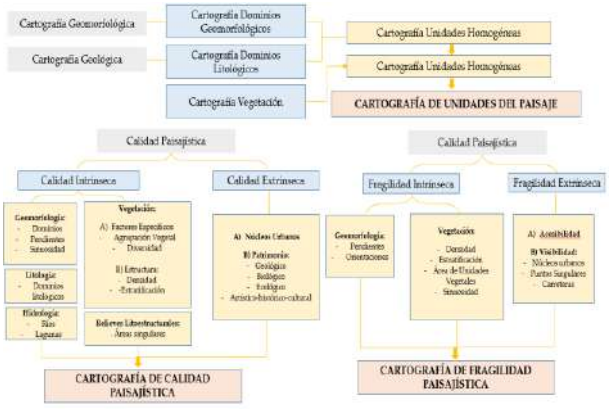


FIGURA 2. *Esquema metodológico*

RESULTADOS

En primer lugar, se ha realizado una cartografía (Fig. 3) donde se describen 12 unidades de paisaje diferentes, para lo cual se ha tenido en cuenta el inventario de los distintos componentes que forman el paisaje, los cuales se han integrado en dichas unidades.

En segundo lugar, se ha realizado una cartografía de calidad paisajística (Fig. 4) que indica las zonas de mayor calidad (muy alta y alta), las cuales se observan en el cañón fluvial del Duero y los valles encajados de sus tributarios más importantes que, a su vez, son consideradas zonas de especial protección para la fauna, especialmente, aves y, también, para la flora, con figuras de protección (atención preferente, en peligro de extinción, aprovechamiento regulado y vulnerables). Por su parte, la calidad media es la que mayor extensión ocupa, siendo las zonas de valle y berrocales las que tienen alguna figura de protección. Por último, las zonas de menor calidad paisajística (baja y muy baja) son zonas de superficies erosivas, con ninguna figura de protección.

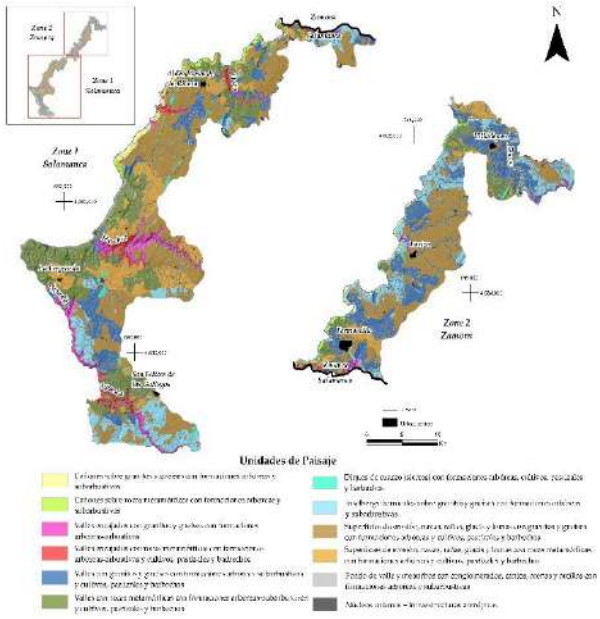


FIGURA 3. *Cartografía de Unidades de Paisaje*

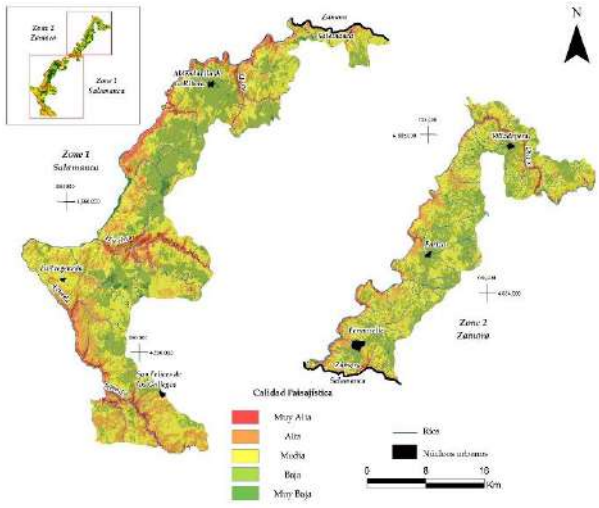


FIGURA 4. *Cartografía de Calidad Paisajística*

Por último, se obtiene la cartografía de fragilidad paisajística (Fig. 5), la cual indica que las zonas de mayor fragilidad son escasas y se encuentran concentradas en los alrededores de los municipios y en las zonas del encajonamiento del Duero. Las zonas de fragilidad media, presentan mayor extensión que las anteriores, localizándose en zonas de penillanura. Por su parte, las zonas de menor fragilidad son las más que ocupan la mayor parte de la zona de estudio, son las zonas de superficies erosivas que suelen presentar cultivos, arbolado o alguna actividad antrópica, otorgando una mayor capacidad de recepción.

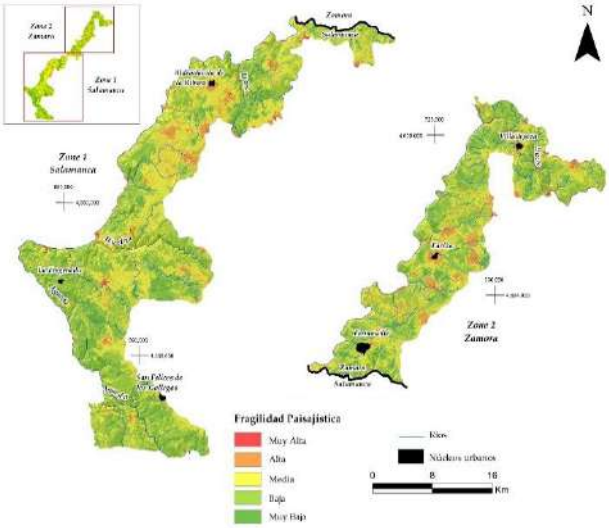


FIGURA 5. *Cartografía de Fragilidad Paisajística*

DISCUSIONES

Los estudios de paisaje se han considerado, en su mayoría, muy subjetivos porque estaban condicionados tanto por el medio existente en cada territorio como por los intereses psicosociales del propio observador, destacando los puntos de vista sociales, psicológicos y económicos de los potenciales observadores (urbanos, rurales, religiosos, etnográficos, etc.). A raíz del Convenio Europeo del Paisaje, se estableció la necesidad de realizar inventarios y determinar los diferentes paisajes que engloban las singularidades de cada territorio, por lo que se propone esta metodología objetiva, basada en la creación de cartografías georreferenciadas y cuantificables de las diferentes unidades de paisaje, a partir de los componentes naturales del territorio y sus elementos singulares a menor escala. De esta forma, se "objetiviza la subjetividad", ya que los componentes son medibles y, con la ayuda de las técnicas SIG, se puede medir y valorar su ganancia o pérdida en términos de capital natural y el potencial de posibles servicios ecosistémicos, ya que el paisaje es un recurso creciente que interviene directamente en el entorno socioeconómico de un espacio natural. En este sentido, se está avanzando en estudios detallados de métricas paisaje-territorio en entornos urbanos o en áreas muy concretas y reducidas, o en estudios que permiten, mediante procedimientos automáticos, obtener una imagen de satélite para establecer las singularidades del área estudiada.

La metodología utilizada es capaz de determinar y caracterizar unidades territoriales de paisaje (que hasta la fecha eran simplemente una reclasificación fisiográfica del territorio, en función de las diferentes alturas del terreno) que definan posibles actuaciones futuras y

minimicen la vulnerabilidad y el impacto ambiental de las actividades antrópicas o incluso sirvan como herramienta de prevención en evaluaciones estratégicas previas a proyectos de aprovechamiento del territorio.

Los estudios de paisaje realizados en las últimas décadas se han llevado a cabo desde dos perspectivas fundamentales: una objetiva, centrada en la evaluación de la calidad natural del paisaje, y otra subjetiva, dirigida a apreciar su percepción y belleza. En lo que a este trabajo se refiere, las cartografías generadas a partir de estos recursos naturales priorizan la geomorfología como elemento central en la configuración del paisaje terrestre.

La identificación de lugares de especial interés en diferentes áreas implica la determinación de las unidades de paisaje de mayor calidad y belleza natural para su conservación, conocimiento y protección. Ello se ve facilitado por la cartografía de calidad del paisaje, que simplifica la identificación de las áreas que requieren medidas de conservación, especialmente aquellas con abundantes recursos naturales de gran singularidad y mínima intervención humana. La cartografía de calidad del paisaje obtenida (Merchán et al., 2023) muestra que las áreas de mayor calidad ocupan el 26% de la superficie y corresponden a zonas accidentadas como el cañón del Duero y los valles de los afluentes más caudalosos del Duero. Las zonas de calidad media ocupan la mayor extensión, es decir, el 39% de la superficie, y son los valles y los roquedos. En cuanto a las zonas de calidad inferior, ocupan el 35% de la superficie y corresponden a sectores muy regulares y llanos, como las superficies erosivas.

El análisis de la vulnerabilidad paisajística de cada zona en función de los diferentes usos del suelo requiere un análisis de la fragilidad del paisaje. La fragilidad paisajística se define como la capacidad inversa de absorber alteraciones sin experimentar una merma en su calidad. La cartografía de fragilidad obtenida muestra que las zonas más frágiles son escasas y se localizan en el cañón del Duero, coincidiendo con las zonas de mayor calidad.

CONCLUSIONES

La caracterización de las unidades homogéneas identificadas en el terreno permite evaluar el impacto y la visibilidad de cada una de ellas en el medio natural y establecer así la calidad y la fragilidad del paisaje.

Se diferenciaron doce unidades paisajísticas. Se cartografiaron e identificaron sobre el terreno mediante observación directa y analizando los componentes y elementos de cada unidad perceptual. Esto nos permitió analizar la calidad y la fragilidad del paisaje.

En términos de calidad, las áreas de mayor calidad se encontraron en las zonas del cañón del río Duero y las de calidad media se localizan en las áreas más extensas. Coinciden con los valles y las peñas. Las zonas de menor calidad paisajística están constituidas por superficies erosivas, carentes de elementos naturales que destaquen por la monotonía de la penillanura.

En cuanto a la fragilidad, las zonas de mayor fragilidad paisajística son las de menor extensión. Están muy localizadas en áreas de núcleos urbanos y en zonas de fuertes pendientes donde se dificultan los asentamientos humanos.

Por último, las zonas menos frágiles son las más representativas de la zona y ocupan superficies erosivas con presencia de cultivos herbáceos y/o leñosos que les confieren una mayor capacidad de acogida.

REFERENCIAS

García-Quintana, A., Martín-Duque, J.F., González-Martín, J.A., García-Hidalgo, J.F., Pedraza, J., Herranz, P., Rincón, R. y Estévez, H. (2005): Geology and rural landscapes in central Spain (Guadalajara, Castilla-La Mancha). *Environmental Geology*, 47: 782-794.

Martinez-Grana, A. M., Goy, J. L. y Cimarra, C. (2015). 2D to 3D geologic mapping transformation using virtual globes and flight simulators and their applications in the analysis of geodiversity in natural areas. *Environmental Earth Sciences*, 73: 8023-8034.

Martínez-Graña, A. M., Silva, P. G., Goy, J. L., Elez, J., Valdés, V., y Zazo, C. (2017): Geomorphology applied to landscape analysis for planning and management of natural spaces. Case study: Las Batuecas-Sierra de Francia and Quilamas natural parks, (Salamanca, Spain*). Science of the Total Environment*, 584: 175-188.

Martínez-Graña. M., Goy, J.L. y Zazo, C. (2013): Cartographic-environmental analysis of the landscape in natural protected parks for his management using GIS. Application to the natural parks of the "Las Batuecas-Sierra de Francia" and "Quilamas" (Central System, Spain). *Journal of Geographic Information Syst*em, 5: 54–68.

Merchán, L., Martínez-Graña, A. M., Nieto, C. E., y Criado, M. (2023). Landscape Analysis of the Arribes del Duero Natural Park (Spain): Cartography of Quality and Fragility. *Applied Sciences*, 13 (20): 11556.

Turner, M.G., Gardner, R.H., O'Neill, R.V. y O'Neill, R.V (2001): Landscape Ecology in Theory and Practice. Springer, New York, NY, USA, Volume 401, 406 p.

Yeomans, W.C. (1986): Visual Impact Assessment: Changes in Natural and Rural Environment. En: *Foundations for Visual Project Analysis*, Wiley&Sons, New Cork.

AGRADECIMIENTOS

GIR: GEAPAGE, al Proyecto VB8C "Propuesta Geoparque Diputación de Salamanca (Área de Turismo) y Proyecto LZ8C de Dinamización del Medio Rural.

Cartografía sistemática de unidades estratigráficas en las cuencas cenozoicas continentales españolas. Propuesta de nomenclatura para los nuevos mapas geológicos escala 1:200.000 de Madrid (45) y Segovia (38)

Systematic cartography of stratigraphic units in continental Cenozoic basins of Spain. Nomenclature proposal for the new 1:200.000 scale geological maps of Madrid (45) and Segovia (38)

M. Montes[1], J. Luengo[1], y F. López Olmedo[1]

1 CN IGME-CSIC. C/ Calera 1. 05270-Tres Cantos (Madrid). m.montes@igme.es, j.luengo@igme.es

Resumen: La elaboración de la Cartografía geológica digital continua a escala 1:50.000 de las grandes Cuencas Cenozoicas Continentales Españolas (CCCE) ejecutada en el marco del proyecto GEODE (IGME), conllevó la realización de un conjunto de leyendas individuales para cada una de estas. Dichas leyendas se han realizado mediante un seguimiento estratigráfico y cartográfico de los límites entre las diversas unidades discriminadas en cada una de las cuencas y de un análisis minucioso de la bio-, crono- y magnetoestratigrafía de cada una de ellas. La comparación entre las distintas leyendas ha puesto de manifiesto la existencia de etapas de relleno, algunas anteriormente conocidas, con un alto grado de sincronía entre ellas. Con objeto de cumplir los estándares del CN IGME-CSIC, como Servicio Geológico, se ha dividido las diferentes etapas de relleno presentes en las leyendas, en Unidades Aloestratigráficas (NASC, 2005) ya que estas son las más adecuadas y objetivas para la cartografía sistemática de las CCCE, pues en su definición se minimizan las interpretaciones genéticas o causales de las discontinuidades que las delimitan. Con objeto de facilitar la clasificación de las distintas unidades de cada una de las cuencas, así como la comparación entre cuencas, se propone una nomenclatura alfanumérica sistemática que permite a su vez ser empleada a diferentes escalas de trabajo.

Palabras clave: Cartografía, Cuencas continentales, Aloestratigrafía, Nomenclatura estratigráfica.

Abstract: *The development of the continuous digital geological cartography) at a scale of 1:50,000 of the large Spanish Continental Cenozoic Basins (SCCB), carried out in the framework of the GEODE project (IGME), involved the creation of a set of individual legends for each of these basins. These legends have been made through a stratigraphic and cartographic follow up of the boundaries between the various units discriminated in each of the basins and a thorough analysis of the bio-, chrono- and magnetostratigraphy of each of them. The comparison between the different legends has revealed the existence of infill stages, some previously known, with a high degree of synchrony between them. In order to meet the standards of the CN IGME-CSIC, as a Geological Service, the different infill stages present in the legends have been divided into Allostratigraphic Units (NASC, 2005) since these are the most appropriate and objective for the systematic cartography of the SCCB, as their minimizes the genetic or causal interpretations of the discontinuities that delimit them. In order to facilitate the classification of the different units of each of the basins, as well as the comparison between basins as well as allows to be used at different work scales, a systematic alphanumeric nomenclature is proposed.*

Key words: *Cartography, Continental basins, Allostratigraphy, Stratigraphic nomenclature.*

UNIDADES ALOESTRATIGRÁFICAS EN LAS CCCE

El Plan GEODE de Cartografía Digital Continua a escala 1:50.000, elaborado por el IGME entre los años 2004 y 2013, consistió, a grandes rasgos en la elaboración de un mapa geológico integrado y continuo a partir de la agrupación de las hojas MAGNA. En dicho plan, se dividió el territorio español en 19 grandes regiones geológicas, en las que se realizaron leyendas comunes específicas para cada una de dichas zonas. En el caso de las grandes Cuencas Cenozoicas Continentales Españolas (CCCE) y en concreto las de mayores dimensiones, como Tajo (Zona 2400), Duero (Zona 2300) o Ebro (Zona 2700), fueron consideradas como zonas individuales y se abordaron a partir de la elaboración de una leyenda común específica para cada una de ellas.

La realización en ellas de la cartografía continua con una leyenda común propició la identificación, datación y seguimiento cartográfico de los límites entre diversas unidades a lo largo de dichas cuencas. Este reconocimiento pone de manifiesto la existencia de una serie de etapas de relleno en las grandes CCCE, con un alto grado de sincronía entre ellas y constatadas

parcialmente en anteriores trabajos de síntesis (Calvo et al., 1993; Civis et al., 2004, entre otros). Estas etapas de relleno están representadas por unidades limitadas a muro y techo por discontinuidades sedimentarias que se caracterizan por encontrarse a lo largo de toda la cuenca (ya sea por medio de una discordancia o de su concordancia correlativa). Desde un marco teórico, este tipo de unidades cuentan con abundante bibliografía, y han sido nombradas como "unidades relacionadas por discontinuidades" (*unconformity-related units*). Estas unidades, básicamente pueden agruparse en tres tipos:

a. Unidades Aloestratigráficas (*Allostratigraphic Units*): Definidas formalmente en el Código Estratigráfico Norteamericano (*North American Stratigraphic Code*; NASC, 2005) y moderadamente utilizadas.
b. Unidades Limitadas por Disconformidades (*Unconformity Bounded Units*, *UBU*): Definidas formalmente en la Guía Estratigráfica Internacional (GEI) de la *International Commision of Stratigraphy-ICS*, (Salvador, 1994), de uso poco común.
c. Secuencias Estratigráficas: Unidades de tipo informal, pero muy comúnmente utilizadas. A este grupo pertenecen, las Secuencias Deposicionales; Secuencias Transgresivas-Regresivas (T-R); Secuencias Genético Estratigráficas; Unidades Tectosedimentarias (UTS), entre otras.

Desde el punto de vista de la labor del CN IGME-CSIC como Servicio Geológico generador de una cartografía sistemática y de calidad del territorio nacional, parece oportuno utilizar un tipo de unidades estratigráficas lo más objetivas posibles, establecidas e identificadas sin tener en cuenta la interpretación genética o causal de las discontinuidades que las limitan. Los criterios diagnósticos usados para establecer e identificar éstas unidades deben ser únicamente los encaminados a discernir y cartografiar las discontinuidades que limitan su muro y su techo. Las propiedades litológicas de las rocas incluidas, su contenido fósil, o su intervalo cronoestratigráfico en uno u otro extremo de las discontinuidades sólo deberían ser significativas para reconocer y correlacionar éstas discontinuidades limitantes.

Teniendo en cuenta este criterio, el tercer tipo de unidades, las Secuencias Estratigráficas, quedarían descartadas, pues en su definición interviene decisivamente el carácter genético de sus límites (cambios del nivel del mar, variaciones en el diastrofismo tectónico de los bordes, o una conjunción de eustatismo, tectónica u otros procesos genéticos). Así pues, las Unidades Limitadas por Discontinuidades (UBU) y las Unidades Aloestratigráficas, parecerían las más adecuadas.

En la guía de la ICS, las UBU incluyen en su definición las características de los límites de las unidades que las hacen específicas: "*cuerpo de roca acotado por encima y por debajo de discontinuidades significativas designadas específicamente en la sucesión estratigráfica preferiblemente de extensión regional o interregional. Los criterios diagnósticos utilizados para establecer e identificar una UBU, son sus dos disconformidades delimitadoras designadas. Las UBU pueden incluir cualquier número de otras clases de unidades estratigráficas*". La guía define disconformidad (*unconformitiy*) como: "*superficie de erosión entre cuerpos de roca que representa un hiato significativo o brecha en la sucesión estratigráfica, pudiendo ser estas: discordancias angulares, paraconformidades, o diastemas*".

Siendo estrictos con la definición de la guía, solo pueden considerarse límites de UBU aquellos que incorporen una superficie de erosión significativa, con un cierto hiato o parón en la sedimentación, y en los que se infiere un cambio apreciable y significativo de litología entre las superficies limitantes.

La definición de Unidad Aloestratigráfica del código de la NASC (2005) es más amplia: "*Artículo 58. Naturaleza de las unidades aloestratigráficas. Una unidad aloestratigráfica es un cuerpo cartografiable de roca que se define e identifica sobre la base de sus discontinuidades delimitantes*". Se remarca que las unidades aloestratigráficas se distinguen por sus discontinuidades. La litología de una Unidad Aloestratigráfica no juega ningún papel en su definición. Las características internas (físicas, químicas y paleontológicas) pueden variar lateralmente y verticalmente en toda la unidad, y por lo tanto dentro de ellas pueden existir todo tipo de otras unidades (lito-; crono-; bio-; magneto-; etc.). Los límites de las unidades aloestratigráficas deben de ser discontinuidades lateralmente trazables y cartografiable a la escala practicada en la región o cuenca donde se define la unidad. Asimismo, la NASC (2005) deja claro que la interpretación genética, su historia geológica o los intervalos de tiempo inferido, no son apropiados para definir una unidad aloestratigráfica. Sin embargo, una interpretación genética, una historia geológica, o unas relaciones de edad bien documentadas, pueden influir en la elección de los límites de la unidad. Una unidad aloestratigráfica se extiende desde su área tipo trazando las discontinuidades de los límites o trazando o haciendo coincidir (mediante correlación) los depósitos entre las discontinuidades.

Así pues, y a la luz de esta definición, básicamente los dos únicos requisitos para su establecimiento son: 1) el criterio de la identificación de las discontinuidades a muro y a techo del cuerpo de roca; y 2) su trazabilidad cartográfica a escala regional o de cuenca. Así pues, de lo anteriormente argumentado el término de Unidad Aloestratigráfica es el que más asépticamente se adecúa a las unidades establecidas en las cartografías del Plan GEODE (escala 1:50.000) de las CCCE.

La propia NASC (2005) en su artículo posterior define la jerarquía de las Unidades Aloestratigráficas: "*Artículo 59. Jerarquía. La jerarquía de las unidades aloestratigráficas, en orden decreciente, serían:*

1. *Aloformación: unidad fundamental en la clasificación aloestratigráfica. Puede ser completa o*

sólo parcialmente dividida en miembros, si sirve algún propósito útil, o puede no tener alomiembros.

2. *Alomiembro: Es la unidad siguiente en rango debajo de una aloformación.*
3. *Alogrupo: Se establece sólo si es esencial para la aclaración de la historia geológica. Puede consistir enteramente en aloformaciones nombradas o, alternativamente, puede contener una o más aloformaciones nombradas que conjuntamente no comprenden el alogrupo completo".* Esta definición puede ser válida también para un grupo de aloformaciones contemporáneas presentes en varias cuencas distintas.

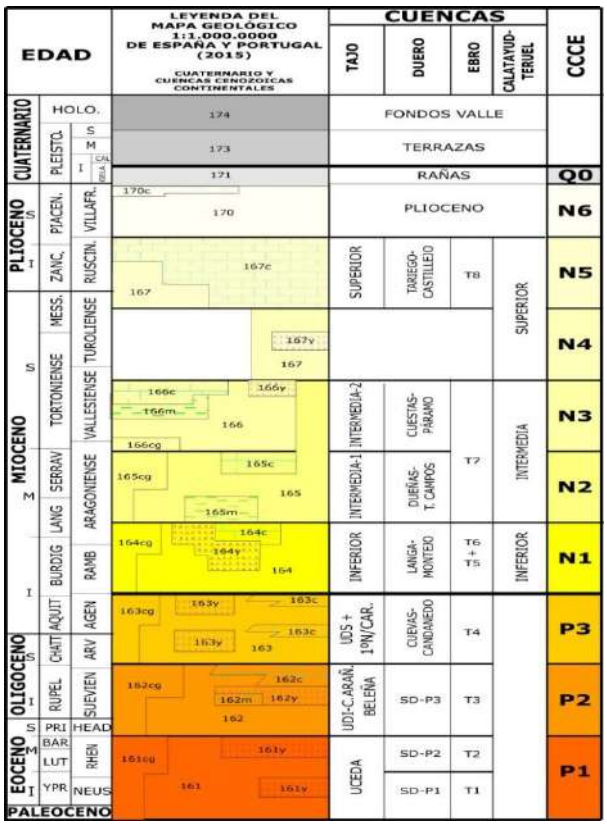


FIGURA 1. Leyenda sintetizada del Mapa Geológico de España y Portugal a Escala 1:1M, con la correlación de las principales unidades estratigráficas en las CCCE. UDI: Un. Detrítica Inferior; UDS: Un. Detrítica Superior; 1ºN: 1º Un. Neógena; CAR: Un. Carpio. SD: Secuencia Deposicional; T1-8: UTS's de la Cuenca del Ebro.

PROPUESTA DE NOTACIÓN PARA LAS CCCE

La realización dentro de las CCCE tanto de una cartografía continua como de una leyenda común, han propiciado la identificación, datación y seguimiento cartográfico de los límites entre diversas unidades, a lo largo de dichas cuencas. La leyenda continua en cada una de ellas refleja el establecimiento de unidades a escala de cuenca, que en su concepto fundamental coinciden con las unidades Aloestratigráficas. Dichas unidades se han jerarquizado en aloformaciones, alomiembros y alogrupos siguiendo los criterios establecidos por la NASC y ello propicia que puedan ser codificadas siguiendo un criterio homogéneo para facilitar su correlación, dentro de una misma cuenca o entre cuencas distintas. De esta forma todos los alogrupos de las distintas CCCE se les ha asignado un código alfanumérico compuesto de cuatro términos:

X(X) Y α Z

Siendo

X(X): Inicial(es) de la cuenca: T: Tajo; D: Duero; E: Ebro; G: Guadiana; DT: Daroca-Teruel; etc.).

Y: Sistema o periodo cronoestratigráfico: Q: Cuaternario; N: Neógeno; P: Paleógeno.

α: Número de orden estratigráfico de aloformaciones: 1, 2,… (1: inferior).

Z: Orden estratigráfico de alomiembros: A, B,… (A: inferior).

Ejemplo: **TN2A**: Alomiembro inferior (A), de la segunda aloformación (2), del Neógeno (N), de la Cuenca del Tajo (T). El término **Yα**, correspondería a la notación de Alogrupo entendido como aloformaciones coetáneas comunes a varias CCCE.

Asimismo, también se asigna un código al límite basal de cada unidad aloestratigráfica que coincide con el de la unidad a la que limita. Este tipo de etiqueta de discontinuidad se ha revelado como una herramienta muy útil para identificar los límites de dichas unidades dentro de los mapas y en consecuencia facilitar la ubicación geológica tanto en el mapa como en la leyenda. Ejemplo: Línea etiquetada **TN1**: Límite basal de la unidad N1 de la Cuenca del Tajo (T). Esta metodología de clasificación y notación general permite ser empleada de forma transversal entre cuencas y también a diferentes escalas. A modo de validación ha sido empleada tanto a escala regional 1:200.000 en los nuevos mapas geológicos de Madrid (45) y Segovia (38) o a escala 1:1.000.000 para la elaboración del apartado de la leyenda del Cuaternario y Cuencas Cenozoicas Continentales del mapa de España y Portugal. En éste último, la notación de dichos alogrupos se ha realizado siguiendo el anterior criterio, pero de forma simplificada para todas las CCCE, indicando mediante un código alfanumérico la edad y su disposición estratigráfica (Fig. 1).

UNIDADES ALOESTRATIGRÁFICAS DE LAS CUENCA DEL TAJO Y DUERO

Los materiales del cenozoico pertenecientes a las cuencas del Tajo y Duero, presentes en las hojas del Mapa Geológico de España escala 1:200.000, de Madrid (45) y Segovia (38) se han cartografiado dentro de las Zona Tajo-Mancha (2400) (Montes et al., 2013) y Zona Duero-Almazán (2300) (Pineda et al., 2013), del Plan GEODE a escala 1:50.000. Tal y como ocurre con las demás cuencas, su leyenda continua refleja el establecimiento de unidades a escala de cuenca asimiladas a Unidades Aloestratigráficas (Figs. 2 y 3).

En la Cuenca del Tajo, se han definido tres unidades para el Paleógeno (TP1-3); seis unidades para el Neógeno (TN1-6) y una unidad para el Cuaternario (TQ0, Rañas). Una de las unidades del Neógeno (TN4), no está presente en la Cuenca del Tajo propiamente dicha (cuencas de Madrid y Loranca o Depresión

Intermedia), pero sí en la cuenca del Júcar-Cabriel, que se englobó dentro de la Zona Tajo-Mancha del Plan GEODE (Fig. 2). En la Cuenca del Duero, se han definido tres unidades para el Paleógeno (DP1-3); cinco unidades para el Neógeno (DN1-5) y una unidad para el Cuaternario (TQ0, Rañas). En esta cuenca, la DN6 no se ha registrado de forma clara hasta el momento y, de igual forma que en la del Tajo, la aloformación equivalente a la DN4 tampoco está presente (Fig. 3).

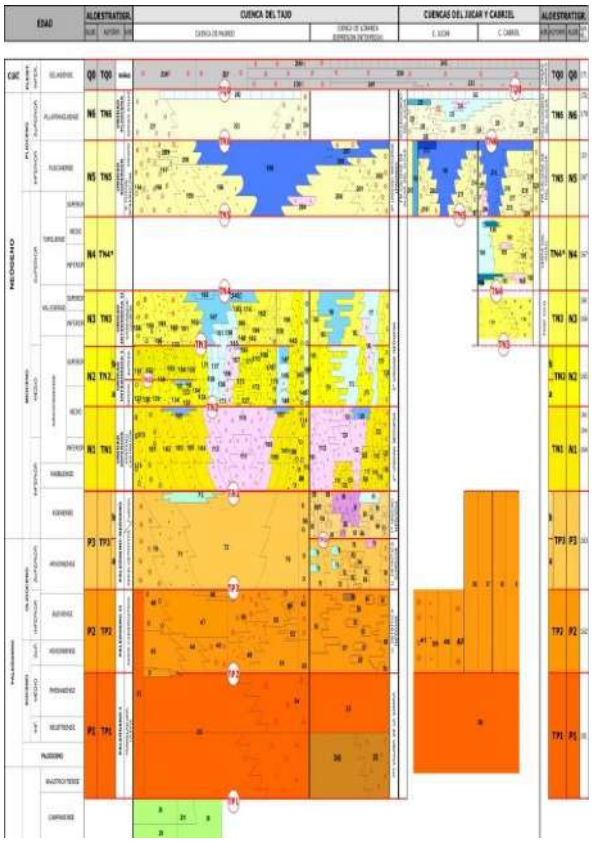


FIGURA 2. Leyenda única modificada de la Zona Tajo-Mancha (2400) del Plan GEODE, mostrando las unidades aloestratigráficas definidas para el Cenozoico junto con su respectiva nomenclatura clásica para las cuencas de Madrid, Loranca, y Júcar-Cabriel. Modificado de Montes et al. (2023).

En cuanto a la datación de los límites entre las unidades de ambas cuencas se han realizado mediante bioestratigrafía basada en la abundante presencia de yacimientos de vertebrados, especialmente en la cuenca del Tajo (Hernández-Ballarín y Peláez-Campomanes, 2017, entre otros) y magnetoestratigrafía (Montes et al., 2006; entre otros).

En ambas cuencas existen en la bibliografía nombres que comúnmente se han asignado a las unidades asimiladas ahora como aloformaciones. Dichos nombres se respetan dado que su uso es generalizado y conocido, siendo el nombre principal que aparece en el epígrafe de las descripciones, si bien se les asigna su código correspondiente de aloformación (cuando se reconocen en toda la cuenca), o de alomiembro, (cuando solo se sigue en una parte de ella), incluyéndose en los epígrafes de dichas unidades en las memorias.

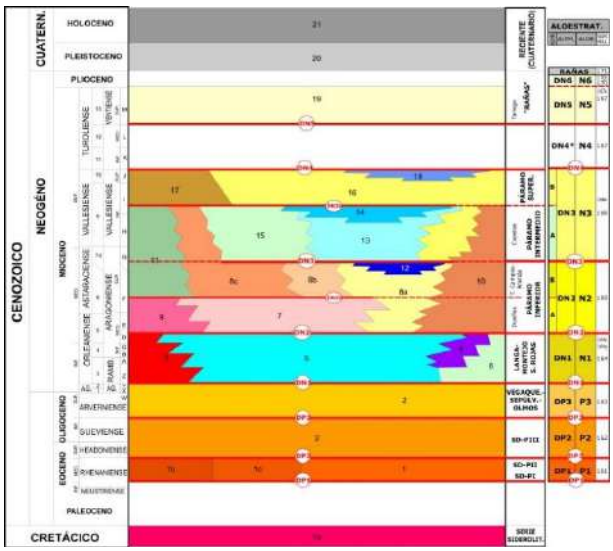


FIGURA 3. Leyenda única modificada y simplificada de la Zona Duero-Almazán (2300) del Plan GEODE construida para la realización del Mapa de la Cuenca del Duero 1:400.000 (Pineda et al., 2006), mostrando las unidades aloestratigráficas definidas para el Cenozoico.

REFERENCIAS

Calvo, J.P., Daams, R., Morales, J., López-Martínez, N., et al. (1993): Up-to-date Spanish continental Neogene sintesis and paleoclimatic interpretation. *Rev. Soc. Geol. España*, 6: 29-40.

Civis, J. (coord.) (2004): Cuencas cenozoicas. En: *Geología de España* (J.A. Vera, ed.), 531-586.

Hernández Ballarín, V. y Peláez-Campomanes, P. (2017): Updated biochronology of the Madrid Basin: species distribution and implications for the Middle Miocene rodent faunas of Spain. *Historical Biology*, 30: 305-316.

Montes M., Beamud B., Garcés M. y Calvo, J.P. (2006): Magnetoestratigrafía de las unidades Inferior e Intermedia de la cuenca de Madrid. *Rev. Soc. Geol. España*, 19 (3-4): 281-298.

Montes M., Salazar, A., Ramírez, J.I., Nozal, F. y López Olmedo, F. (2013): *Mapa Geológico Digital Continuo a Escala 1: 50.000 de la Zona Tajo-Mancha. (PLAN GEODE). Web: (Z-2400)* IGME. www.igme.es

Pineda, A.; Huerta, P.; Nozal, F.; Montes M. y López Olmedo, F. (2023): *Mapa Geológico Digital Continuo a Escala 1: 50.000 de la* Zona Duero-Almazán (*PLAN GEODE). Web: (Z-2300)* IGME. www.igme.es

Pineda A., Nozal F., Montes M., López Olmedo F. y Martín-Serrano A. (2006): Mapa Geológico de síntesis de la Cuenca del Duero. VI Congreso del Grupo Español del Terciario. *Geo-Temas*, 9: 193-196.

NASC (North American Stratigraphic Code) (2005): North American Commission on Stratigraphic Nomenclature. *AAPG Bulletin*, 89 (11): 1547–1591.

Salvador A. (1994): *International Stratigraphic Guide: A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology and Procedure*. 2ª Ed. Geological Society of America. Boulder, CO, 214 p.

Materiales geológicos y retención de humedad en suelos, influencia de la cubierta vegetal. Valoración utilizando drones y geotécnicas

Geological materials and soil moisture retention, influence of the vegetation cover. Assessment using drones and geotechniques

C. Orts[1], J. Llinares[2], A. Marqués[3], L. García-España[4] y MD. Soriano[1]

1 Departamento de Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, Universitat Politécnica de Valencia. Cami de Vera s/n, Valencia. 46023. orts.mca@gmail.com, asoriano@prv.upv.es

2

3 Departamento de Química. Escuela Técnica Superior de Gandía, Universitat Politécnica de Valencia. Paraninfo s/n, Gandía. Valencia. jollipa@qim.upv.es

4 Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametria. Universitat Politècnica de València. Cami de Vera s/n, Valencia. 46023. amarques@cgf.upv.es

5 IES Bernat de Sarria. Departamento de Biología. C/ Fragata 5. Benidorm. 03503 Alicante. laugars2@alumni.upv.es.

Resumen: Se estudian parámetros y propiedades como son los materiales geológicos y los contenidos y la retención de humedad en suelos tras distintas modificaciones en cubiertas vegetales, considerando además otras modificaciones como las fertilizaciones, y observando la influencia de dicha cubierta vegetal utilizando para ello drones y distintas geotécnicas.

Todos estos métodos se manifestaron útiles indicadores tanto para destacar ciertas propiedades de los materiales geológicos, como aquellos referentes al contenido de humedad del suelo, o cambios en su fertilidad, y en el establecimiento de cubiertas vegetales permanentes en cultivos.

La utilización de estas técnicas y su interpretación como es el caso de los valores del NDVI son útiles a los agricultores para mejorar el rendimiento de los cultivos, evitando la utilización de gran cantidad de fertilizantes al mismo tiempo que evitan el deterioro del medio ambiente.

Palabras clave: Geomorfología, Geotécnicas, Humedad de suelos.

Abstract: *Parameters and properties such as geological materials and the contents and retention of moisture in soils are studied after different modifications in plant covers: We have also considered other modifications such as fertilization, and observed the influence of plant cover using drones and different geotechniques.*

All of these methods proved to be useful indicators both to highlight certain properties of geological materials, such as those referring to the moisture content of the soil, or changes in its fertility, and in the establishment of permanent plant covers in crops.

The use of these techniques and their interpretation, such as the NDVI values, are useful to farmers to improve crop yields, avoiding the use of large amounts of fertilizers while avoiding environmental deterioration.

Key words: *Geomorphology, Geotechniques, Soil moisture*

INTRODUCCIÓN

Los drones y las geotécnicas se utilizan en el desarrollo de diversas disciplinas con diferentes objetivos o intereses. En este trabajo se describe el uso de estas técnicas con el objetivo de evaluar y mejorar las propiedades edáficas.

Los drones (también referidos como UAV: Unmanned Aerial Vehicle) presentan múltiples usos en las disciplinas de las ciencias de la Tierra, tanto si se emplean para cubrir grandes extensiones y permiten la toma de ortofotografías o se usan en cartografías de grandes superficies como si Son utilizados en trabajos de detalle o trabajos verticales utilizando sensores (Fernández-Lozano, y Gutiérrez-Alonso, 2016).

Los drones pueden equiparse con diferentes sensores en función del objetivo del trabajo a realizar. De este modo pueden capturar imágenes con cámaras fotograméticas, RGB, cámaras térmicas o multiespectrales. Los sensores LiDAR permiten la obtención de modelos digitales del terreno y de contornos de alta resolución. Las aplicaciones con drones pueden ser utilizadas en estudios tectónicos, en cartografía, en la generación de ortofotografías aéreas y modelos digitales del terreno de alta resolución que permiten realizar cartografías geológicas de detalle diferenciando los distintos tipos de rocas y reconociendo e interpretando las fallas y otras estructuras geológicas.

En las aplicaciones de cartografía, mediante diferentes técnicas, es posible la eliminación de la componente de la cobertera vegetal por lo que su uso es muy extendido en zonas forestales.

Asimismo, mediante la comparativa de modelos digitales del terreno o cartografías de alta resolución en distintos periodos de tiempo es posible determinar los cambios geomorfológicos producidos en el paisaje, deslizamientos o movimientos del terreno para prevenir futuros desastres naturales.

El uso de drones permite la toma de datos con mayor rapidez por técnicas de alta resolución como fotogravimetría o LiDAR pudiendo ser utilizados en el estudio de la humedad y otras propiedades del suelo, valorando diferencias entre suelos desnudos o suelos con cubiertas vegetales, así como detectando variaciones entre diferentes cubiertas vegetales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Durante dos años consecutivos, se realizó el seguimiento y análisis de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos, empleando diferentes metodologías de trabajo como técnicas de laboratorio, sensores de campo y analizando las imágenes satelitales del Sentinel-2 y del vuelo de dron provisto con cámara multiespectral.

Los trabajos fotogramétricos realizados en este estudio constan de una fase en campo seguido del análisis y tratamiento de datos (Singh et al., 2022). En la fase de campo se instalaron cuatro objetivos (Figura 1) en cada parcela o zona de estudio para definir los puntos de control terrestre (GCP). Después se estudiaron los GCP utilizando un receptor GNSS en modo cinemático en tiempo real (RTK), garantizando de esta forma una precisión centimétrica (Fendrich, 2023).



FIGURA 1. *Detalle de las cubiertas vegetales y vuelo de dron*

Posteriormente, se procesaron múltiples imágenes aéreas capturadas por el dron utilizando el software Structure from Motion (SfM), que permite crear modelos digitales de elevación y ortoimágenes de las áreas de estudio.

Las coordenadas de los puntos de muestreo se recopilaron junto con las coordenadas de los GCP utilizando el mismo receptor. Para el procesamiento estadístico se prepararon los datos de los resultados de los análisis, ortoimágenes e instrumentos de campo procesando los datos resultantes para su utilización

La figura 2 muestra los sensores de humedad instalados en el suelo de tipo resistivos, que miden la humedad por la conductividad de la tierra o sales higroscópicas, y posterior análisis y recogida de datos.



FIGURA 2. *Sensores de humedad. Instalación y almacenamiento de datos*

Se utilizaron imágenes de Sentinel-2 obtenidas del Sentinel hub que cubren las áreas de este estudio, que permiten realizar el seguimiento de la humedad del suelo en periodos diferentes mediante imágenes con NDVI en distintos periodos.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mide el verdor y la densidad de la vegetación captada en una imagen de satélite. La vegetación sana tiene una curva de reflectancia espectral muy característica de la que podemos sacar partido calculando la diferencia entre dos bandas: la del rojo visible y la del infrarrojo cercano. El NDVI es esa diferencia expresada numéricamente entre -1 y 1.

RESULTADOS

Se compararon los resultados obtenidos a partir de las imágenes NDVI con la información extraída a partir de, los vuelos de dron, y con los datos obtenidos en este estudio se ha podido relacionar los resultados de humedad del suelo con los diferentes materiales geológicos existentes en las diferentes áreas estudiadas y verificarlo con los sensores de humedad instalados en el suelo (Fig. 3).

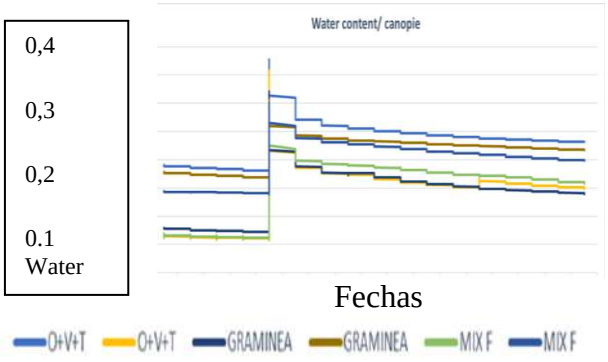


FIGURA 3.: *Contenido de agua en el suelo según el tipo de cubierta vegetal, antes y después del riego de primavera.*

La figura 3 muestra el primer riego después del invierno, y las precipitaciones durante el mes de abril-mayo. En este caso se observa como uno de los suelos con una cubierta vegetal determinada del tipo (O+V+T) aumentó la retención del agua procedente de la lluvia o riego, lo que se manifestó sobre el aumento y desarrollo de la cobertura plantada en la parcela.

En la figura 4 se muestran los índices de vegetación de dos imágenes de uno de los huertos, medidos antes y después de la siembra (Domínguez-Gento, 2010).



FIGURA 4. *Imágenes obtenidas con el dron en zonas con diferentes coberturas*

El NDVI de un cultivo o una planta calculado regularmente durante distintos períodos de tiempo puede revelar mucho sobre los cambios en sus condiciones, pudiendo utilizar el NDVI para estimar la cantidad de cobertura vegetal y en consecuencia la salud de las plantas a distancia.

El Índice NDVI se calcula a partir de imágenes de satélite de acuerdo con una fórmula, de manera que la densidad de la vegetación (NDVI) en un punto determinado de la imagen es igual a la diferencia de las intensidades de luz reflejada en el rango rojo e infrarrojo dividida por la suma de estas intensidades.

Este índice está definido por un Rango de valores que van de -1.0 a 1.0, donde los valores más negativos corresponden principalmente a cobertura de nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero representan principalmente rocas y suelo descubierto.

Los valores muy pequeños (0,1 o menos) de la función NDVI corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve.
Los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores grandes (de 0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales. Esta escala sirve para mostrar a los agricultores qué partes de sus campos tienen una vegetación densa, moderada o escasa en un momento dado. Igualmente, un descenso repentino de los valores del NDVI puede ser un síntoma de deterioro de la salud del cultivo.

La disminución de estos valores también puede corresponder a cambios normales, como el momento de la cosecha, por lo que el NDVI debe contrastarse con otros datos disponibles.

Las diferentes imágenes con NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) en dos periodos, se muestran en la figura 5, con dos formas de seguimiento, con Sentinel hub y con una plataforma de internet AURAVANT. Las imágenes indican que el NDVI aumenta entre los dos periodos estudiados.

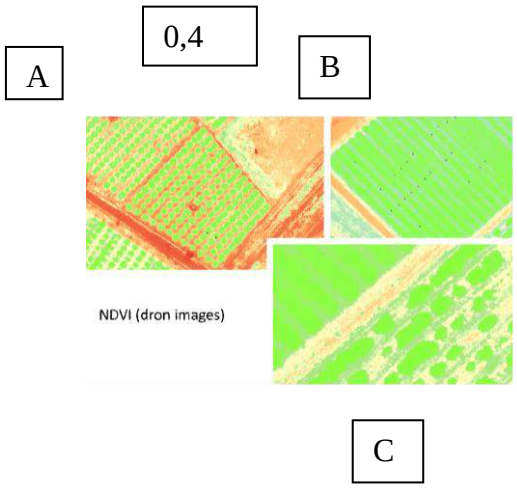


FIGURA 5. *A: suelo desnudo, B suelo con cubierta vegetal sembrada, C: suelo con cubierta vegetal espontánea. Colores rojos indican arbolado y separación de parcelas, color verde indica cubiertas vegetales en parcelas*

La figura 5 muestra los resultados en parcelas de estudio desarrolladas sobre limos pardos pertenecientes a sedimentos del Cuaternario. Los resultados NDVI, se muestran en dos imágenes de Sentinel-2 obtenidas desde Sentinel hub, para nuestras áreas de estudio, que nos permite. un seguimiento de la humedad del suelo en periodos diferentes y en parcelas con distintos tratamientos.

Se han obtenido valores de este parámetro que van desde 0.0 en parcelas sin cubierta, 0.7 en parcelas sembradas con elevada cubierta y de 0.5 en suelos con cubiertas espontáneas.

Finalmente, analizando las imágenes de satélite, junto a las imágenes obtenidas con el dron, y la información de los sensores de humedad, podemos valorar los efectos de las diferencias de humedad según el tipo de litología y según el tipo de cubierta vegetal sembrada en el suelo.

Con este método (Singh et al., 2022), sería posible correlacionar los diferentes parámetros estudiados con las imágenes obtenidas e identificar el tipo de materiales, el estado del cultivo, de la cubierta y del suelo, con lo que el agricultor puede tener unas herramientas de información útiles.

CONCLUSIONES

La medición de la humedad del suelo utilizando las imágenes NDVI y vuelos de drones es un método útil, y puede ser comparable con los resultados obtenidos con medidas realizadas con sensores de humedad situados en posiciones estratégicas en puntos de las zonas estudiadas.

Los resultados preliminares obtenidos fueron útiles como indicadores de varios aspectos medioambientales,

por un lado, se observa el efecto de las propiedades de materiales geológicos presentes en las zonas de estudio, por otro los valores sobre el contenido de humedad del suelo y su capacidad de retención de agua en función de las propiedades físicas y químicas que condicionan la salud del suelo. Realizando la comparación antes y después de realizar cambios que afectan a su fertilidad, o al establecimiento de cubiertas vegetales con especies controladas en campos de cultivo permanentes.

La interpretación correcta de los valores del NDVI puede ayudar a los agricultores a obtener un mayor y más saludable rendimiento, ahorrar dinero en fertilizantes y cuidar mejor del medio ambiente.

REFERENCIAS

Fendrich, A. (2023): From regional to parcel scale: A high-resolution map of cover crops across Europe combining satellite data with statistical surveys. *Science of the Total Environment*, 873: 162300.

Domínguez, A., Ballester, R., Raigón, M.D., García, M.D., Vercher, R., Moscardó, E. y Calabuig, A. (2010): Efecto de cubiertas vegetales permanentes en la fertilidad del cultivo de cítricos ecológicos. En: *IX Congreso de SEAE: «Calidad y seguridad alimentaria»*. Actas: 510-528.

Fernández-Lozano, J. y Gutiérrez-Alonso, G. (2016): Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29 (1): 89-105.

Singh, K., Aitkenhead, M., Fidelis, C., Yinil, D., Sanderson; T., Snoek, D. y Damien, F. (2022): Optimization of spectral pre-processing for estimating soil condition on small farms. *Soil Use and Management*, 38: 150-163.

El nuevo Mapa Tectónico de la Península Ibérica y cordilleras adyacentes: cuencas mesozoicas y cadenas alpinas

The new Tectonic Map of the Iberian Peninsula and adjacent belts: The Mesozoic basins and alpine chains

A. Pedrera[1], J. García-Senz[1], S. Mink[1], M. Druet[1], L.R. Rodríguez Fernández[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Ríos Rosas, 23, Madrid. a.pedrera@igme.es; jesus.garcia@igme.es; s.mink@igme.es; m.druet@igme.es; robertogeo@icloud.com

Resumen: Esta nota resume las principales características de las cuencas mesozoicas y las cadenas alpinas representadas en el nuevo Mapa Tectónico de la Península Ibérica a escala 1:1.250.000. Además, describe brevemente los datos, procedimientos y criterios utilizados durante su elaboración. El mapa sintetiza la arquitectura cortical asociada a la formación de cuencas extensionales y márgenes pasivos durante dos ciclos superpuestos de *rifting* continental (Pérmico-Triásico y Jurásico-Cretácico). Representa los sistemas de fallas asociados a estos procesos y su relación con los depocentros mesozoicos, el modo de inversión de las cadenas alpinas y las estructuras de tectónica salina. Hay que destacar que los elementos geológicos también se han representado en áreas sumergidas en conexión con los sectores emergidos contiguos. Este mapa ofrece una base sólida para investigaciones sobre la evolución geodinámica de Iberia y un marco de referencia para futuras reconstrucciones paleogeográficas.

Palabras clave: Mapa tectónico, Iberia, rifting, inversión tectónica, tectónica salina.

Abstract: *This note summarizes the main features of the Mesozoic basins and alpine chains represented in the new Tectonic Map of the Iberian Peninsula and adjacent cordilleras, at a scale of 1:1.250.000. It also provides a brief description of the data, procedures, and criteria used in its preparation. The map synthesizes the crustal architecture associated with the formation of extensional basins and passive margins during two superimposed cycles of continental rifting (Permian-Triassic and Jurassic-Cretaceous). The geometry of the fault systems associated with these processes and their relationship with the main Mesozoic depocenters, as well as the mode of inversion of these sectors and the structural style of the alpine chains have been represented. Furthermore, special attention has been paid to the mobilized evaporite units and structures resulting from salt tectonic processes. The different geological elements have also been represented in the submerged areas and their connection with the contiguous emerged sectors has been established. In summary, this map provides a solid basis for further geodynamic studies of Iberia and a high-resolution template for paleogeographic reconstructions.*

Key words: *Tectonic map, Iberia, rifting, tectonic inversion, salt tectonics.*

INTRODUCCIÓN

Los mapas tectónicos tienen como objetivo representar las estructuras geológicas y los procesos geodinámicos que han ocurrido en una región. Debido a su carácter científico e interpretativo necesitan una actualización periódica para incorporar nuevos datos y nuevas hipótesis.

Los mapas geológicos convencionales son esenciales como base para la elaboración de un mapa tectónico. Entre 1970 y 1971 se completa la colección de mapas geológicos de síntesis de España a escala 1:200.000. Partiendo de esta base, en 1972, se publica el primer Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares a escala 1:1.000.000, elaborado por Manuel Julivert y colaboradores. Desde entonces hasta la fecha actual, se ha continuado con la elaboración y refinamiento de la cartografía geológica sistemática a escala 1:50.000 en el marco del plan MAGNA.

Varios paradigmas han influido en la comprensión de las estructuras geológicas, la interpretación de los mapas geológicos y, consecuentemente, en los modelos geodinámicos propuestos para cada región. A partir de la década de 1980 se han sucedido avances cruciales en el campo de la geología estructural y la tectónica; como la comprensión de los sistemas de cabalgamiento, la definición de las fallas de bajo ángulo, la tectónica de inversión en cuencas sedimentarias, y más recientemente los procesos de tectónica salina y la hiperextensión con exhumación de manto en contextos de *rifting* continental. Todos estos paradigmas se han desarrollado después de la elaboración del primer mapa tectónico, y muchos de ellos después de la publicación de buena parte de los mapas que conforman la serie MAGNA. El Mapa Tectónico de la Península Ibérica y cordilleras adyacentes a escala 1:1.250.000 pretende incorporar estos avances del conocimiento geológico. Los precedentes directos son el Mapa Tectónico de España a escala 1:2.000.000 (Rodríguez-Fernández, ed., 2004) y el Mapa Geológico de España y Portugal a escala 1:1.000.000 (Rodríguez Fernández y Oliveira (eds), 2015).

El nuevo mapa tectónico se compone de dos partes diferenciadas en su contenido y tratamiento: (i) los basamentos variscos, que eventualmente incluyen un registro cadomiense; (ii) las cuencas mesozoicas y cadenas alpinas, con sus basamentos pre-alpinos

involucrados. Este artículo se centra en esta segunda parte que abarca cuencas rift y márgenes pasivos resultado de dos ciclos de rifting superpuestos que operaron en el Pérmico-Triásico y el Jurásico-Cretácico. La inversión de algunos de estos dominios desde el Cretácico superior en adelante, ha favorecido el desarrollo de las principales cadenas alpinas. Los datos principales y la metodología utilizada durante la elaboración del mapa se resumen en la figura 1.

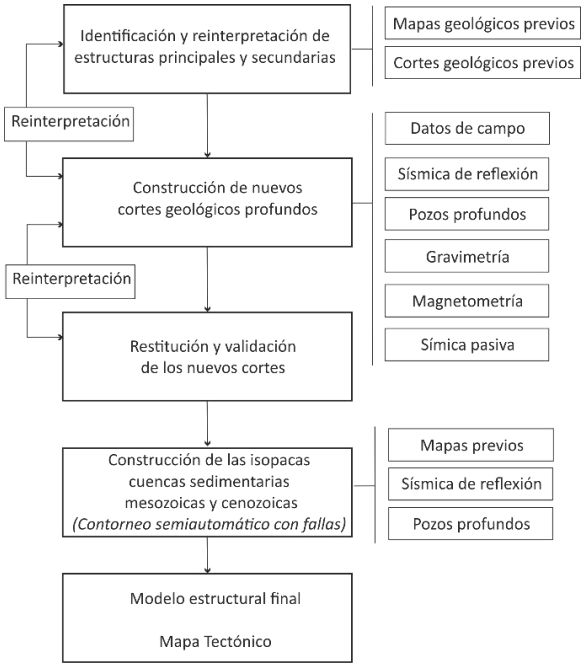


FIGURA 1. *Datos principales y metodología utilizada durante la elaboración del mapa.*

El objetivo esencial del mapa es por un lado que el lector visualice la arquitectura resultante de los procesos rift, el patrón de fallas mayores y menores y su relación con los espesores que definen los depocentros; por otro, reflejar el modo de inversión de estos dominios rift en los sectores orogénicos. En este contexto se han representado las unidades evaporíticas movilizadas y las estructuras resultantes de los procesos de tectónica salina. Asimismo, se han cartografiado los diferentes elementos geológicos en las áreas sumergidas, estableciendo su conexión con los sectores emergidos contiguos.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL MAPA

Principales cuencas mesozoicas y las cadenas alpinas con representación en el mapa (Fig. 2):

Cordillera Bético-Rifeña y Cuenca de Alborán

La Cordillera Bético-Rifeña, en el sur de España y norte de Marruecos, es un orógeno colisional situado en el actual límite convergente de las placas ibérica y africana. Su evolución es el resultado de la subducción de dominios oceánicos y la colisión oblicua de los paleo-márgenes continentales del sur de Iberia y del norte de África.

La zona interna del orógeno está formada por rocas paleozoicas y mesozoicas, organizadas en unidades generalmente adelgazadas con deformación dúctil y metamorfismo pre-alpino y alpino variable. Se diferencian las cortezas originalmente asociadas al paleo-margen magrebí que fueron drásticamente atenuadas durante el Pérmico y Mesozoico (Complejos Alpujárride y Maláguide). Sobre estas cortezas adelgazadas se depositaron facies continentales *Buntsandstein* durante el Triásico inferior-medio, carbonatos someros durante el Triásico superior (carbonatos alpujárrides y Dorsal), y secuencias marinas durante el Jurásico y el Cretácico (Subbético interno). Los procesos extensionales pre-orogénicos favorecieron la exhumación de manto litosférico que actualmente aflora en la parte occidental del orógeno.

De igual forma, se diferencia el Complejo Nevado-Filábride, definido como la unidad tectónica inferior, restringida a la parte central y oriental de la Cordillera Bética, que registra un metamorfismo de alta presión de edad Mioceno inferior-medio. Se interpreta como una parte del paleo-margen sudibérico subducido bajo el paleo-margen magrebí, posteriormente exhumado en el bloque de muro de un despegue extensional.

Se han representado los espesores de las rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas, originalmente depositadas sobre los paleo-márgenes continentales mencionados anteriormente, que ahora forman parte de la parte externa del orógeno. También están representados los sedimentos neógenos depositados en cuencas flexurales sinorogénicas, tanto en cuencas *piggy-back* como en las cuencas de antepaís. En la Cordillera Bética se reconocen cuatro dominios de rift segmentados por fallas de transferencia de orientación NO-SE a ONO-ESE que escalonan los depocentros mesozoicos. Estas fallas han sido posteriormente reactivadas durante la formación del orógeno.

Otras estructuras importantes están relacionadas con la movilización de las evaporitas del Triásico superior tanto en la Cordillera Bética como en el Rif. En el domino más oriental (Prebético oriental) dominan anticlinales con núcleo salino, diapiros comprimidos y amplios sinclinales con relleno de sedimentos sin- y tardiorogénicos. En el Arco de Cazorla, las unidades mesozoicas están deformadas por cabalgamientos más friccionales y pliegues asociados vergentes al NO (Prebético de Cazorla). En la parte central de la Cordillera Bética, las unidades mesozoicas (Subbético y Unidades Intermedias) muestran un patrón poligonal de minicuencas primarias y minicuencas secundarias sobre evaporitas alóctonas. La parte occidental de la Cordillera Bética está dominada por gran cuerpo alóctono de evaporitas triásicas sobre el que yacen distintas minicuencas secundarias. Así mismo, se representan las soldaduras entre minicuencas primarias en la parte oriental del Rif (Prerif) y entre minicuencas secundarias en la parte occidental.

En la parte occidental de la Cordillera Bética y del Rif se distinguen secuencias turbidíticas cretácicas y terciarias presumiblemente depositadas sobre corteza oceánica e interpretadas como un prisma de acreción formado en una zona de subducción océano-continente (Unidades Flysch o del Campo de Gibraltar).

La cuenca arqueada de Alborán occidental ocupa la parte interna del orógeno y acumula hasta 9 km de espesor de sedimentos Miocenos. Se han representado las unidades de arcillas movilizadas que forman volcanes de lodo y diapiros en su parte norte. En la parte central del

mar de Alborán destacan las fallas inversas y de salto en dirección conjugadas que favorecen la indentación bien conocida en la cresta de Alborán.

Cuenca del Algarve - Golfo de Cádiz

La cuenca del Algarve está situada sobre corteza continental adelgazada en la parte occidental del margen sudibérico en transición con la corteza oceánica situada inmediatamente al sur. Se reconocen los principales depocentros jurásico-cretácicos condicionados por la distribución y movilización de las unidades de evaporitas infrayacentes. Estos depocentros no están vinculados directamente a las principales fallas normales, lo que sugiere un estilo de extensión cortical desacoplado de la cobertera. Las fallas de transferencia que segmentaron los dominios rift muestran una orientación ONO-ESE, paralelas a las reconocidas inmediatamente al este en la Cordillera Bética. Los diapiros en el Algarve y en el Golfo de Cádiz están en continuidad con el Trías Keuper movilizado de la parte occidental de Béticas y muestran un mismo patrón cartográfico.

El prisma de acreción que aflora en los dominios emergidos (Unidades Flysch) continúa sumergido en el golfo de Cádiz donde muestra una morfología de lengua. Se compone de secuencias turbidíticas cretácicas y terciarias deformadas por un sistema de cabalgamientos despegado de la corteza oceánica sobre la que mayoritariamente yacen. Además, se reconocen procesos gravitacionales y diapirismo.

Margen Atlántico

El margen occidental de Iberia comprende un sector proximal de corteza continental extendida y un amplio dominio transicional, compuesto mayoritariamente por corteza continental hiperextendida y manto exhumado.

Sobre la corteza continental extendida se localizan cuencas interiores con sedimentos jurásicos y cretácicos. Son las cuencas de Alentejo, Peniche, Lusitania, Porto y Galicia Interior que están limitadas por fallas normales de alto ángulo y segmentadas por fallas de transferencia de dirección ENE-OSO. En el dominio hiperextendido, el manto exhumado ocupa la parte distal del margen, caracterizado por bloques de corteza rotados limitados por fallas normales de bajo ángulo enraizadas en la parte superior del manto serpentinizado. Este dominio tiene una anchura máxima de unos 70 km en el sector septentrional y de unos 140 km en el meridional, ambos separados por fallas de transferencia con orientación ONO-ESE. Se reconocen intrusiones magmáticas (Anomalía J) que se emplazaron en la parte distal del margen cerca de la zona de transición con la corteza oceánica durante el Cretácico.

Margen Cantábrico, Cuenca Vasco-Cantábrica y Pirineos

El Golfo de Vizcaya coincide con una rama oceánica secundaria E-O de la dorsal Atlántica. La extensión fue inicialmente activa durante el rift Pérmico-Triásico y se reactivó durante el Jurásico superior-Cretácico culminando con la exhumación de manto y la formación de corteza oceánica entre 115 y 84 Ma.

El límite meridional del Margen Cantábrico está formado por corteza continental adelgazada. La Cuenca de Asturias, desarrollada durante el Cretácico inferior, ocupa una posición interior en este margen. Más hacia el este, se reconocen dos ramas rift fallidas: una incluye las cuencas de Parentis y Arzacq en Francia, y la otra la Cuenca Vasco-Cantábrica y las cuencas norpirenaicas, entre las que destaca la de Mauléon. Los sedimentos *sinrift* se adaptan sobre potentes unidades salinas movilizadas que fueron depositadas al final del ciclo *rifting* Pérmico-Triásico y que desvinculan efectivamente la deformación entre basamento y cobertera. La rama *rift* Vasco-Cantábrica/Norpirenaica se desarrolló a favor de fallas normales enraizadas en un despegue extensional con buzamiento hacia el sur que favoreció la exhumación de lherzolitas del manto subcontinental en su bloque de muro.

La inversión de estos dominios determina la estructura y evolución de los Pirineos y de las cuencas de antepaís asociadas. En la parte occidental, se desarrollaron cabalgamientos con buzamiento al sur entre la corteza extendida del Margen Cantábrico y el dominio de manto somero y un cabalgamiento frontal con buzamiento hacia el norte entre la Cordillera Cantábrica y la cuenca del Duero. Este cabalgamiento frontal se extiende hacia el este, a lo largo del borde norte de la Cuenca-Vasco Cantábrica acomodando la subducción continental incipiente de la corteza ibérica bajo el dominio de manto somero en el eje de la cadena.

La subducción continental es más acusada en el Pirineo s.s., especialmente en el sector central que acomoda un mayor acortamiento. En este sector, el borde norte del *rift* y el manto somero indentan la corteza del margen sur propiciando: (i) la reactivación contractiva de fallas normales de bajo ángulo que separan bloques de corteza adelgazados situados sobre manto somero (*retrowedge*); (ii) el desarrollo de un imbricado de láminas cabalgantes de basamento dirigidas hacia el sur (*prowedge*). En los Pirineos meridionales las variaciones en la fricción de los cabalgamientos de cobertera, asociadas con cambios en la potencia de la unidad salina triásica, determinan el estilo estructural. El saliente de la zona Surpirenaica Central es una única lámina de cobertera, formada por un conjunto de minicuencas jurásico-cretácicas separadas por diapiros estrujados, que se superpone sobre las unidades del Ebro por un gran cabalgamiento en rellano.

Cordillera Ibérica y Catalánides

Se ha mejorado la cartografía de fallas y pliegues en las ramas NO-SE Castellana y Aragonesa de la Cordillera Ibérica, distinguiendo los cabalgamientos frontales dominantes de basamento y los imbricados en la cobertera despegada. Se han representado además las fallas de rift Pérmico-Triásico y las áreas depocentrales asociadas al *rifting* Jurásico superior- Cretácico en las cuencas de Cameros y del Maestrat. La primera está limitada por una gran falla extensional de bajo ángulo y polaridad sur que fue posteriormente reactivada en contracción. La segunda por fallas extensionales conjugadas ligeramente reactivadas. La cuenca de Maestrat se sitúa en la zona de enlace con la Cadena Costera Catalana, orientada NNE-SSO con una estructura dominante extensional de bloques basculados y semi-fosas rellenas por sedimentos del Oligoceno-

Mioceno superpuesta a cabalgamientos de basamento dirigidos hacia el NO que deforman a los sedimentos paleógenos de la Cuenca del Ebro.

Sistema Central Ibérico

El Sistema Central Ibérico es una cadena montañosa intraplaca que se extiende en dirección NE-SO a ENE-OSO a lo largo de más de 300 km. La elevación de la cadena está esencialmente relacionada con la actividad del cabalgamiento de basamento con vergencia SE de su borde suroriental. Se ha representado el aumento en la potencia de los sedimentos neógenos de la Cuenca de Madrid, vinculado a la subsidencia flexural en el frente del cabalgamiento. A diferencia del resto de cinturones orogénicos, el Sistema Central no parece asociado a la inversión de una corteza previamente atenuada durante el Jurásico y el Cretácico.

Surco de Valencia, Promontorio Balear y Cuenca Argelino-Balear

El Surco de Valencia y el Promontorio Balear son dos dominios continentales alargados en dirección NE-SO. Ambos formaban parte del paleo-margen oriental de Iberia en transición a la corteza oceánica mesozoica del Thetis y preservan las cuencas interiores desarrolladas sobre corteza continental extendida. La más importante es la Cuenca de Columbrets de forma subcircular, que contiene hasta 10 kilómetros de sedimentos jurásicos y cretácicos depositados sobre evaporitas del Triásico superior. La atenuación drástica de la corteza continental en este sector del Surco de Valencia está condicionada por fallas normales de dirección ONO-ESE y buzamiento hacia el sur, interpretadas como fallas permotriásicas reactivadas. Las unidades jurásico-cretácicas sobre el Promontorio Balear alcanzan menos potencia y se organizan en minicuencas primarias separadas por diapiros comprimidos y por soldaduras cabalgantes.

La estructura contractiva resulta de la subducción hacia el NO de la corteza oceánica mesozoica bajo el margen suroriental del Promontorio Balear. En el Surco de Valencia, la convergencia favoreció la inversión y truncación de la Cuenca de Columbrets. Durante el Oligoceno superior-Mioceno, la placa superior del sistema de subducción experimentó extensión asociada al retroceso del *slab*. Este proceso favoreció la intrusión de rocas volcánicas, el desarrollo de fallas normales NE-SO y cuencas asimétricas en el sector nororiental del Surco de Valencia y el avance de la subsidencia regional en el sector meridional. La extensión culminó con la apertura de las cuencas de tras-arco Liguro-Provenzal y Argelino-Balear que incluyen corteza inferior exhumada y corteza oceánica. La sal messiniense fluye lateralmente hacia los dominios con corteza inferior exhumada y corteza oceánica, lo que da lugar a la formación de diapiros en estas regiones.

AGRADECIMIENTOS

El Mapa Tectónico de la Península 1:1.250.000 es un Proyecto Interno del Instituto Geológico y Minero de España. REViSE- Betics- PID2020-119651RBI00.

REFERENCIAS

Julivert et al. (1977). *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares a escala 1:1.000.000*. IGME, Madrid.

MAGNA (2021). *Mapa Geológico Nacional 1:50.000 [en línea]*. Disponible en: http://mapas.igme.es/gis/rest/services/Cartografia_Geologica/IGME_Geode_50/MapServer

Rodríguez-Fernández, L.R. (ed.) (2004): *Mapa Tectónico de España a escala 1:2.000.000*. SGE-IGME, Madrid.

Rodríguez Fernández, L.R. y Oliveira, J.T. (eds.) (2015): *Mapa Geológico de España y Portugal a escala 1:1.000.000*. IGME-LNEG, Madrid.

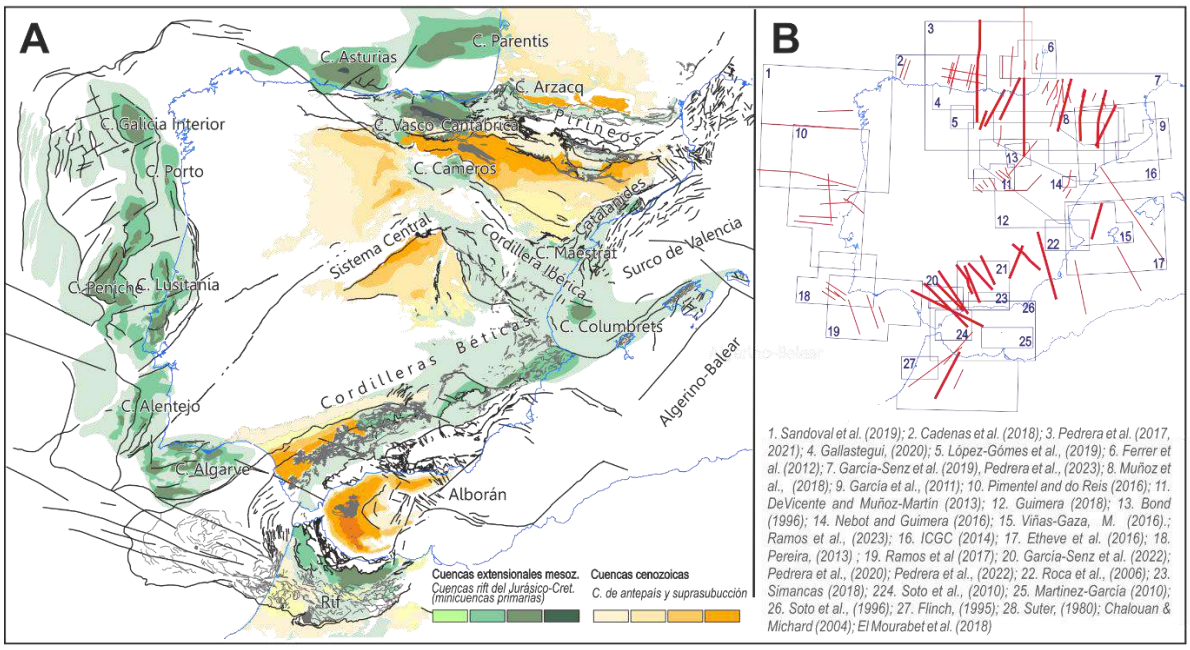


FIGURA 2. A. *Extracto simplificado de la ventana central del Mapa Tectónico que muestra el patrón de las cuencas mesozoicas y cenozoicas. B. Posición de los principales mapas y cortes (líneas rojas delgadas) previos utilizados junto con los mapas de la serie MAGNA. La posición de los nuevos cortes geológicos profundos construidos durante la elaboración del mapa se han representado con líneas rojas gruesas.*

El nuevo proyecto de cartografía geológica 1:25.000 de la Comunitat Valenciana

The new geological map at 1:25,000 scale of the Comunitat Valenciana

A. Robador Moreno[1], J. A. Díaz de Neira Sánchez[1], P. P. Hernaiz Huerta[1], M. J. Mancebo Mancebo[1], S. Mink[1], M. J. Montes Santiago[1], J. Ramajo Cordero[1], E. Rodríguez Escudero[1], L. R. Rodríguez Fernández[2], B. Felipe Garcia [3]; X. Navarro i Garcia[3]; J. Rodríguez Barreiro[3]; S. Yudici Oliver[3]

1 Dpto. Geología y Subsuelo, CN IGME-CSIC. c/ Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. a.robador@igme.es; j.diazdeneira@igme.es; p.hernaiz@igme.es; mj.mancebo@igme.es; s.mink@igme.es; m.montes@igme.es; j.ramajo@igme.es; e.rodriguez@igme.es
2 Mar de Cristal 18, 28221 Majadahonda, Madrid. robertogeo@icloud.com
3 Institut Cartogràfic Valencià. c) La Democràcia, 77, Ciutat Admin. 9 d'Octubre, 46018 València. felipe_bea@gva.es; navarro_xav@gva.es; yudici_san@gva.es; zoilo_jor@gva.es

Resumen: El Institut Cartogràfic Valencià (ICV) y el Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España del CSIC (CN IGME-CSIC) firmaron en julio de 2020 un convenio para el desarrollo de un programa de cartografía geológica sistemática a escala 1:25.000. Actualmente se está desarrollando la primera fase de este trabajo que abarca gran parte de la zona costera de la Comunitat Valenciana y que finalizará en diciembre de 2024. En este momento se ha completado el 70% del programa, que ya está disponible para los usuarios. El IGME lleva a cabo la elaboración de la cartografía geológica digital y el ICV desarrolla las fases de control de calidad cartográfica y la distribución mediante servicios IDE. Los principales objetivos de investigación que se están alcanzando con este trabajo son, por una parte, un notable incremento del conocimiento geológico y por otra, el desarrollo de un nuevo modelo de datos de la información geológica digital, basado en estándares europeos e internacionales que permitirá una gestión, explotación y publicación de la información más eficaz y productiva.

Palabras clave: Mapa geológico, Comunidad Valenciana, Tectónica, Estratigrafía, Modelos de datos.

Abstract: *The Institut Cartogràfic Valencià (ICV) and the National Centre Instituto Geológico y Minero de España of the CSIC (CN IGME-CSIC) signed an agreement in July 2020 for the development of a systematic geological mapping programme at 1:25,000 scale. The first phase of this work, which covers a large part of the coastal area of the Valencian Community, is under development in present days and will be finished by December 2024. Currently, 70% of the programme has been completed and is available to users. The IGME is responsible for the production of the digital geological cartography and the ICV for the cartographic quality control and distribution via SDI services. The main research objectives of this work are a significant increase in geological knowledge and the development of a new database of digital geological information, based on European and international standards, which will allow a more efficient and productive management, exploitation and publication of the information.*

Key words: *Geological map, Comunidad Valenciana, Tectonics, Stratigraphy, Geological modelling*

INTRODUCCIÓN

El mapa geológico es una herramienta fundamental para la planificación territorial y la ordenación del territorio. La configuración geológica es el primer factor que permite la discriminación de usos del territorio y la delimitación de las áreas susceptibles de experimentar riesgos geológicos, conocimientos imprescindibles para las planificaciones urbanísticas y el diseño de infraestructuras. Las investigaciones y los datos aportados durante el proceso de realización del mapa geológico son también fundamentales para la estimación y la gestión de variados recursos naturales, como las aguas subterráneas, las rocas industriales y todo tipo de sustancias minerales susceptibles de aprovechamiento, elementos éstos de gran importancia en el territorio de la Comunitat Valenciana.

La rentabilidad social de las inversiones dedicadas a la cartografía geológica es alta debido a la gran cantidad de aplicaciones que presenta y por la misma razón es difícilmente cuantificable. Para tratar de determinarlas, el IGME realizó un estudio en el año 2004, coincidiendo con la finalización de su principal programa de cartografía geológica, el Plan MAGNA. Sus resultados, obtenidos mediante el análisis de una serie de encuestas, concluyeron que la inversión en ese programa de cartografía geológica sistemática tuvo una relación beneficio/coste de 18; es decir, que con la inversión de 122 millones de euros que supuso el coste del programa de cartografía MAGNA, se aportaron 2.200 millones de euros a la economía española. (García Cortés *et al*, 2005).

La infraestructura de cartografía geológica de la Comunitat Valenciana era muy antigua. La cartografía geológica sistemática a escala 1:50.000 del Plan MAGNA se desarrolló de forma muy temprana en el

ámbito de la Comunitat. La mitad de las hojas se realizaron en los dos primeros años de desarrollo del programa: 1972 y 1973, y el 90% de ellas ya se habían completado al terminar la década de 1970. Cinco hojas se elaboraron entre 1980 y 1982 y, finalmente, las hojas 822 (Benissa) y 848 (Altea) fueron completadas en 1994 y publicadas en 2008.

El programa de cartografía continua GEODE, desarrollado a partir de 2004 a escala 1:50.000 sobre la base de la cartografía MAGNA, no mejoró mucho la situación, al no comportar la realización de nuevos levantamientos cartográficos. Sus trabajos se limitaron a la armonización de las cartografías previas, que se mejoraron de forma puntual con aportaciones cartográficas procedentes de publicaciones, trabajos o informes. Sólo ocasionalmente se realizaron labores de campo para resolver cuestiones concretas de discrepancias cartográficas mayores.

Conscientes de este déficit en el conocimiento geológico de la Comunitat y los beneficios que supone la existencia de una infraestructura geológica de detalle, el Institut Cartogràfic Valencià (ICV) y el IGME (desde el 1 de abril de 2021, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España del CSIC o -CN IGME-CSIC) iniciaron conversaciones para la elaboración de una nueva cartografía geológica sistemática del ámbito de la Comunitat Valenciana, a escala 1:25.000, a través de un convenio de colaboración.

DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Las condiciones legales de la duración de los convenios entre instituciones públicas, limitados a cuatro años, y las disponibilidades presupuestarias de ambos organismos, hicieron necesario que el programa completo de la cartografía geológica de la Comunitat Valenciana fuera dividido en varias fases. Como criterios para determinar las zonas de la primera fase se consideraron, por una parte, factores socioeconómicos, seleccionando las zonas más pobladas, y por otro, criterios de utilidad de los trabajos a desarrollar, priorizando aquellos sectores en los que el nuevo conocimiento geológico aportase más criterios para dar solución a los problemas de planificación territorial, delimitación de riesgos geológicos y búsqueda y gestión de los recursos geológicos. Las zonas costeras de la Comunitat Valenciana resultaron ser las áreas en las que estos dos criterios alcanzaban sus mayores valores, por la suma de la presión demográfica y la incidencia de la dinámica geológica de los fenómenos costeros. Aquellas constituían además sectores con predominio de las formaciones superficiales, con lo que se contribuía a mejorar la cartografía de los depósitos cuaternarios, tradicionalmente descuidada en los inicios del Plan MAGNA, ya que este Plan estuvo originalmente enfocado a la geología no superficial, debido a su interés como herramienta de búsqueda de recursos geológicos.

Consecuentemente, se seleccionó como primera fase de desarrollo del programa un sector de la fachada costera de la Comunitat Valenciana comprendido entre las localidades de Oropesa, al norte, y Torrevieja, al sur, en donde se concentra un 80% de la población. La superficie total de trabajo asciende a 5.192,39 km^2, que se encuentran repartidos en 60 hojas 1:25.000 de acuerdo con la distribución del MTN del Instituto Geográfico Nacional (Fig. 1).

Una vez definida el área de trabajo y establecido el presupuesto, el 28 de julio de 2020 se firmó el Convenio de colaboración entre el ICV y el IGME con una duración prevista de 4 años.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El territorio de la Comunitat Valenciana se encuentra repartido entre dos de las grandes unidades geológicas de la Península Ibérica: las Cordilleras Ibérica y Bética, sobre las que se superpone la estructuración extensiva neógena, de orientación NNE-SSO y relacionada con la apertura del Surco de Valencia del Mar Mediterráneo.

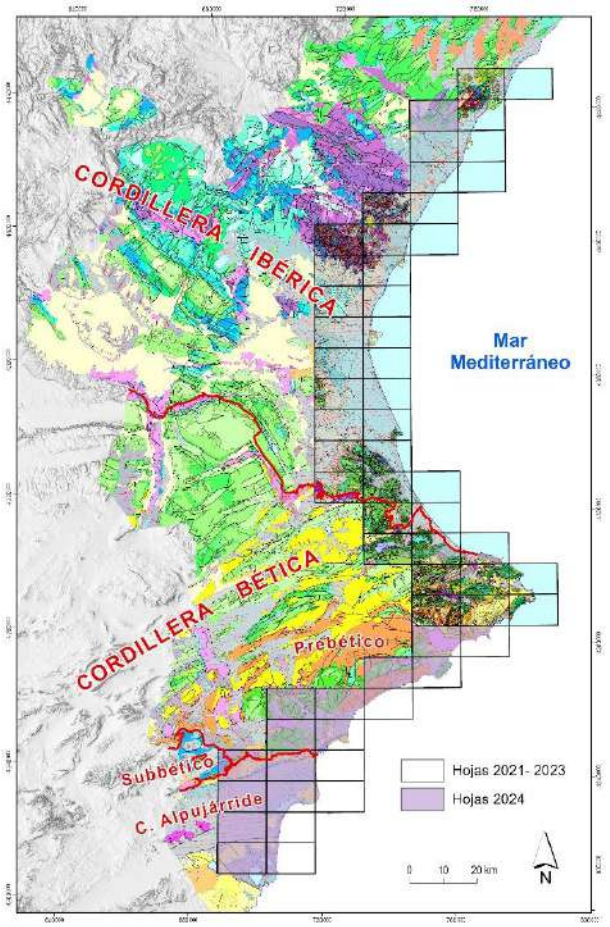


FIGURA 1. *Extensión de la zona de trabajo del proyecto dividida en cuadrantes 1:25.000. El área no coloreada corresponde a la zona ya cartografiada a fecha de 31/01/2024. El mapa geológico de base corresponde al nuevo Mapa Geològic de la Comunitat Valenciana a escala 1:350.000 de la Col·lecció Autonòmica. CN-IGME-CSIC e ICV (2022)*

El área seleccionada en esta fase de trabajo incluye la porción SE de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica y el sector NE de la Cordillera Bética que comprende el Prebético de la provincia de Alicante, un pequeño sector del Subbético y el complejo Alpujárride en el sector más meridional (Fig. 1).

La casi totalidad de los materiales aflorantes en el área del proyecto corresponden a rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico, con la excepción de unos pequeños asomos de rocas paleozoicas en el sector del Desierto de Las Palmas y unos diminutos afloramientos de rocas volcánicas neógenas en los sectores de Picassent y las Islas Columbretes.

CARACTERÍSTICAS DE LA CARTOGRAFÍA

Este proyecto diferencia dos etapas en el tratamiento de la información digital. En la primera se elaborará una nueva capa de cartografía geológica continua sin límites de hojas topográficas ni divisiones administrativas que interrumpan la continuidad de la información geológica basada en el modelo GEODE. En esta etapa no se contempla la existencia o la inclusión de información que generalmente está contenida en documentos complementarios como una memoria explicativa, cortes geológicos o columnas estratigráficas. Sin embargo, de cara a una segunda etapa del proyecto se prevé la migración de la información geológica a un nuevo modelo de datos que almacene este tipo de información. Toda la información geológica generada en este trabajo, incluyendo las descripciones de las unidades cartográficas, es bilingüe en valencià y en castellano.

Como soporte inicial de la información del proyecto se ha seleccionado el modelo de datos GEODE por ser un modelo con una normativa ya desarrollada, y ampliamente implementada y por disponer de una definición de simbología suficientemente completa. Sin embargo, en este trabajo se han aplicado algunas modificaciones para ajustarse a las particularidades del proyecto y a los cambios tecnológicos desde que se desarrolló la normativa GEODE.

Dos de las principales variaciones han sido el cambio de formato de las capas de información de "*shapefile"* a "*geodatabase"* de ESRI y la integración en una única base de datos continua de toda la información geológica que se genera. Esto ha facilitado al ICV aplicar mejoras en la gestión, producción, actualización, revisión y publicación de esta cartografía geológica.

Otra modificación de importancia ha consistido en la inclusión de un código alfanumérico, único y distintivo para cada cuerpo litológico. Este identificador alfanumérico está compuesto por un primer término correspondiente a una sigla basada en la posición cronoestratigráfica de la unidad y un segundo término, optativo, que describe la litología, basada en una relación normalizada de abreviaturas. El uso de este código aporta diversas ventajas. Por una parte, hace más inmediata la ubicación cronológica de las unidades cartográficas, para lo cual generalmente hay que recurrir a su consulta en la leyenda acompañante del mapa geológico. Y, por otra parte, asigna a cada unidad cartográfica un código identificador propio y único que permitirá reconocerla en todos los ámbitos que aflora, aun en diferentes proyectos cartográficos, siendo este el primer paso para una futura elaboración de un catálogo de unidades estratigráficas. Esta modificación ha permitido al ICV definir leyendas dinámicas para las consultas en los servicios IDE, similares a las de los mapas geológicos convencionales.

Este proyecto también quiere aprovecharse para potenciar el aspecto investigador de la sistematización digital de la cartografía geológica. En concreto, se pretende explotar la generación y el uso de la información geológica a través de una labor centrada en la normalización, la armonización y el establecimiento de relaciones entre los diferentes datos geológicos, que incrementen el conocimiento y la comprensión de la configuración geológica.

Para conseguir este objetivo, los esfuerzos se han centrado en el desarrollo de un nuevo modelo de datos geológico, alternativo al modelo GEODE modificado que se ha comentado anteriormente, que se basa en estándares europeos e internacionales, fundamentalmente INSPIRE y GeoSciML, pero que también incluye algunas de las peculiaridades de la cartografía del IGME. Esta línea de trabajo sigue las iniciativas adoptadas por muchos servicios geológicos europeos para la armonización básica de la geología, así como en muchos de los proyectos auspiciados por organizaciones como EuroGeoSurveys.

Una parte fundamental del modelo se compone del uso de vocabularios controlados de términos científicos que describen, de forma armonizada y estandarizada, la información geológica. En este sentido, se han adoptado aquellos desarrollados y adoptados como estándares en la comunidad geológica, realizándose a la vez un notable esfuerzo para su adaptación al IGME y desarrollando vocabularios nuevos en los casos necesarios. Entre éstos últimos destaca el vocabulario de rocas recientemente preparado en el IGME (Díaz de Neira *et al*., 2019): Vocabulario de rocas edición final.pdf (igme.es). El modelo también ofrece mecanismos para posibilitar su explotación semántica en el futuro, pudiéndose incluir conceptos de vocabularios controlados a través de URI y principios de datos enlazados (*linked data*), aspecto muy relevante actualmente.

El modelo recoge los objetos geológicos comúnmente descritos y representados en mapas geológicos, pero también información que tradicionalmente se recoge en memorias y bases de datos u otros formatos separados del propio mapa. Consta de un núcleo básico para la descripción de los elementos geológicos y sus características elementales: unidades geológicas, estructuras geológicas y geomorfología. Estos elementos se vinculan a uno o varios eventos geológicos en orden cronológico, que permiten registrar su historia geológica. Los eventos son descritos a través de un rango de edades, los procesos geológicos y los ambientes de formación. Este núcleo se extiende para abordar una descripción más detallada de los elementos básicos, incluyendo la descripción de la litología, la estratigrafía, el metamorfismo y las alteraciones. Por otro lado, también se posibilita la inclusión de información relativa a estaciones de toma de datos o documentación asociada.

La geometría se trata independientemente de la información geológica descriptiva, por lo que a un objeto geológico se le pueden vincular distintas geometrías, conformado un modelo de datos apto para tratar información multiescala.

El modelo se formaliza en una "*geodatabase"* relacional que abarca todos los aspectos descritos anteriormente. Para agilizar el modelo en su utilización en aplicaciones basadas en mapas a través de la web se desarrollarán capas de información individuales que recojan la información esencial y faciliten su interpretación.

La finalidad última es crear una base de datos geológica única que incluya todos los objetos geológicos y su caracterización, representados y representables en los mapas geológicos del IGME (lo que supone de facto una ampliación de la información considerada hasta el momento), junto a otra información geológica temática que se genere en el futuro, todo ello de cara a lograr una gestión y explotación integrada de la información más eficaz y acorde a las necesidades actuales.

DESARROLLO DEL PROYECTO

El convenio se inició el 1 de agosto de 2020 con una duración inicial prevista de 4 años. Sin embargo, las limitaciones de movilidad a causa de la pandemia de COVID 19 que seguían afectando a los desplazamientos en la segunda mitad del año 2020, junto a otros problemas operativos, aconsejaron que para su correcto desarrollo la actividad se prolongase hasta el 15 de diciembre de 2024. Esta prórroga se oficializó en una adenda al convenio, firmada el 17 de diciembre de 2021.

La toma de datos en campo se ha realizado por el personal del CN IGME CSIC, mayoritariamente mediante la aplicación FieldMove de Petroleum Experts instalada en dispositivos tipo tablet de Samsung y Apple iPad. Esos datos se convierten en información que por un lado se transfiere a una "*geodatabase"* de ESRI siguiendo el modelo GEODE y, por otro, sirve para alimentar las bases de datos del nuevo modelo. Esta nueva información puede ser la que hace referencia a la descripción de la estratigrafía o la alteración, aspectos relevantes en la zona de trabajo.

Aunque el resultado final del proyecto es una cartografía geológica continua, para su desarrollo operativo se ha dividido el área a cartografiar en cuadrantes de hojas 1:25.000 que han sido realizadas por diferentes equipos. Los trabajos siguen una planificación anual y la información completada, tras ser validada anualmente por los responsables del proyecto por parte del ICV, se pone a disposición pública : GeoCV25 - ICV - Generalitat Valenciana (gva.es), donde se puede consultar en el visor cartográfico de la Generalitat Valenciana, añadirse como servicios IDE WMS y WFS o descargarse en formato Geopackage (GPKG).

CONCLUSIONES

Con este proyecto se están alcanzando varios objetivos de investigación. Por una parte, un notable avance del conocimiento geológico de la Comunitat Valenciana difundido a través de diversos canales, como por ejemplo organizando la XXXIII Reunión de la Comisión de Tectónica de la Sociedad Geológica de España, donde se presentó una nueva cartografía del sector de la Sierra Calderona y los resultados derivados de ella (Hernaiz Huerta, 2022), así como en revistas científicas (Hernaiz Huerta, 2024). Por otro lado, el desarrollo de un nuevo modelo de datos, cuyo objetivo es crear un método de trabajo para la gestión y el tratamiento más eficaz y completo de la información geológica, principalmente de cara a ser aplicada como base para todos los campos de las ciencias geológicas, como, por ejemplo, los recursos minerales, los riesgos geológicos, las aguas subterráneas o los recursos energéticos, entre muchos otros. Este nuevo modelo aprovecha las ventajas que proporciona la interoperabilidad de la información y su facilidad de integración con otras comunidades de datos (nacionales, europeas e internacionales), aumentando las sinergias con otros conjuntos de datos, con lo que se espera impulsar la extracción de nueva información y la generación de cartografías temáticas derivadas que permitan ser usadas por todos los actores de la sociedad, tanto expertos como no expertos, como base para sus investigaciones y toma de decisiones.

REFERENCIAS

Díaz de Neira Sánchez, J. A., Gallastegui, G., González-Menéndez, L. y Mancebo Mancebo M. (2019): *Vocabulario de Rocas, Sedimentos y Formaciones Superficiales*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 162 p.

García Cortes, A., Vivancos, L. y Fernández Gianotti, J. (2005): Evaluación económica y social del Plan MAGNA. *Boletín Geológico y Minero*, 116 (4): 291-305.

Hernaiz Huerta, P.P. (2022): *La estructura de Sierra Calderona (SE de la Cordillera. Ibérica): El colapso extensional neógeno de un edificio Permo-Triásico y Jurásico estratigráficamente complejo.* Guía de campo de la XXXIII Reunión de la Comisión de Tectónica, SGE, Madrid.

Hernaiz Huerta, P. P. (2024): The geology of Sierra Calderona (SE Iberian Cordillera, Spain), a review. Results of a new 1:25.000 scale geological mapping. *Journal of Maps, en prensa.*

El nuevo Mapa Tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes: El basamento de los macizos variscos.

The new Tectonic Map of the Iberian Peninsula and adjacent belts: The basement of the Variscan massifs.

F.J. Rubio Pascual[1], L.R. Rodríguez Fernández[1], L.M. Martín Parra[1], L. González Menéndez[2], G. Gallastegui[3], A.R. Solá[4], J.M. Romão[4], J. Matas[1], S. Mink[1], P. González Cuadra[2] y R. Díez Fernández[5]

1 Dpto. Geología y Subsuelo, IGME-CSIC. 28003 Madrid. f.rubio@igme.es; robertogeo@icloud.com; lmmparra@ono.com; j.matas@telefonica.net; s.mink@igme.es:
2 Dpto. Geología y Subsuelo, IGME-CSIC. 24006 León. l.gonzalez@igme.es; pgc@usal.es
3 Dpto. Geología y Subsuelo, IGME-CSIC. 33005 Oviedo. g.gallastegui@igme.es
4 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). 2610-999 Amadora, Portugal. rita.sola@lneg.pt; manuel.romao@lneg.pt
5 Dpto. Geología y Subsuelo, IGME-CSIC. 37001 Salamanca. r.diez@igme.es

Resumen: Se presenta la geología del basamento de los macizos variscos correspondiente al nuevo Mapa Tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes, a escala 1:1.250.000. Las unidades cartográficas se agrupan por criterios geodinámicos, estructurales, tectono-estratigráficos, tectono-sedimentarios, tectono-metamórficos y tectono-magmáticos, incluyendo geocronología actualizada. Como principales unidades geodinámicas aparecen las cuencas de antepaís y cinturones de pliegues y cabalgamientos variscos del SO ibérico y de la Zona Cantábrica, los hinterlands gondwánico y perigondwánico, los cinturones de sutura varisca del NO, centro y SO ibérico, el terreno de Finisterra y las cuencas intramontanas variscas. Estas grandes unidades se dividen en unidades estructurales según criterios de vergencia, estilo de deformación, metamorfismo y aloctonía relativa. Tectono-estratigráficamente, se agrupan conjuntos separados por discontinuidades estratigráficas mayores, y se han resaltado los niveles volcánicos, las facies sedimentarias sintectónicas (flysch, altos fondos arrecifales, molasas), las series de margen pasivo y la intensidad de los procesos metamórficos. Los cuerpos plutónicos y metaplutónicos se organizan en conjuntos de intrusión respecto a los procesos orogénicos y en relación con las rocas volcánicas dentro de cada pulso magmático. Se representan estructuras mayores, tanto contractivas (fallas inversas) como extensionales, desgarres y otras; trazas axiales de pliegues y trazas de foliación principal.

Palabras clave: Mapa tectónico, tectono-estratigráfico, tectono-sedimentario, tectono-metamórfico, tectono-magmático.

Abstract: *We present the basement geology of the Variscan massifs corresponding to the new Tectonic Map of the Iberian Peninsula and adjacent belts at the scale of 1:1.250.000. The cartographic units are grouped according to geodynamic, structural, tectonostratigraphic, tectonosedimentary, tectonometamorphic and tectonomagmatic criteria, including an updated geochronology. The map distinguishes as main geodynamic units the Variscan foreland basins and fold-and-thrust belts from SW Iberia and the Cantabrian Zone, the Gondwanan and Peri-Gondwanan hinterlands, the Variscan suture belts in NW Iberia, Central Iberia and SW Iberia, the Finisterra Terrane and the Variscan intramontane basins. These large units are divided into structural units according to vergence, deformation style, metamorphism and allochthonous nature. From the tectonostratigraphic point of view, the bedrock is grouped into units separated by major unconformities. Volcanic levels, syntectonic sedimentary facies (flysch, high marine reefs, molasses), passive-margin series and the intensity of metamorphic processes have been highlighted. Plutonic and meta-plutonic bodies are organized in intrusive groups respecting to major orogenic processes and related to the volcanic rocks into the corresponding magmatic pulses. Major structures, so contractive (reverse faults) as extensional, strike-slip and others; fold axis traces and main foliation trends are also represented.*

Key words: *Tectonic map, geodynamics, tectonostratigraphic, tectonosedimentary, tectonometamorphic, tectonomagmatic.*

INTRODUCCIÓN

Los mapas geológicos y geotemáticos son herramientas fundamentales en las Ciencias de La Tierra que integran el conocimiento adquirido de investigaciones previas, tanto de carácter regional como general. Su utilidad es destacable ya que se utilizan como base en trabajos científicos, así como en multitud de aplicaciones económicas, sociales y administrativas.

Dada su naturaleza interpretativa y científica, estos mapas necesitan una recurrente revisión y actualización para incluir nuevos datos adquiridos, así como nuevas hipótesis planteadas. Con este objetivo de actualización

y mejora del conocimiento geológico se presenta en este trabajo un nuevo mapa tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes.

ANTECEDENTES

Los antecedentes inmediatos de este Mapa Tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes a escala 1:1.250.000 son el Mapa Tectónico de España a escala 1:2.000.000 (Rodríguez-Fernández, ed., 2004) y especialmente el Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares a escala 1:1.000.000 de Julivert *et al*., (1977). El enorme avance en el conocimiento geológico de la Península Ibérica en las últimas décadas, así como su representación en mapas geológicos de gran formato (e.g. Rodríguez Fernández y Oliveira, eds., 2015) han propiciado la necesidad y facilitado la oportunidad de realizar este mapa por parte del IGME-CSIC con la colaboración del LNEG-INETI.

MARCO CONCEPTUAL

El Mapa Tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes a escala 1:1.250.000 se compone de tres partes diferenciadas en su contenido y tratamiento:

- Basamentos variscos, incluyendo la historia cadomiense en su caso.
- Cadenas alpinas, incluyendo sus basamentos variscos involucrados.
- Geología *off-shore*.

La organización de la información de los basamentos de los macizos variscos está sustentada en grandes unidades geodinámicas, que no necesariamente coinciden con las clásicas zonas geológicas basadas, sobre todo, en criterios estratigráficos (Julivert *et al*., 1977; Arenas *et al*., 1986); tratando, además, de adoptar soluciones de consenso entre las diferentes escuelas de pensamiento (e.g., Martínez Catalán *et al.*, 2007; Simancas *et al*., 2009; Díez Fernández y Arenas, 2015). Como modelo de referencia se adoptaron los esquemas de Martínez Catalán *et al*. (2002, 2007).

Además de las grandes unidades de significación geodinámica se han pretendido mostrar los diferentes cinturones estructurales que implican cambios de vergencia o posición estructural y aloctonía relativa, los distintos grandes conjuntos tectono-estratigráficos de materiales separados por discontinuidades estratigráficas mayores, los diversos niveles corticales en función de sus características tectono-metamórficas y los grupos de rocas intrusivas ordenados por su historia tectono-magmática. A ello se superponen distintas tramas y símbolos que añaden información sobre los niveles volcánicos existentes, diversas facies sedimentarias de interés tectónico (flysch, altos fondos arrecifales, molasas o, por el contrario, series de margen pasivo) y la serie de facies, intensidad y edad de los procesos metamórficos.

ESTRUCTURA Y CONTENIDO

La información se representa en la ventana central del mapa y en dos leyendas con el mismo formato cronoestratigráfico (Tabla Cronoestratigráfica Internacional, Cohen *et al*., 2013, v2021/05) y división de unidades en columnas: una leyenda para los materiales sedimentarios y volcánicos más o menos metamorfizados, y la otra para los materiales intrusivos. La primera división, de carácter principalmente geodinámico, se establece en el orden aproximado de una sección sur-norte del Macizo Ibérico (Fig. 1):

- Cuenca de antepaís externa y cinturón de pliegues y cabalgamientos peri-gondwánico varisco del SO de Iberia.
- Terreno acrecionado de Finisterra.
- Zona de sutura varisca del SO de Iberia.
- Hinterland peri-gondwánico varisco.
- Zona de sutura varisca y/o cadomiense de Iberia central.
- Zona de sutura varisca del NO de Iberia.
- Hinterland gondwánico varisco.
- Cuenca de antepaís y cinturón de pliegues y cabalgamientos gondwánicos variscos.

Y fuera de sección:

- Cuencas intramontanas tardiorogénicas.

Se añade en la fila inferior de las leyendas (Figs. 2 y 3) una correlación aproximada con la zoneografía clásica del Macizo Ibérico.

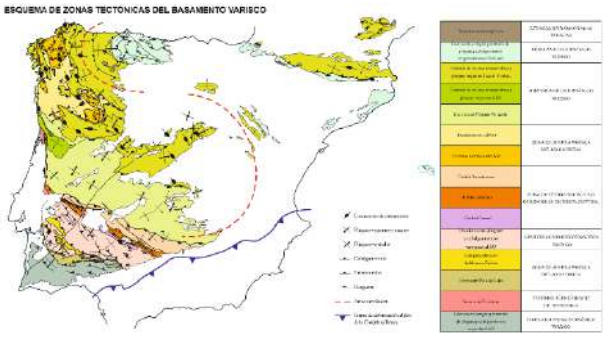


FIGURA 1. *Esquema de zonas tectónicas del basamento varisco ibérico.*

En un segundo orden se introducen subdivisiones: la zona de sutura varisca del SO de Iberia se subdivide en el terreno del Pulo do Lobo y el complejo alóctono de Moura – Cubito; la zona de sutura de Iberia central se subdivide en Unidad Central, Unidad Alóctona y Unidad Parautóctona; la zona de sutura del NO de Iberia se subdivide en terrenos alóctonos y parautóctonos; y el hinterland gondwánico se subdivide en el Dominio de Pliegues Verticales, un dominio de mantos metamórficos y pliegues vergentes al SO y un dominio de mantos metamórficos y pliegues vergentes hacia el foreland varisco.

Las columnas de unidades geodinámicas y estructurales de la leyenda de materiales sedimentarios y



FIGURA 2. *Leyenda para materiales sedimentarios y volcánicos variscos y prevariscos.*

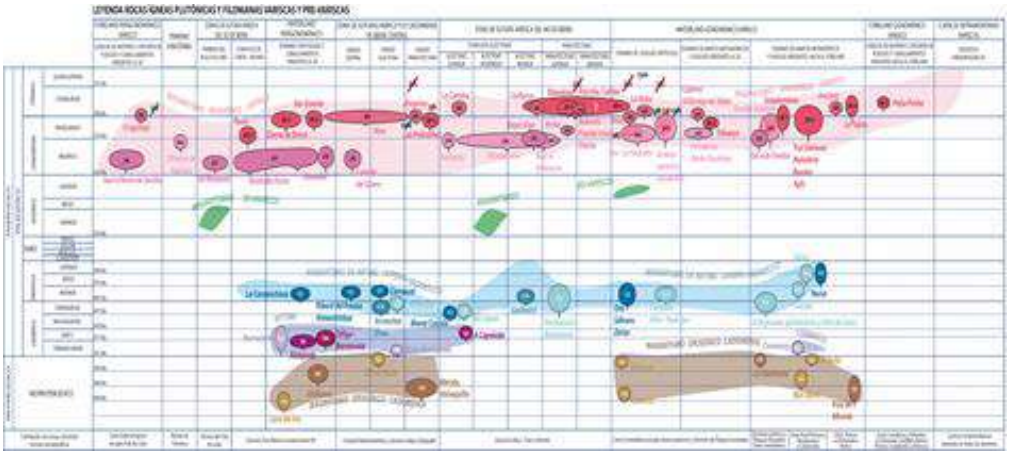


FIGURA 3. *Leyenda para rocas plutónicas y filonianas variscas y prevariscas.*

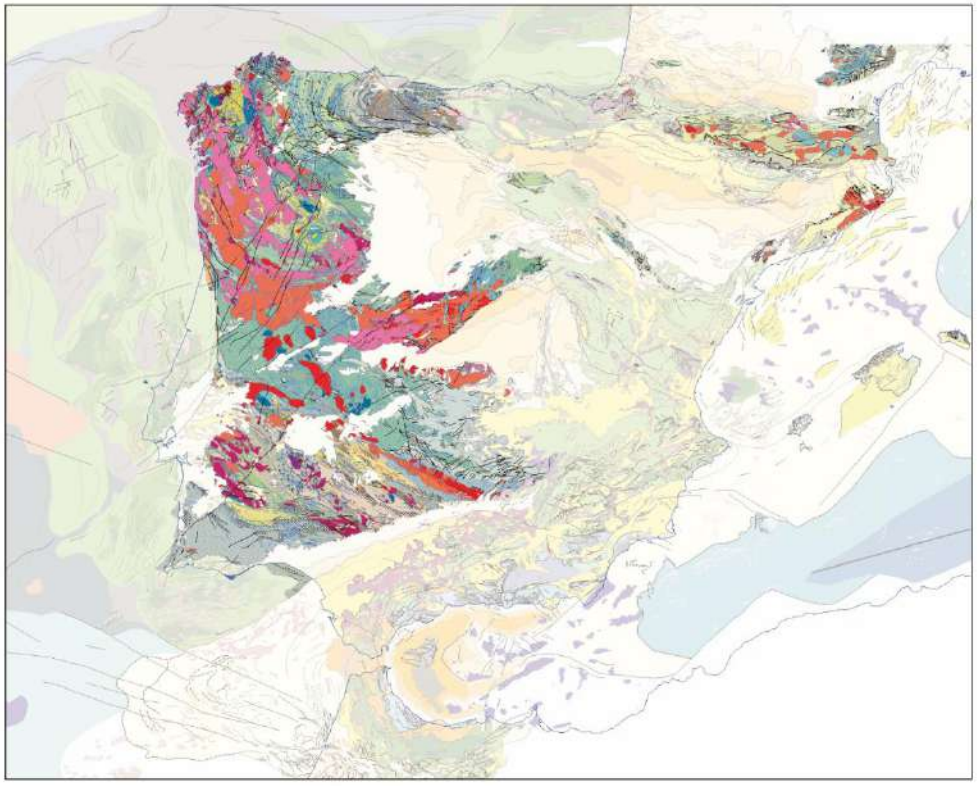


FIGURA 4. *Imagen de la ventana central del mapa con la geología de los macizos variscos resaltada (excepto Zonas Internas Béticas).*

volcánicos (Fig. 2) se subdividen en conjuntos separados por discontinuidades mayores y los hiatos estratigráficos correspondientes, lo que ayuda a relacionarlos con la representación cronológica de los procesos tectónicos compresivos y extensionales, metamórficos, e incluso los episodios magmáticos. Se añade una relación explicativa de formaciones litoestratigráficas incluidas en esas unidades.

En la leyenda de materiales variscos y prevariscos de origen intrusivo (Fig. 3), se representan fundamentalmente rocas plutónicas (y filonianas) en su edad y posición a lo largo de la sección, siendo proyectados como cuerpos sobre un área sombreada de generalización del pulso magmático que incluiría también las edades de rocas efusivas en su caso. Las rocas plutónicas variscas se han dividido en granitoides sin/tardi-tectónicos y tardi/post-tectónicos, y las pre-variscas en rocas plutónicas cadomienses, rocas plutónicas del Cámbrico inferior (Terreneuviense-Serie 2) y rocas plutónicas del Cámbrico superior a Ordovícico (Furongiense-Ordovícico). Dentro de estos grupos cronoestratigráficos se separan diferentes tipologías genéticas I (protolito metaígneo), S (protolito metasedimentario) y A (tipología alcalina-peralcalina), por su significación en cuanto al ambiente geotectónico de formación.

En la ventana central del mapa (Fig. 4) se representan, además de estas unidades e información tectono-estratigráfica, tectono-metamórfica y tectono-magmática, distintos elementos tectónicos fundamentales para la lectura del mapa, como fallas, tanto contractivas (cabalgamientos y fallas inversas), como extensionales, desgarres y otras fallas, trazas axiales de pliegues de diferentes fases con expresión de su vergencia y trazas de foliación principal.

CONCLUSIONES

El nuevo Mapa Tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes a escala 1:1.250.000, producido por el IGME-CSIC con la colaboración del LNEG-INETI, pretende recoger el avance de las últimas décadas en el conocimiento de la geología del basamento varisco de Iberia, sintetizado en un documento cartográfico que parte de una voluntad de consenso entre las diferentes escuelas de pensamiento. El mapa soporta información de tipo geodinámico, estructural, tectono-estratigráfico, tectono-sedimentario, tectono-metamórfico y tectono-magmático con un formato que intenta resaltar la interrelación entre todos estos procesos a lo largo de la historia geológica y el resultado en el *collage* final de la Cadena Varisca Ibérica. Consideramos que este mapa puede ser una herramienta útil para la visualización en conjunto de procesos complejos sucedidos a escala de cadenas orogénicas.

AGRADECIMIENTOS

El Mapa Tectónico de la Península Ibérica y sus cordilleras adyacentes ha contado con la financiación del Instituto Geológico y Minero de España, del Proyecto PID2020-112489GB-C22 del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020 y la colaboración del Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Portugal, de Antonio Ribeiro de la U. de Lisboa y de Rui Dias de la U. de Évora.

REFERENCIAS

Arenas, R., Gil Ibarguchi, J.I., González Lodeiro, F., Klein, E., Martínez Catalán, J.R., Ortega Gironés, E., Pablo Maciá, J.G. y Peinado, M. (1986): Tectonostratigraphic units in the complexes with mafic and related rocks of the NW of the Iberian Massif. *Hercynica*, 2: 87-110.

Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. y Fan, J.-X. (2013; actualizada): The ICS International Chronostratigraphic Chart (v2021/05, traducción al castellano de J.C. Gutiérrez-Marco – SGE – IGME – CSIC-UCM – RAC). *Episodes*, 36: 199-204.

Díez Fernández, R. y Arenas, R. (2015): The Late Devonian Variscan suture of the Iberian Massif: A correlation of high-pressure belts in NW and SW Iberia. *Tectonophysics*, 654: 96-100.

Julivert et al. (1977). *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares a escala 1:1.000.000*. IGME, Madrid.

Martínez Catalán, J.R., Díaz García, F., Arenas, R., Abati, J., Castiñeiras, P., González Cuadra, P., Gómez Barreiro, J. y Rubio Pascual, F.J. (2002): Thrust and detachment systems in the Ordenes Complex (northwestern Spain): Implications for the Variscan-Appalachian geodynamics. En: *Variscan-Appalachian dynamics: The building of the late Paleozoic basement* (J.R. Martínez Catalán, R.D. Hatcher, Jr., R. Arenas y F. Díaz García, eds.). GSA Special Paper, 364: 163-182.

Martínez Catalán, J.R., Arenas, R., Díaz García, F., González Cuadra, P., Gómez-Barreiro, J., Abati, J., Castiñeiras, P., Fernández-Suárez, J., Sánchez Martínez, S., Andonaegui, P., González Clavijo, E., Díez Montes, A., Rubio Pascual, F.J. y Valle Aguado, B. (2007): Space and time in the tectonic evolution of the northwestern Iberian Massif: Implications for the Variscan belt. En: *4-D Framework of Continental Crust* (R.D. Hatcher, Jr., M.P. Carlson, J.H. McBride y J.R. Martínez Catalán, eds.). *GSA Memoir*, 200: 403-423.

Rodríguez-Fernández, L.R. (ed.) (2004): *Mapa Tectónico de España a escala 1:2.000.000*. SGE-IGME, Madrid.

Rodríguez Fernández, L.R. y Oliveira, J.T. (eds.) (2015): *Mapa Geológico de España y Portugal a escala 1:1.000.000*. IGME-LNEG, Madrid.

Simancas, J.F., Azor, A., Martínez-Poyatos, D., Tahiri, A., El Hadi, H., González-Lodeiro, F., Pérez-Estaún, A. y Carbonell, R. (2009): Tectonic relationships of Southwest Iberia with the allochthons of Northwest Iberia and the Moroccan Variscides. *Comptes Rendus Geoscience*, 341: 103-113.

Propuesta de un mapa de formaciones superficiales de España

Proposal for surficial formations map of Spain

A. Salazar[1], J.A. Díaz de Neira[1] y J.A. Rodríguez[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), C/ La Calera, 1, 28760 Tres Cantos. a.salazar@igme.es, j.diazdeneira@igme.es, ja.rodriguez@igme.es

Palabras clave: cartografía, formaciones superficiales, sistemas de información geográfica, regolito

Resumen

La Subdirección General de Política Forestal y Lucha contra la Desertificación (MITECO), realizó un encargo (dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia) a Tecnologías y Servicios Agrarios (TRAGSATEC) para elaborar un mapa de formaciones superficiales en varias áreas piloto de España (Escala 1:50.000). Esta cartografía se concibe como un mapa digital y continuo destinado a cubrir la totalidad del territorio nacional, por lo que es imprescindible definir un modelo de datos que permita almacenar y gestionar la información en un entorno SIG. TRAGSATEC ha contado con el asesoramiento del IGME (CSIC) para el diseño del modelo de datos. El objetivo es establecer las bases para la caracterización del material parental del suelo, un componente de la geosfera que condiciona la tipología, evolución y salud del suelo y supone un acercamiento al inventario de los mismos.

Los atributos considerados en el modelo de datos se refieren a tres tipos de propiedades principales: 1) Origen y morfología (morfogénesis); 2) Litología, teniendo en cuenta la consistencia; 3) Espesor de la formación, ya sea medido (base aflorante), o estimado. Para ello se han tenido en cuenta diversas normativas previas (Martín-Serrano *et al*., 2004; Díaz de Neira *et al*., 2019). El modelo de datos ha sido probado mediante fotointerpretación y cartografía en dos sectores del centro peninsular (Cuenca del Tajo, Sistema Central) y un sector costero (Valencia). Los resultados nos permiten la consulta de las características de las formaciones superficiales, así como su distribución y relaciones espaciales.

Abstract

The Subdirección General de Política Forestal y Lucha contra la Desertificación (MITECO) commissioned (within the Recovery, Transformation and Resilience Plan) to Tecnologías y Servicios Agrarios (TRAGSATEC) the preparation of a surface formations map in several pilot areas of Spain (1:50.000 scale). Devised as a digital and continuous map to cover the entire national territory, the map needs a data model for storing and managing the information in a GIS environment. TRAGSATEC has counted with the assessment of the IGME (CSIC) to create the data model. The objective is to set the basis for the characterization of the parent material of the soil, a component of the geosphere that conditions its typology, evolution and health, and represents a first approach to its inventory.

The attributes considered in the data model refer to three main types of properties: 1) Origin and morphology (morphogenesis); 2) Lithology, taking into account consistency; 3) Thickness of the formation, either measured (outcrop base), or estimated. For this purpose, various previous methodologies have been taken into account (Martín-Serrano *et al*., 2004; Díaz de Neira *et al*., 2019). The data model has been tested through photointerpretation and cartography in two sectors of the peninsular centre (Tajo Basin, Central System) and a coastal sector (Valencia). The results allow us to consult the attributes of the surface formations, as well as observe their distribution and spatial relationships.

Referencias

Díaz de Neira Sánchez, J. A., Gallastegui, G., González-Menéndez, L. y Mancebo Mancebo M. (2019). *Vocabulario de Rocas, Sedimentos y Formaciones Superficiales*. IGME, Madrid. 162 p.

Martín-Serrano, A., Salazar, A., Nozal, F. y Suárez, A. (2004). *Mapa Geomorfológico de España a escala 1:50.000. Guía para su elaboración*. IGME, Madrid. 128 p.

Ediacaran ophiolites from the SW Iberian Massif

Ofiolitas ediacáricas del SW del Macizo Ibérico

R. Arenas[1], R. Díez Fernández[2], I. Novo-Fernández[3], R. Albert[4], E. Rojo-Pérez[1], S. Sánchez Martínez[1], N. Pujol-Solà[3], J.M. Fuenlabrada[5], C. Vérard[6], A. Gerdes[4], A. Garcia-Casco[3]

1- Dpto. de Mineralogía y Petrología and Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. rarenas@ucm.es; e.rojo@ucm.es; s.sanchez@geo.ucm.es
2- Dpto. de Geología y Subsuelo, CN-IGME-CSIC, Unidad Territorial de Salamanca, 37001 Salamanca, Spain. r.diez@igme.es
3- Dpto. de Mineralogía y Petrología and Inst. And. Ciencias Tierra (UGR, CSIC), Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. inovo@ugr.es; npujolsola@ugr.es; agcasco@ugr.es
4- Frankfurt Isotope and Element Research Center, Goethe University Frankfurt, 60438 Frankfurt, Germany. richardalbert@fierce.uni-frankfur; gerdes@fierce.uni-frankfurt.de
5- Unidad de Geocronología (CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. jmfuenla@ucm.es
6- Department of Earth Sciences, University of Geneva, 1211 Genèva 4, Switzerland. christian.verard@unige.ch

Abstract: The Cadomian basement of the SW Iberian Massif contains several mafic – ultramafic units of ophiolitic nature. The Calzadilla Ophiolite and the Mérida Ophiolite have protoliths formed at c. 602 Ma and c. 594 Ma, respectively. The composition of their mafic rocks allows them to be interpreted as supra-subduction zone ophiolites, generated during the initial opening of a fore-arc basin (Calzadilla) and the later generation of a back-arc basin (Mérida), both basins subsequently closed during the cycle of convergence and collision that took place between c. 590-540 Ma. The available data on these ophiolites suggest that extensive oceanic domains, not considered before, could have participated in the Cadomian dynamics. Cadomia could for some time constitute a far traveled microcontinental domain separated from Gondwana.

Key words: Cadomian ophiolites, Cadomia, Ossa – Morena Complex, SW Iberia.

Resumen: *El basamento cadomiense del SW del Macizo Ibérico contiene varias unidades máficas – ultramáficas de naturaleza ofiolítica. La Ofiolita de Calzadilla y la Ofiolita de Mérida tienen protolitos formados a c. 602 Ma y 594 Ma, respectivamente. La composición de sus rocas máficas permiten interpretarlas como ofiolitas de zona de supra-subducción, generadas durante la apertura inicial de una cuenca de fore-arc (Calzadilla) y otra posterior de back-arc (Mérida), eliminadas posteriormente durante un ciclo de convergencia y colisión que tuvo lugar entre c. 590-540 Ma. Los datos existentes sobre estas ofiolitas sugieren que en la dinámica cadomiense pudieron participar dominios oceánicos extensos, no considerados hasta ahora. Cadomia pudo constituir durante un tiempo un dominio microcontinental separado de Gondwana.*

Palabras Clave*: Ofiolitas cadomienses, Cadomia, Ossa – Morena Complex, SW Iberia.*

INTRODUCTION

A key characteristic of the Iberian Massif is the presence of a Pan-African basement, which is also recognized at the scale of the whole Variscan Orogen. This basement is designed in Europe as Cadomian basement or Cadomian orogeny (D`Lemos et al. 1990). The nature of this orogeny has long been enigmatic, since it cannot be attributed to the convergence and collision of large continental regions, not identified to date all along Europe. The Ediacaran dynamics of the African Gondwana margin have rather been related to the construction and dismantling of long-lived volcanic arcs, to the characteristics of associated subduction, and to the eventual opening and closing of fore-arc and back-arc basins (Rojo-Pérez et al., 2022 and references therein).

The Cadomian basement of the Iberian Massif has been identified in all its geotectonic zones, as well as in the Pyrenees, where it appears below unconformable Early Cambrian series. In general, the Cadomian units are formed by siliciclastic series that are intruded by a diversity of igneous rocks where granitic compositions dominate. It is considered that these units were generated in an active peri-Gondwanan volcanic arc (Rojo-Pérez et al., 2023 and references therein). In the Ossa-Morena Complex, in the SW Iberian Massif, the Cadomian basement shows a greater development and less intense Variscan overprinting. In this region, several mafic – ultramafic units have been recently interpreted as ophiolites (Arenas et al., 2018, 2024, In press; Díez Fernández et al., 2019, 2022). These ophiolites allow substantial advance in the knowledge of the Cadomian dynamics and the associated oceanic domains. Their existence have been completely unnoticed to date.

Similar ophiolitic units have not been described in any other region forming part of the Cadomian basement of Europe, but their identification is a priority in order to establish the appropiate correlations with those discovered in the Iberian Massif.

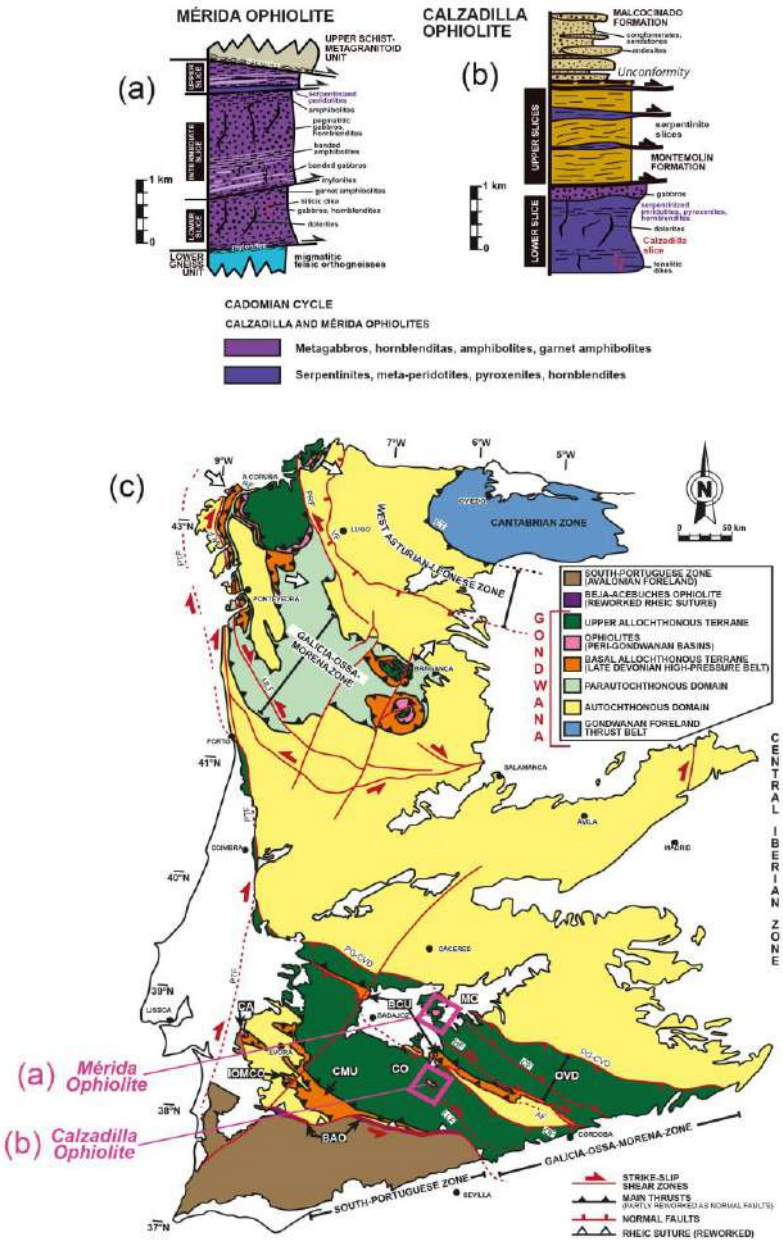


FIGURA 1. *Schematic columns of the Mérida (a) and Calzadilla (b) ophiolites and their location in a general map of the Iberian Masif (c). Modified after Arenas et al. (2018, 2024) and Díez Fernández et al. (2019, 2022).*

EDIACARAN OPHIOLITES IN THE OSSA-MORENA COMPLEX

Two Ediacaran ophiolites of the Ossa-Morena Complex have been investigated in detail, the Calzadilla Ophiolite and the Mérida Ophiolite (Fig. 1). The first one is located in a more external position in the paleomargin of Gondwana, thrusted above the Serie Negra Group of Ediacaran age (Díez Fernández et al., 2019), while the second one crops out in the Obejo – Valsequillo Domain, a transitional domain towards the Central Iberian Zone, and is part of a thick stacked sequence, being located below the Serie Negra (Díez Fernández et al., 2022).

The main section of the Calzadilla Ophiolite has a thickness of c. 1200 m and is mainly made up of antigoritites, with a layer of metagabbros in the upper part of the section and scarce hornblendites, dolerites and plagioclase-amphibole pegmatoids. Bodies of podiform

chromitites located near the contact between the serpentinites and the metagabbros are frequent, suggesting that this contact represents the original paleo-Moho. The upper part of the ophiolite consists of an imbricate of serpentinites and the Serie Negra (Montemolín Formation). The composition of the metagabbros is characterized by extremely low REE and HFSE contents, typical of boninitic magmas generally formed in fore-arc settings after partial melting of highly depleted harzburgites (Fig. 2; Arenas et al., 2018, In press). On the other hand, the protoliths of the metagabbros have been dated at c. 602 Ma (U-Pb in zircons; SHRIMP), while a minor population of zircons at c. 540 Ma may date the main tectonothermal event affecting the ophiolite, eventually its obduction above the Serie Negra under metamorphic conditions characteristic of the low-temperature amphibolite facies (Arenas et al., 2018; Díez Fernández et al., 2019).

The Mérida Ophiolite has a maximum thickness of c. 3000 m and is made up of three main slices repeating a lithospheric section formed by metagabbros and serpentinites, although the ultramafic rocks appear as very thin discontinuous layers. Amphibolites are also common, locally with large garnets, and dolerites and hornblendites are scarcer. All ophiolite lithologies show ductile deformation and a composite regional foliation. Metamorphism has general conditions typical of the amphibolite facies, but in some levels garnet-bearing amphibolites with limited migmatization developed. These are interpreted as over-heated gabbroic levels located under thrust mantle sections. The compositional characteristics of the mafic rocks clearly correspond to types generated in a supra-subduction zone setting, probably in a peri-Gondwanan back-arc basin (Fig. 2; Arenas et al., 2024, In press). Furthermore, Nd model ages in the range 548-960 Ma indicate that these are juvenile mafic rocks, since these ages are close to the protoliths age (Arenas et al., 2024). One of the least deformed gabbros contains a zircon population that have provided a consistent age of c. 594-595 Ma (U-Pb; LA-ICP-MS; Arenas et al., 2024). This data is interpreted as the age of the gabbroic protoliths. On the other hand, the thermodynamic modeling of the mineral assemblage characteristic of the garnet bearing amphibolites (Qz-Plg-Grt-Prg-Ilm), suggests that it has formed at conditions of c. 700 °C and 8 kbar, consistent with an intermediate pressure gradient. The metamorphic peak reached the vicinity of the hydrated solidus of metabasalt. This metamorphic gradient is characteristic of subduction onset of oceanic plates, and in this case was possibly related to the accretion of the ophiolite under the peri-Gondwanan volcanic arc. One of the larger garnets of the amphibolites with a weak compositional zoning, has been dated using U-Pb geochronology (LA-ICP-MS). The consistent age obtained at c. 590 Ma (Arenas et al., 2024) is the oldest age obtained in the Iberian Massif for a tectonothermal event (see Arenas et al., in this same volume)

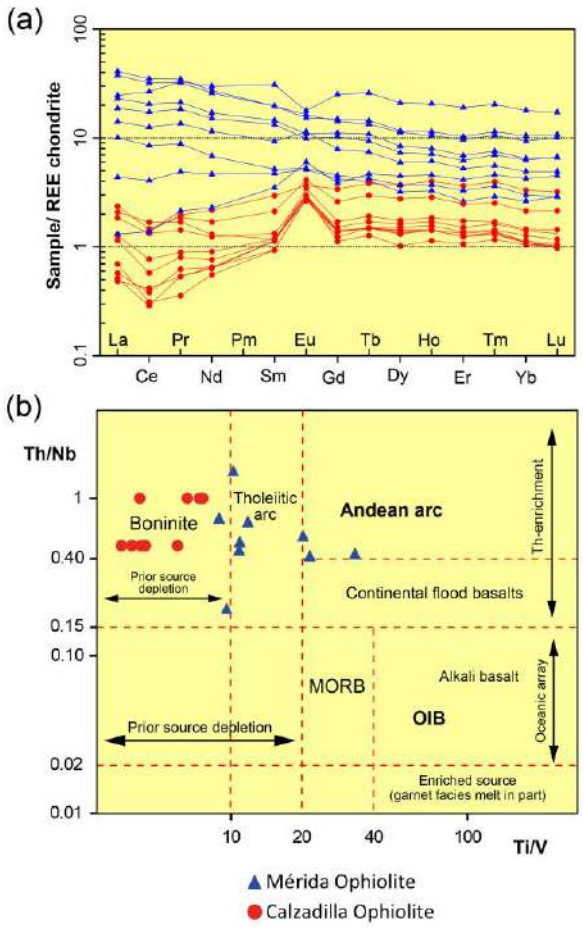


FIGURA 2. Geochemical data of the Mérida and Calzadilla ophiolites (mafic rocks). (a) Chondrite-normalized rare earth element (REE) plots. (b) Ti/V–Th/Nb tectonic setting discrimination diagram (Shervais, 2022).

DISCUSSION

The discovery of Ediacaran ophiolites in the SW Iberian Massif allows substantial advances in the knowledge of Cadomian dynamics. The petrological and geochemical characteristics of these ophiolites, their age and structural relationships, indicate that the Calzadilla Ophiolite was the first to form in a fore-arc basin at c. 602 Ma (Fig. 3). The Mérida Ophiolite is somewhat younger (c. 594-595 Ma) and its origin is related to the opening of a peri-Gondwanan back-arc basin (Fig. 3). Data on the tectonothermal evolution of these ophiolites are still scarce, but they suggest that the closure of the back-arc basin and the accretion of the Mérida Ophiolite under the volcanic arc took place first (c. 590 Ma; Arenas et al., 2024; Fig. 3). Later, the Calzadilla Ophiolite was obducted above the sedimentary and magmatic sequences of the volcanic arc represented by the Serie Negra Group (c. 540; Arenas et al., 2018; Díez Fernández et al., 2019; Fig. 3). On the other hand, a Plate Tectonics model developed for the Ediacaran – Early Cambrian transition indicates that the involved oceanic domains could have been extensive and that Cadomia could constitute for a time a continental domain rifted from Gondwana (Fig. 3; Arenas et al., In press).

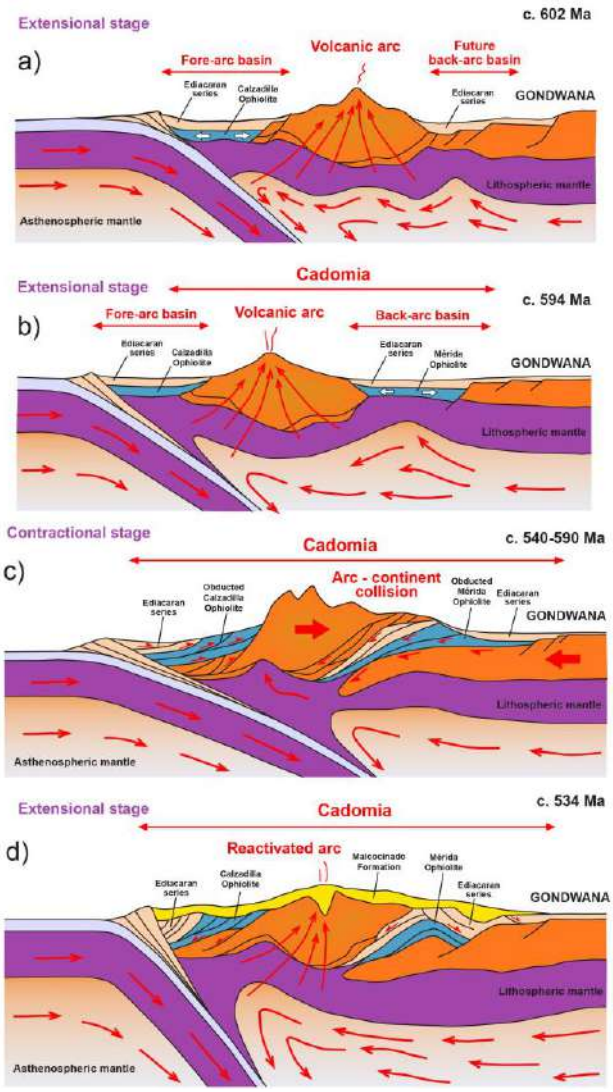


FIGURA 3. Geodynamic model suggested for the generation of the Calzadilla and Mérida ophiolites and the evolution of the NW African margin of Gondwana during the interval 600–534 Ma. After Arenas et al. (2024, In press).

ACKNOWLEDGMENTS

Financial support has been provided by the Spanish projects PID2020-112489-GB-C21 and PID2020-112489-GBC22, funded by MCIN/AEI. Richard Albert and Axel Gerdes acknowledge the financial support to FIERCE (Frankfurt Isotope & Element Research Center) by the Wilhelm and Else Heraeus Foundation and the Deutsche Forschungsgemeinschaft.

REFERENCES

Arenas, R., Fernández-Suárez, J., Montero, P., Díez Fernández, R., Andonaegui, P., Sánchez Martínez, S., Albert, R., Fuenlabrada, J.M., Matas, J., Martín Parra, L.M., Rubio Pascual, F.J., Jiménez-Díaz, A. and Pereira, M.F. (2018): The Calzadilla Ophiolite (SW Iberia) and the Ediacaran fore-arc evolution of the African margin of Gondwana. *Gondwana Research*, 58, 71-86.

Arenas, R., Rojo-Pérez, E., Díez Fernández, R., Albert, R., Novo-Fernández, I., Sánchez Martínez, S., Fuenlabrada, J.M., Andonaegui, P., Moreno-Martín, D., Gerdes, A. and Garcia-Casco. A. (2024): Opening and closure of Cadomian peri-Gondwanan oceans: age and evolution of the Mérida Ophiolite (SW Iberia). *International Geology Review*, 66, 278-309.

Arenas, R., Vérard, C., Albert, R., Rojo-Pérez, E., Sánchez Martínez, S., Novo-Fernández, I., Moreno-Martín, D., Gerdes, A., García-Casco, A. and Díez Fernández, R. (In press): Cadomia origins: paired Ediacaran ophiolites from the Iberian Massif, the opening and closure record of peri-Gondwanan basins. In: *Supercontinents, Orogenesis and Magmatism* (R.D. Nance, R.A. Strachan, C. Quesada and S. Lin, eds.). *Geological Society, London, Special Publications*, 542. https://doi.org/ 10.1144/SP542-2022-328

Arenas, R., Albert, R., Gerdes, A., Novo-Fernández, I., Rojo-Pérez, E., Sánchez Martínez, S., Garcia-Casco, A., Moreno-Martín, D. and Díez Fernández R. (In press, 2024): U-Pb dating of garnet (LA-ICP-MS), reveals the oldest tectonothermal event in the Iberian Massif. *Geotemas, this volume*.

D'Lemos, R.S., Strachan, R.A. and Topley, C.G. (1990): The Cadomian orogeny in the North Armorican Massif: a brief review. In: *The Cadomian Orogeny* (R.S. D'Lemos, R.A. Strachan and C.G. Topley, eds.). *Geological Society, London, Special Publications*, 51, 3-12.

Díez Fernández, R., Jiménez-Díaz, A., Arenas, R., Pereira, M.F. and Fernández-Suárez, J. (2019): ediacaran obduction of a fore-arc ophiolite in SW Iberia: A turning point in the evolving geodynamic setting of peri.Gondwana. *Tectonics*, 38, 95-119.

Díez Fernández, R., Arenas, R., Rojo-Pérez, E., Sánchez Martínez, S. and Fuenlabrada, J.M. (2022): Tectonostratigraphy of the Mérida Massif reveals a new Cadomian suture zone exposure in Gondwana (SW Iberia). *International Geology Review*, 64, 405-424.

Rojo-Pérez, E., Linnemann, U., Hofmann, M., Fuenlabrada, J.M., Zieger, J., Fernández-Suárez, J., Andonaegui, P., Sánchez Martínez, S., Díez Fernández, R., and Arenas, R. (2022): U-Pb geochronology and isotopic geochemistry of adakites and related magmas in the well-preserved Ediacaran arc section of the SW Iberian Massif: the role of subduction erosion cycles in peri-Gondwanan arcs. *Gondwana Research*, 109, 89-112.

Rojo-Pérez, E., Druguet, E., Casas, J.M., Proenza, J.M., Fuenlabrada, J.M., Sánchez Martínez, S., García Casco, A. and Arenas, R. (2023): Geochemistry of metasedimentary rocks from the Eastern Pyrenees (Iberian Peninsula): Implications for correlation of Ediacaran terranes along the Gondwanan margin. *Precambrian Research*, 397, 107186.

Shervais, J.W. (2022): The petrogenesis of modern and ophiolitic lavas reconsidered: Ti–V and Nb–Th. *Geoscience Frontiers*, 13, 101319.

El volcanismo del Plateau Oceánico Caribeño-Colombiano (CLIP) y su impacto paleoambiental durante los eventos OAE3 (Coniaciense-Santoniense): correlación directa mediante biocronología de radiolarios

The Caribbean-Colombian Oceanic Plateau (CLIP) volcanism and its paleoclimatic impact during the OAE3 event (Coniacian-Santonian): direct radiolarian biochronologic correlation

P. O. Baumgartner[1], J. Escuder-Viruete[2], G. Andjić[1], C. Baumgartner-Mora[1]

1 Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne. Switzerland (peter.baumgartner@unil.ch; goran.andjic@unil.ch; Claudia.baumgartner@unil.ch)
2 Instituto Geológico y Minero España, CSIC, C. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. España (j.escuder@igme.es)

Resumen: El vulcanismo del Plateau Oceánico Caribeño-Colombiano (o CLIP), ha sido considerado como la causa principal del evento paleoclimático del límite Cenomaniense/Turoniense (CTBE~94 Ma), o Evento Anóxico Oceánico 2 (OAE2). Sin embargo, la fase principal del CLIP es más joven (92-87 Ma) y no contribuyo significativamente a la crisis climática del CTBE. El trabajo biocronológico mediante radiolarios de las últimas décadas nos permite una correlación directa entre los sedimentos asociados a los basaltos del CLIP, con secciones pelágicas bien calibradas del Coniaciense-Santoniense (C-S, OAE3, 89,8-83,6 Ma) de la región mediterránea. Radiolaritas negras datadas del C-S son interestratificadas o suprayacentes a los basaltos de la fase principal del CLIP (edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ de 92-83 Ma) en el Complejo de Nicoya (Costa Rica) y en el Plateau de Azuero (CLIP en Panamá). Sedimentos vulcano-pelágicos, con materia orgánica (OAE3), descansan sobre los basaltos del Terreno de Manzanillo (CLIP al sur de Nicoya) y en el Grupo Tireo (República Dominicana). Mientras la presencia de materia orgánica es limitada a zonas de alta paleofertilidad, el C-S es una época de paleoclima global cálido que favoreció la alteración química terrestre y el secuestro sedimentario periódico de sílice, como consecuencia del vulcanismo CLIP y de otras largas provincias ígneas.

Palabras clave: Correlación CLIP-OAE3, radiolarios, Coniaciense-Santoniense

Abstract: *The Caribbean-Colombian Plateau (or CLIP), among other LIPs, has classically been regarded as the principal cause of the late Cenomanian/Turonian Boundary climatic Event (CTBE ~94 Ma), or Oceanic Anoxic event 2 (OAE2). However, the main CLIP phase (92–87 Ma) is too young to have significantly contributed to the climate crisis of the CTBE. Radiolarian biochronological work of the last two decades allows us to correlate radiolarian-bearing sediments interbedded with or directly overlying basalts and intrusives of the CLIP with well-calibrated pelagic sections of the Coniacian–Santonian (OAE3, 89.8 – 83.6 Ma) in the Mediterranean region. Red and black, organic-rich radiolarites dated as Coniacian-Santonian are interbedded with and/or directly overlying basalts of the CLIP phase (Ar/Ar ages of 92-83 Ma) of the Nicoya Complex (Costa Rica) and in the Azuero Plateau (Panama). Radiolarian-dated volcano-pelagic, often organic-rich strata directly overlie CLIP-related basalts in the Manzanillo Terrane (S-Nicoya Peninsula) and in the Tireo Group (Dominican Republic). While the presence of organic matter is restricted to areas of high paleofertility, the Coniacian-Santonian is recognised by us as a period of hot paleoclimate resulting in globally enhanced terrestrial chemical weathering and punctuated silica sequestration in sediments, because of volcanism of the CLIP and other LIPs.*

Key words: *Correlation CLIP-OAE3, radiolarians, Coniacian-Santonian.*

Introduccion

El Plateau Oceánico Caribeño-Colombiano, o "Caribbean Large Igneous Province" (CLIP, Figura 1), entre otras "Large Igneous Provinces" (LIPs), ha sido clásicamente considerado como la causa principal del evento paleoclimático del límite Cenomaniense/ Turoniense (CTBE), o Evento Anóxico Oceánico 2 (OAE2). El OAE2 ha sido caracterizado mediante edades $^{206}Pb/^{238}U$ en zircones individuales entre 94,43 ± 0,14 Ma y 93,92 ± 0,11 Ma en el grupo Yezo de Japón. Sin embargo, la fase principal del CLIP, datada por muchos autores entre 92,0 ± 9,6 y 87,9 ± 4,2 Ma es demasiado joven para haber contribuido significativamente a la crisis climática de CTBE. La reciente compilación (Figura 2) de las edades del CLIP y otros LIPs (Jiang et al. 2023) muestra una contemporaneidad con el OAE2, pero también establece abundantes edades más jóvenes que el OAE2 coincidiendo con el Coniaciense-Santoniense (C-S). La Figura 2 muestra como los picos de edad definidos por las curvas de densidad de probabilidad de Jiang et al (2023) son contemporáneos con picos de la curva $\partial^{13}C$ de referencia de Jarvis et al. (2006). La formación de

varios LIPs parece haber contribuido al aumento excepcional del $\partial^{13}C$ en el OAE2, como es el caso del vulcanismo del Plateau de Ontong-Java. Por otro lado, la formación del LIP del Ártico Alto (curva azul en la Figura 2) contribuyó a un calentamiento global rápido en el OAE2 debido a la liberación de grandes cantidades de metano. En el Complejo de Nicoya *s.s.* de Costa Rica, las edades geocronológicas más antiguas entre 139 y 111 Ma se correlacionan con las edades biocrolológicas de radiolarios del Berriasiense/ Valanginiense - Albiense en radiolaritas manganíferas, las cuales son distintas de las radiolaritas hematíticas de la fase principal del CLIP (Baumgartner et al. 2008). Esto indica que Complejo de Nicoya *s.s.* constituye un fragmento de un plateau pacífico de edad Cretácico Inferior tectónicamente imbricado con la fase volcánica principal del CLIP.

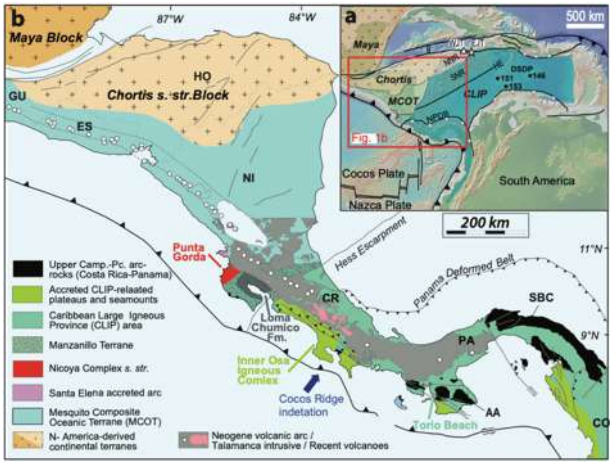


FIGURA 1 (a) Mapa del Caribe con la extensión del CLIP y los sitios DSDP. (b) Mapa de los basamentos principales de América Central con las localidades mencionadas en el texto.

En base a la biocronología de radiolarios realizada durante los últimos 20 años, el objetivo de este trabajo es demonstrar que los sedimentos radiolaríticos y vulcano-pelágicos con materia orgánica asociados a los basaltos del CLIP en América Central y el Caribe se correlacionan con secciones pelágicas bien calibradas del C-S, (OAE3; 89,8-83,6 Ma) en el mediterráneo.

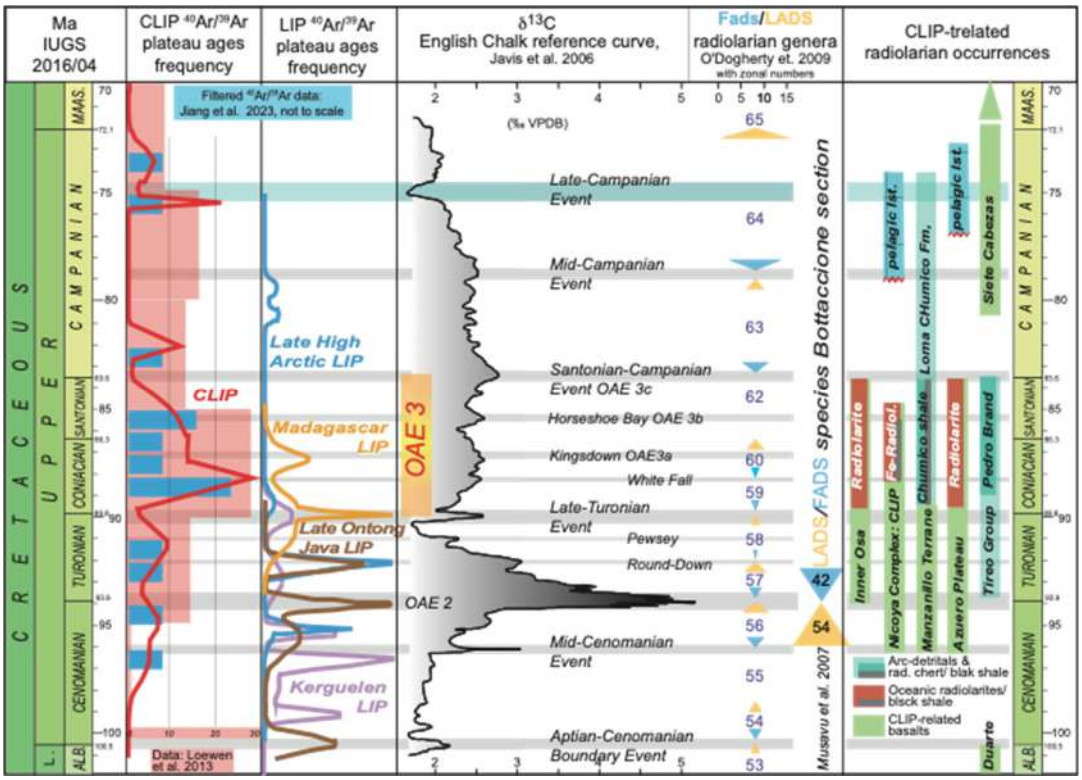


FIGURA 2 Cronoestratigrafía del Cretácico Superior con la estratigrafía de los isotopos de carbono de referencia en el *English Chalk* (Jarvis et al. 2006). CLIP y otros LIPs: Curvas de densidad probabilística de edades filtradas de erupciones (Jiang et al. 2023). Datos de primera y última aparición (FADS/LADS) de géneros de radiolarios. FADS/LADS de especies, sección de Bottacione (Gubbio, Umbria). Duración y litologías de radiolaritas relacionadas con el CLIP.

Sedimentos silíceos con materia orgánica del C-S (OAE3) asociados al CLIP

Complejo de Nicoya sensu stricto. En Punta Gorda (Costa Rica; Fig. 1) unos 10 m de radiolaritas verdes y grises interestratificadas con arcillas negras del OAE3 están en contacto con una colada basáltica del CLIP con desarrollo de un borde oscuro de enfriamiento rápido (Fig. 3). Los basaltos han proporcionado edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ entre 92,5 ± 5,4 y 88,0 ± 0,7 Ma (Turoniense medio a Coniaciense medio), a diferencia de las edades de diques máficos intrusivos de 83,8 ± 1,1 y 83,2 ± 1,3 Ma (Santoniense/Campaniense). La asociación de los radiolarios *Eostrichomitra perapedhia* y *Hemicrypto-capsa polyedra,* junto a *Alievum gallowayi, A. para-egallowayi,* y *Pseudodictyomitra nakasekoi* indica un

rango de edad Coniaciense-Santoniense basal (Fig. 4), es decir la del OAE3.

Asociaciones de radiolarios muy similares han sido descritas en radiolaritas intercaladas en basaltos de plateau en la Peninsula de Osa (Costa Rica), en el "Inner Osa Igneous Complex" y la Unidad Ganado, así como también en el Plateau de Azuero de Playa Torio en Panamá (Figs. 1, 2).



FIGURA 3. Radiolaritas verde-grises interestratificadas con arcillas negras del OAE3 en contacto con una colada basáltica del CLIP mostrando el desarrollo de un borde oscuro de enfriamiento rápido.

Formación Loma Chumico. La formación aflora en el sur de la Península de Nicoya y en el Bajo Tempisque de Costa Rica (Figs. 1, 2), habiendo sido datada como Coniaciense-Campaniense inferior (Andjic et al. 2019). Se dispone directamente sobre un basamento de tipo CLIP del Terreno Manzanillo, datado por $^{40}Ar/^{39}Ar$ en 96-89 Ma. La formación incluye un Miembro Berrugate vulcano-pelágico superior, cuyas intercalaciones silíceas han proporcionado una edad C-S. El Miembro Esquistos Loma Chumico inferior que reposa en contacto sedimentario sobre basaltos del CLIP, contiene un promedio de 15% de materia orgánica total, y se relaciona con el OAE3 (Andic et al. 2019, Mansour y Wargreich (2022). La presencia de los radiolarios *Pseudoaulophacus putahensis, Pseudodicyomitra crassa* y *Crucella plana* restringen la edad al Coniacience-Santoniense basal (Fig, 3).

Posibles equivalentes de la Formacion Loma Chumico, estudiadas por su potencial de roca madre petrolífero, se encuentran en las perforaciones DSDP 146, 151 y 153, situadas en el Beata Ridge y en las cuencas orientales de1 Caribe (Fig. 1), donde se perforaron capas ricas en radiolarios y materia orgánica asociadas a coladas de basalto del techo del CLIP. Estos basaltos han dado edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ de 92,1 ± 4,7 y 90.6 ± 3.2 (Turoniense). Estas edades coinciden con las obtenidas entre 92,4 y 76,9 Ma para las rocas ígneas dragadas en la Cresta de Beata. Los radiolarios no han sido estudiados, pero los foraminíferos planctónicos presentes en areniscas superpuestas a basaltos del CLIP, definen la zona *Marginotruncana schneegansi* de edad Turoniense superior.

Grupo Tireo. En la República Dominicana, los radiolarios presentes en la parte alta del Grupo Tireo (sección de Pedro Brand) se sitúan estratigráficamente entre el Complejo Duarte (fase CLIP del Cretácico inferior) y la Formación Siete Cabezas (fase CLIP del Campaniense). Hemos atribuido una edad de Turoniense-Coniaciense a estos radiolarios, basado en una correlación con una muestra de los Deva Beds en Romania (DV54 atribuida al Coniaciense. Sin embargo, la re-evaluación del rango de edad del foraminífero planctónico *Costillagerina pilula* en las Capas de Deva de Rumanía establece una edad Coniaciense terminal-Santoniense. Considerando su asociación con los radiolarios *Eostichomitra perapethia* y *Hemicryptocapsa polyedra* junto con *Alievum gallowayi*, la sección de Pedro Brand es de edad Coniaciense-Santoniense basal (Fig. 4).

Correlación de series del C-S asociadas al CLIP con series de la región mediterránea

Entre las secciones del Cretácico superior de la región mediterránea, la serie de Gubbio (Umbría, Italia) es la mejor estudiada debido a que permite la correlación entre foraminíferos planctónicos, nanofósiles, magneto-estratigrafia y estratigrafía isotópica de C con la sección de referencia del *English Chalk* (Jarvis et al. 2006). Sin embargo, los radiolarios en Gubbio están preservados moderadamente y ocurren solo en niveles esporádicos en el intervalo Turoniense-Santoniense. Los rangos compilados en la Fig. 4 se basan en secciones calibradas de Grecia, Crimea, Romania y Turquía, así como nuestros datos obtenidos en las perforaciones del DSDP-ODP.

Alteración química terrestre y secuestro sedimentario de la sílice amplificado globalmente

El registro sedimentario del C-S está marcado por eventos de secuestro de la sílice biogénica en forma de capas silíceas, espongiolitas o radiolaritas, tanto en facies sedimentarias pelágicas de la plataforma continental (*English Chalk*), como en las de fondos oceánicos, así como también en facies detríticas peri-orogénicas como las Capas de Deva.

Jarvis et al. (2006) demostraron una fuerte correlación entre pequeños picos positivos de la curva $\partial^{13}C$ y los niveles silíceos en la *English Chalk*. Hemos observado un aumento de capas silíceas con radiolarios coincidiendo con los picos positivos de $\partial^{13}C$ en la sección de Gubbio.

Al contrario de eventos anóxicos del Cretácico con secuestro de materia orgánica a nivel global, el periodo C-S presenta varios sub-eventos (OAE3a, 3b, 3c, Figura 4; Mansour y Wagreich (2022) con secuestro de materia orgánica limitado a la región atlántica y alrededores, la región del CLIP y otras zonas de alta paleofertilidad. Sin embargo, las pequeñas excursiones positivas del $\partial^{13}C$ observadas en la *English Chalk* por Jarvis et al. (2006) parecen ser correlacionables globalmente, así como los eventos de secuestro silíceo.

Interpretaciones paleoambientales del C-S

El C-S representa globalmente un periodo con valores de $\partial^{18}O$ negativos, los cuales aumentan después del mínimo del CTBE. Esto se interpreta como una época de paleoclima caliente y húmedo ("*hot-house"*),

que progresivamente se enfría hacia el C-S. La compilación de Mansour y Wagreich (2022) demuestra valores bajos ($\partial^{18}O$ ~ -4.25‰) durante el Coniaciense, con un extremo negativo en el límite C-S y un aumento rápido de casi 1‰ para el Santoniense, interpretándose como una tendencia de enfriamiento que se continua durante el Campaniense.

Durante el C-S, el océano estuvo dominado por el secuestro sedimentario de carbonatos (nanofosiles y foraminíferos planctónicos), lo que no permitió grandes variaciones de los valores de $\partial^{13}C$. Con el aumento del pCO_2 atmosférico ocasionado por las abundantes erupciones volcánicas en el CLIP y en otras LIPs,

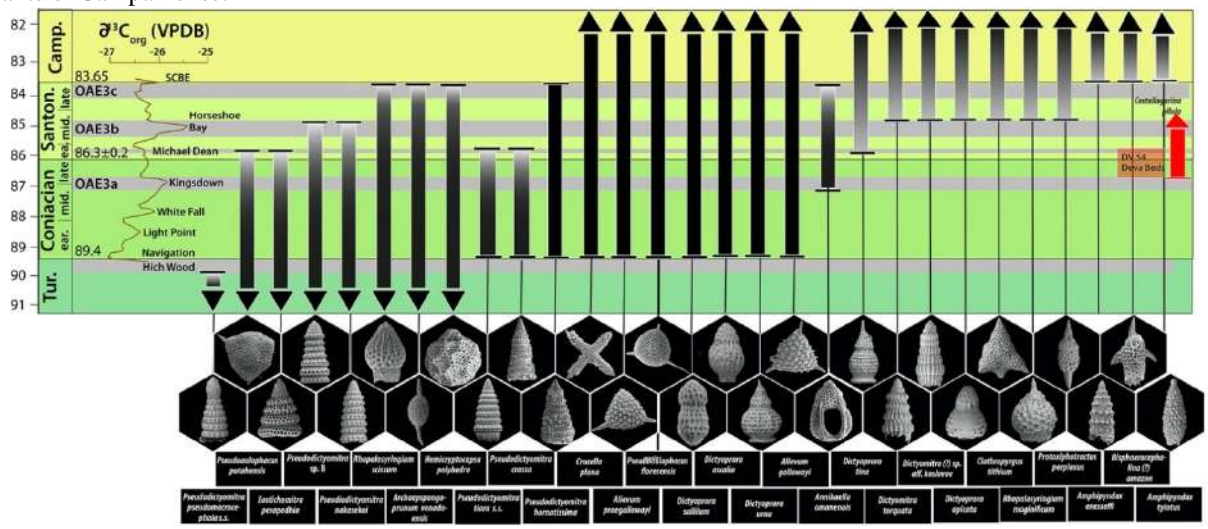


FIGURA 4 Cronoestratigrafía del Coniaciense-Santoniense con los principales eventos de $\partial^{13}C$ globalmente reconocidos y los sub-eventos del OAE3 (según Mansour y Wagreich (2022) y los rangos tentativos de especies seleccionadas de radiolarios. La primera aparición del foraminífero *Costellagerina pilula* determina los rangos de muchas especies presentes en la muestra DV54 (Capas de Deva, Romania).

aumentó la temperatura global, las precipitaciones y la escorrentía hídrica, El aumento del pCO_2 causo también el descenso del pH en el agua oceánica.

En contraste con otras OAEs, el pCO_2 no aumentó tanto, ya que estaba controlado por la abundante sedimentación carbonatada y la alteración terrestre de los silicatos. El aumento del aporte fluvial de nutrientes y de dSi (sílice disuelta) al océano fomentó la producción de la sílice biogénica (esponjas, radiolarios, diatomeas) y con ella el secuestro de materia orgánica marina. Por otra parte, la acidificación oceánica disminuyó la solubilidad de la sílice biogénica en las aguas superficiales y aumentó el flujo descendente de sílice particulada, resultando en menos dSi en las aguas superficiales. Este proceso finalmente redujo la producción de sílice biogénica mediante la eliminación de especies oportunistas. El ciclo se terminó con un descenso del secuestro de la materia orgánica, un nuevo dominio de la fábrica de carbonatos y, como consecuencia, terminó la excursión positiva del $\partial^{13}C$.

Conclusiones

- Las dataciones $^{40}Ar/^{39}Ar$ de la fase principal del CLIP (92-87 Ma) postdatan la crisis del límite Cenomaniense/Turoniense (OA2 ~94 Ma) y se ajustan mejor con el C-S (OAE3, 89.8 – 83.6 Ma).
- Las radiolaritas con materia orgánica del CLIP produjeron radiolarios del C-S (OAE3) y permiten la correlación con secciones del C-S bien calibradas mediante bio- magneto- y quimio-estratigrafía.
- Sedimentos hemipelágicos ricos en materia orgánica, testigos del OAE3, se superponen estratigráficamente sobre los basaltos del CLIP y tienen una edad C-S.
- La época del C-S estuvo marcada por varios eventos globales y cíclicos de secuestro sedimentario de sílice biogénica en un paleoclima caliente, que se fue enfriando por la reducción del pCO_2 como consecuencia de la alteración química terrestre y del dominio de la sedimentación oceánica de carbonatos.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por los proyectos SNF (Suiza) No.ß 200021_185067/2, y SNF 200020-162670.

Referencias

Andjić, G., Baumgartner, P.O., Baumgartner-Mora, C. (2019): Collision of the Caribbean Large Igneous Province with the Americas: earliest evidence from the forearc of Costa Rica. *Geol. Soc. Am. Bull.* 131 (9-10): 1555–1580

Baumgartner, P. O., Flores, K., Bandini, A. N., Girault, F. y Cruz, D. (2008): Late Triassic to Cretaceous Radiolaria from Nicaragua and Northern Costa Rica The Mesquito Oceanic Terrane. *Ofioliti*, 33, 1-19.

Jarvis, I, Gale, A., Jenkyns, H., Pearce, M. (2006): Secular variation in Late Cretaceous carbon isotopes: a new δ13C carbonate reference curve for the Cenomanian–Campanian (99.6–70.6Ma). *Geological Magazine* 143(5):561-608.

Mansour, A., Wagreich, X. (2022): Earth system changes during the cooling greenhouse phase of the Late Cretaceous: Coniacian-Santonian OAE3 subevents and fundamental variations in organic carbon deposition, Earth-Science Reviews 229, 104022.

Clinopiroxeno neoformado en bloques de serpentinitas de canal de subducción, mélange de La Corea (Cuba oriental)

Neoformed clinopyroxene in blocks of subduction channel serpentinites, La Corea mélange (eastern Cuba)

I.F. Blanco-Quintero[1], J.A. Proenza[2], J. Cárdenas-Párraga[3], A. García-Casco[4]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig, España. if.blanco@ua.es
2 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, España. japroenza@ub.edu
3 Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. jcardenas_1@ugr.es
4 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, e Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR, 18100, Armilla, España. agcasco@ugr.es

Palabras clave: clinopiroxeno, serpentinita, mélange, canal de subducción.

Resumen

La mélange de La Corea (Cuba oriental) se localiza en la base de la ofiolita Mayarí-Cristal y contiene bloques de alta presión en una matriz serpentinítica y por tanto relacionada con la subducción. Las rocas ultramáficas presentes en la mélange se dividen en dos grupos: antigoritas (matriz de la mélange) y bloques tectónicos de serpentinita con textura porfiroblástica/clástica, compuestos de mezclas de antigorita y lizardita y porfiroblastos/clastos de clinopiroxeno diopsídico y ortopiroxeno (bastitizado). En los bloques aparecen cristales de clinopiroxeno rodeando parcialmente a los porfiroblastos/clastos y como pequeños granos en la matriz. Los grandes cristales tienen contenidos de Si en el rango de 1.96 a 1.98 apfu (átomos por unidad de fórmula, 6 oxígenos), Ca = 0.95 a 1.01 apfu, Mg = 0.96 a 1.03 apfu y muy bajos Al (<0.04 apfu) y Na (<0.03 apfu). Por otro lado, el clinopiroxeno neoformado tiene contenidos de Si más bajos en el rango de 1.88 a 1.90 apfu, Ca = 0.79 a 0.83 apfu, Mg = 0.81 a 0.86 apfu y concentraciones claramente más altas en Al (0.23 a 0.26 apfu) y Na (0.11–0.12 apfu). Estos clinopiroxenos secundarios pueden haberse formado por fluidos a alta presión que se infiltraron en la mélange en el canal de subducción, posiblemente relacionados con los fluidos que formaron depósitos de jadeíta (descritas en la vecina mélange Sierra del Convento) o venas de tremolita-actinolita (presentes en las mélanges de La Corea y Sierra del Convento).

Abstract

The subduction-related La Corea mélange (eastern Cuba), located at the base of the large tabular Mayarí-Cristal ophiolite, contains high pressure blocks in a serpentinite matrix. The ultramafic rocks in the mélange are divided in two groups, antigoritites (matrix of the mélange) and tectonic blocks of serpentinite composed of a mixture of antigorite and lizardite with distinctive porphyroblastic/clastic fabric defined by deformed diopside clinopyroxene and (bastitized) orthopyroxene. In the blocks, neoformed clinopyroxene appears partially surrounding the porphyroblasts/clasts and as fine-grains in the matrix. The porphyroblasts/clasts have Si contents in the range 1.96–1.98 apfu (atoms per formula unit, 6 oxygens), Ca = 0.95–1.01 apfu, Mg = 0.96–1.03 apfu, and very low Al (<0.04 apfu) and Na (<0.03 apfu). On the other hand, the neoformed clinopyroxene has lower Si contents in the range 1.88–1.90 apfu, Ca = 0.79-0.83 apfu, Mg = 0.81–0.86 apfu, and distinctively higher concentrations in Al (0.23–0.26 apfu) and Na (0.11–0.12 apfu). These secondary clinopyroxenes may have formed by high-pressure fluids percolating the mélange in the subduction channel, possibly related to fluids that formed jadeite deposits (described in the neighboring Sierra del Convento mélange) or tremolite-actinolite veins (present in the La Corea and Sierra del Convento mélanges).

Composición de la Cr-espinela en las peridotitas del macizo ofiolítico Mayarí-Cristal: implicaciones petrogenéticas.

Cr-spinel composition in peridotites of Mayarí-Cristal ophiolitic massif, eastern Cuba: petrogenetic implications.

M. Castillo-Oliver[1,2], J. A. Proenza[1], C. Marchesi[3], N. Pujol-Solà[3], Y. Gréau[2], F. Gervilla[3], J. C. Melgarejo[1], A. García-Casco[3]

1 Dept. Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Fac. de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028, Barcelona. montgarricastillo@ub.edu; japroenza@ub.edu; joan.carles.melgarejo.draper@ub.edu
2 ARC Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems, Macquarie University, 2109, Australia. yoann.greau@mq.edu.au

3 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18071,Granada. claudio@ugr.es; npujolsola@ugr.es; gervilla@ugr.es; agcasco@ugr.es

Palabras clave: Cr-espinela, LA-ICP-MS, ofiolita, inicio de subducción, manto.

Resumen

El macizo ofiolítico de Mayarí-Cristal (MMC) se localiza en la parte oeste de la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (FOMB) en Cuba oriental. En el MMC se han reconocido tres zonas de afloramientos de peridotitas mantélicas (harzburgitas y dunitas muy serpentinizadas): i. Mayarí Sur, ii. Mayarí Norte y iii. Sagua de Tánamo. Las peridotitas de Mayarí Sur están intruídas por diques/venas de piroxenitas, mientras que las de Mayarí Norte y Sagua de Tánamo, por gabros (± doleritas y dioritas). La composición de la Cr-espinela en las peridotitas de Mayarí Norte y Sagua de Tánamo es similar, tanto en elementos mayores (Cr# = 0.43-0.64, Mg# = 0.51-0.62) como en traza, y comparable a la de la Cr-espinela accesoria en las peridotitas del Macizo ofiolítico Moa-Baracoa, en la parte este de la FOMB. Contrariamente, la Cr-espinela del dominio Mayarí Sur se caracteriza por valores de Cr# más altos (0.63-0.79) y Mg# más bajos (0.39-0.54). Además, se distingue por un enriquecimiento en Sc (>5ppm) y Mn (>1600 ppm), junto con un empobrecimiento en Ga (<29 ppm) y Ni (<500 ppm). Estas composiciones son típicas de magmas de afinidad boninítica, similares a las observadas en las peridotitas de niveles mantélicos profundos. Estos resultados han permitido definir dos dominios en la sección mantélica del Macizo Mayarí-Cristal: uno refractario y similar a Moa Baracoa (Mayarí Norte y Sagua de Tánamo); y otro ultra-refractario (Mayarí Sur). Las peridotitas del dominio Mayarí Sur representan los niveles más profundos de la sección mantélica de la FOMB, y probablemente de todo el cinturón ofiolítico de Cuba.

Abstract

The Mayarí-Cristal ophiolitic massif (MCM) is located in the western part of the Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt (MBOB) in eastern Cuba. In the MCM, we identified three main outcrop areas of mantle peridotites (harzburgites and highly serpentinised dunites): i. South Mayarí, ii. North Mayarí and iii. Sagua de Tánamo. The peridotites of South Mayarí are intruded by dykes/veins of pyroxenites, while those of North Mayarí and Sagua de Tánamo are mainly intruded by gabbros (± diorites and dolerites). The composition of Cr-spinel in the peridotites from North Mayarí and Sagua de Tánamo is similar, in terms of both major (Cr# = 0.43-0.64, Mg # = 0.51-0.62) and trace element contents, and comparable to that of accessory Cr-spinel in the peridotites from the Moa-Baracoa ophiolitic massif (eastern MBOB). Contrarily, Cr-spinel from the South Mayarí domain has higher Cr# (0.63-0.79) and lower Mg# (0.39-0.54). Additionally, this spinel shows distinctive enrichment in Sc (>5ppm) and Mn (>1600 ppm), coupled with depletion in Ga (<29 ppm) and Ni (<500 ppm). These compositions are typical of magmas of boninitic affinity, similar to spinel in peridotites from deep mantle levels. These results define two domains in the mantle section of the MC: a refractory domain (North Mayarí and Sagua de Tánamo), similar to Moa Baracoa; and an ultra-refractory domain (South Mayarí). The peridotites of the South Mayarí domain represent the deepest levels of the mantle section of the MBOB, and probably of the entire ophiolitic belt of Cuba.

Implicaciones tectónicas del complejo ultramáfico-máfico San Juan de Otates, Guanajuato (México)

Tectonic implications of the San Juan de Otates ultramafic-mafic complex, Guanajuato (Mexico)

V. Colás[1*], N.A. Pineda-Rodríguez[2], J.M. González-Jiménez[3], C. Marchesi[4], J.A. Proenza[5]

1 Depto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12 50009 Zaragoza, España. vcolas@unizar.es
2 Depto. Geociencias, Universidad de los Andes, Cra. 1 #18a-12 111711 Bogotá, Colombia. na.pineda10@uniandes.edu.co
3 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, Av. de las Palmeras 4 18100 Armilla, España. jm.gonzalez.j@csic.es
4 Depto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n 18071 Granada, España. claudio@ugr.es
5 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Carrer Martí i Franquès s/n 08028 Barcelona, España. japroenza@ub.edu

Palabras clave: rocas ultramáficas y máficas, raíz de arco, suprasubducción, Terreno Guerrero, México.

Resumen

El complejo ultramáfico-máfico de San Juan de Otates (Guanajuato, México) está constituido por peridotitas (dunitas serpentinizadas y wehrlitas), piroxenitas (clinopiroxenitas olivínicas y clinopiroxenitas), gabros y diques de plagiogranito. Este complejo se localiza en la parte oriental del Terreno Compuesto Guerrero y se ha interpretado como: i) la sección cortical de un arco volcánico intra-oceánico formado en el paleo-Pacífico, o ii) una secuencia ofiolítica remanente de la placa en subducción o de la cuenca de tras-arco desarrollada en el margen de Norte América (Martini et al., 2011). La petrografía, química mineral y geoquímica de elementos mayores, trazas y tierras raras de estas rocas ultramáficas y máficas sugieren que son cumulados magmáticos formados por cristalización fraccionada de magmas basálticos y segregación mineral en la raíz de un arco en una zona suprasubducción. Por tanto, estos datos indican que la subducción de la placa Farallón bajo Norteamérica durante el Cretácico Inferior formó una cuenca de tras-arco (i.e., cuenca de Arperos) y un arco magmático en el frente de subducción sobre la corteza continental, donde precipitaron los cumulados ultramáficos y máficos del Complejo de San Juan de Otates.

Abstract

The San Juan de Otates ultramafic-mafic complex (Guanajuato, Mexico) is constituted by peridotites (serpentinized dunites and wehrlites), pyroxenites (olivine clinopyroxenites and clinopyroxenites), gabbros, and plagiogranite dykes. This complex is located in the eastern part of the Guerrero Composite Terrane and has been interpreted as: i) the crustal section of an intra-oceanic volcanic arc formed in the paleo-Pacific, or ii) an ophiolitic sequence remnant of the subducting plate or back-arc basin developed on the North America margin (Martini et al., 2011). Petrography, mineral chemistry, and major, trace, and rare earth element geochemistry of these ultramafic and mafic rocks suggest that they are magmatic cumulates formed by fractional crystallization of basaltic magmas and mineral segregation in a arc-root from a supra-subduction zone. Therefore, these data support that the subduction of the Farallon plate beneath North America during the Early Cretaceous formed a back-arc basin (i.e., the Arperos basin) and a magmatic arc at the subduction front over the continental crust, where ultramafic and mafic cumulates from the San Juan de Otates Complex precipitated.

Referencias

Martini, M., Mori, L., Solari, L. y Centeno-García, E. (2011). Sandstone Provenance of the Arperos Basin (Sierra de Guanajuato, Central Mexico): Late Jurassic–Early Cretaceous Back-Arc Spreading as the Foundation of the Guerrero Terrane. *The Journal of Geology* 119(6), 597-617.

Registro de la evolución del antearco del Caribe (Cuba oriental y central) en cromititas ofiolíticas

Ophiolitic chromitites (eastern-central Cuba) record the evolution of the Caribbean fore-arc

D. Domínguez-Carretero[1*], J.A. Proenza[1], F. Gervilla[2], V. Colás[3], C. Villanova-de-Benavent[1], N. Pujol-Solà[2], A. Garcia-Casco[2]

1 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Carrer Martí i Franquès, s/n, 08028, Barcelona, España. ddominguezcarretero@ub.edu; japroenza@ub.edu; cvillanovadb@ub.edu
2 Depto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva, s/n, 18071 Granada, España. gervilla@ugr.es; npujolsola@ugr.es; agcasco@ugr.es
3 Depto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. vcolas86@gmail.com

Palabras clave: cromititas, ofiolita, inicio de subducción, antearco, Cuba.

Resumen

Las cromititas ofiolíticas son relevantes como depósitos de Cr y porque ayudan a entender la construcción y evolución del manto litosférico oceánico. Cuba oriental (distritos de Mayarí, Sagua de Tánamo y Moa-Baracoa) y central (distrito de Camagüey) poseen más de 200 depósitos de cromititas ofiolíticas asociados a diferentes niveles estructurales del manto superior y de la zona de transición manto-corteza. En esta investigación, la geoquímica de elementos mayores, menores y trazas de las Cr-espinelas revela cómo todos los depósitos de cromititas estudiados se han formado en un ambiente de antearco, en la zona de supra-subducción del arco intra-oceánico del Caribe. Asimismo, la composición de las Cr-espinelas indica cómo las cromititas de los distritos de Camagüey y Moa-Baracoa se formaron en equilibrio con fundidos de tipo *fore-arc basalts* característicos de un inicio de subducción temprana (Reagan et al., 2010); sin embargo, las cromititas de los distritos de Mayarí, cristalizaron en equilibrio con líquidos de afinidad boninítica propios de un inicio de subducción en etapas más avanzadas. Finalmente, las cromititas del distrito de Sagua de Tánamo, cuyas Cr-espinelas tienen una composición intermedia respecto a las de los distritos anteriores, se formaron en la transición de un estadio de inicio de subducción a un estadio de inicio de subducción avanzada.

Abstract

Ophiolitic chromitites are not only relevant as a Cr source, but also to understand the construction and evolution of the oceanic lithospheric mantle. Eastern (Mayarí, Sagua de Tánamo and Moa-Baracoa districts) and Central Cuba (Camagüey district) contain more than 200 deposits of ophiolitic chromitites associated with different levels of the upper mantle and the mantle-crust transition zone. In this study, major, minor and trace element composition of Cr-spinel reveals the formation of chromitite bodies in the fore-arc of the intra-oceanic Caribbean arc. Estimation of the parental melts for the chromitites reveal that those from the Camagüey and Moa-Baracoa districts formed in equilibrium with fore-arc basalts, which are characteristic of early stages of subduction initiation (Reagan et al., 2010), whereas those from the Mayarí district crystallized in equilibrium with melts of boninitic affinity, typical of more advanced stages of subduction initiation. Finally, Cr-spinel from Sagua de Tánamo chromitites have intermediate composition compared to the other studied Cuban deposits and were formed during the transition between early and more advanced stages of subduction initiation.

Referencias

Reagan, M.K., Ishizuka, O., Stern, R., Kelley, K., Ohara, Y., Blicher-Toft, J., Bloomer, S., Cash, J., Fryer, P. y Hanan, B. (2010). *Geochemistry, Geophysics and Geosystems* 11, Q03X12.

Modelo geodinámico de la colisión arco-continente y de la inversión en la polaridad de subducción para el segmento de La Española de la Placa de Caribe septentrional

Geodynamic model of arc-continent collision and subduction polarity reversal for the Hispaniola segment of the northern Caribbean Plate

J. Escuder-Viruete[1], F.J. Fernández[2], F. Pérez Valera[3], M. Castillo-Carrión[1], P. Valverde-Vaquero[1], Y. Pérez[4], M.B. Roque[5]

1 Instituto Geológico y Minero España, CSIC, C. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. j.escuder@igme.es
2 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. C. Jesús Arias de Velasco, 33005 Oviedo, Asturias. fjfernandez@uniovi.es
3 Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante. 03080 Sant Vicent de Raspeig, Alicante. fperez@ua.es
4 Servicio Geológico Nacional, Av. Winston Churchill 75, 3er, Santo Domingo, República Dominicana. yperez@sgn.gob.do
5 Investigadora Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología, Santo Domingo, República Dominicana. mariaroqueq31@gmail.com

Resumen: La Isla de La Española (República Dominicana y Haití) está localizada en el margen septentrional de la Placa de Caribe. Su geología es principalmente resultado de la subducción Cretácica dirigida al SO y la colisión oblicua Eocena del arco intra-oceánico Caribeño con el margen continental meridional de Norteamérica. La modelización geodinámica de estos procesos mediante el programa *GPlates* en plataforma SIG nos ha permitido reconstruir como la colisión arco-continente condujo al bloqueo de la zona de sutura en el sector septentrional de la isla y la transferencia de la deformación a la región de tras-arco meridional. El modelo también explica la inversión de la polaridad de subducción y el inicio de la subducción dirigida al NE. Además, la modelización muestra como la acreción Miocena del plateau oceánico Caribeño originó un cambio a un régimen tectónico de desgarre a escala cortical y el escape hacia el este de la Placa de Caribe.

Palabras clave: Placa de Caribe, colisión arco-continente, subducción, modelización geodinámica.

Abstract: *The Hispaniola Island (Dominican Republic and Haiti) is situated on the northern edge of the Caribbean Plate. Its geology resulted mainly of SW-directed Cretaceous subduction and the Eocene oblique collision of the intra-oceanic Caribbean island-arc with the southern continental margin of North America. Using the GPlates program on a GIS platform, geodynamic modeling of these processes allows us to reconstruct how the arc-continent collision produced the blockage of the suture zone in the northern sector of the island and the transfer of the deformation to the southern back-arc region. It also explains the reversal of subduction polarity and the initiation of NE-directed subduction. Furthermore, the modeling shows how the Miocene accretion of the Caribbean oceanic plateau caused a change to a crustal-scale strike-slip tectonic regime, leading to the eastward escape of the Caribbean Plate.*

Key words: *Caribbean Plate, arc-continent collision, subduction, geodynamic modeling.*

Introducción

Localizada en el margen septentrional de la Placa de Caribe, la geología de la Isla de La Española (República Dominicana y Haití) es principalmente resultado de la subducción dirigida al SO durante el Cretácico y la colisión oblicua en el Eoceno del arco intra-oceánico Caribeño con el margen continental meridional de Norteamérica (Pérez-Estaún et al., 2007; Escuder-Viruete et al., 2013). En el presente trabajo se presenta la modelización geodinámica de estos procesos. Los resultados permiten: (1) reconstruir las trayectorias de las unidades geodinámicas diferenciadas en la Española a lo largo del tiempo; (2) determinar los cambios de velocidad y de dirección experimentados en cada unidad y su causa geodinámica; y (3) establecer la historia geológica de acreción y colisión de la Isla.

Metodología

El movimiento relativo entre las placas de Caribe y Norteamericana puede ser reconstruido mediante el software de modelización geodinámica *GPlates* V2.3 (www.gplates.org). La metodología consiste en distinguir unidades geodinámicas limitadas por zonas de falla o contactos crípticos, entendiendo a cada unidad como un fragmento oceánico/continental geodinámicamente coherente que ha seguido una evolución propia en el espacio y en el tiempo, y aplicar restricciones geológicas a su movimiento. La modelización ha permitido reconstruir las trayectorias y velocidades de tres puntos localizados en cada unidad geodinámica de La Española a medida que se desplazaban con la Placa de Caribe: la Cordillera Central (arco isla Caribeño Cretácico), la Cuenca de Azua (microplaca Gonâve) y la Sierra Bahoruco (plateau oceánico Caribeño).

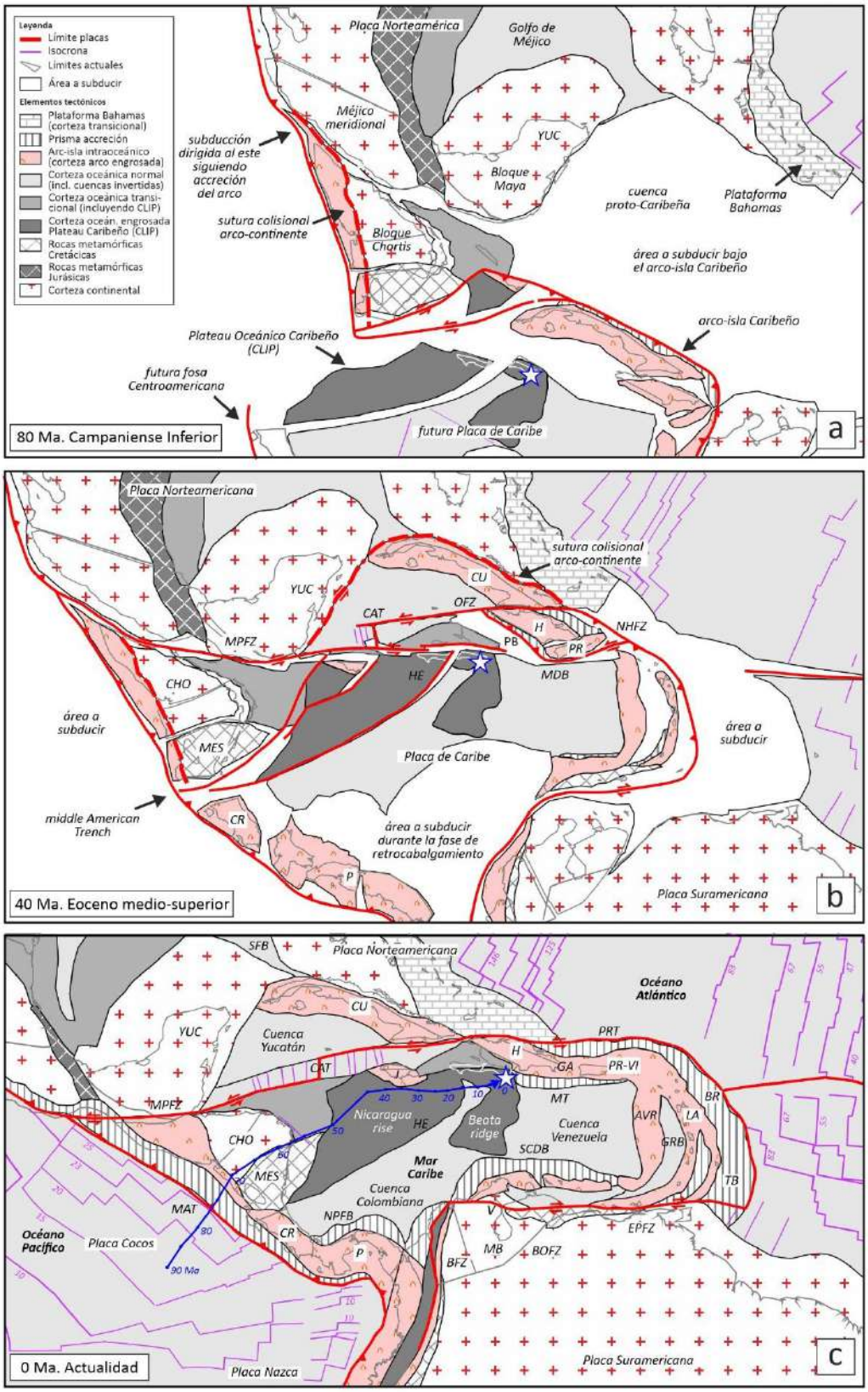


FIGURA 1. *Reconstrucciones geodinámicas realizadas con Gplates 2.3.0 para la evolución de la Placa de Caribe. La naturaleza de las diferentes unidades geodinámicas está expresada en la leyenda. (a) Reconstrucción a 80 Ma mostrando la amplia área de corteza oceánica proto-Caribeña que será subducida por el movimiento hacia el NE del arco-isla Caribeño. (b) Reconstrucción a 40 Ma mostrando la colisión arco-continente. (c) Situación actual mostrando la colisión de la Cresta de Beata en el sector meridional central de La Española. La línea azul representa la trayectoria de un punto (estrella azul) de la Placa de Caribe en la Sierra de Bahoruco desde los 80 Ma. AVR, Cresta de Aves; BR, Prisma de Barbados; BE, Escarpe de Beata; BOFZ, zona falla de Boconó; BOFZ, zona falla de Bowin; BFZ, zona falla de Bucaramanga; CAT, Fosa de Cayman; CGFZ, zona falla de Cerro Golden; CR, Costa Rica; CU, Cuba; EPFZ, zona falla del Pilar; EPGFZ, zona falla de Enriquillo-Platain Garden; GRB, cuenca Granada; H; La Española (República Dominicana y Haití); HP, plateau de Haití; HE, Escarpe de Hess; HB, cuenca de Hispaniola; LA, Antillas Menores; MB, cuenca Maracaibo; MES, terrenos de Mesquito; MAT, Fosa de Centroamérica; MC, Cañón de la Mona; MP, Pasaje de la Mona; MDB, cinturón deformado de Los Muertos; MT, Fosa de Los Muertos; MPFZ, zona falla de Motaguá Polochic; NHDB, cinturón deformado septentrional de La Española; NHFZ, zona falla Septentrional; OFZ, zona falla de Oriente; P, Panamá; PB, cinturón de Peralta; PR, Puerto Rico; PRT, Fosa de Puerto Rico; SFZ, zona falla Septentrional; SCDB, cinturón deformado meridional Caribeño; VDB, cinturón deformado de Venezuela; VI, Islas Vírgenes.*

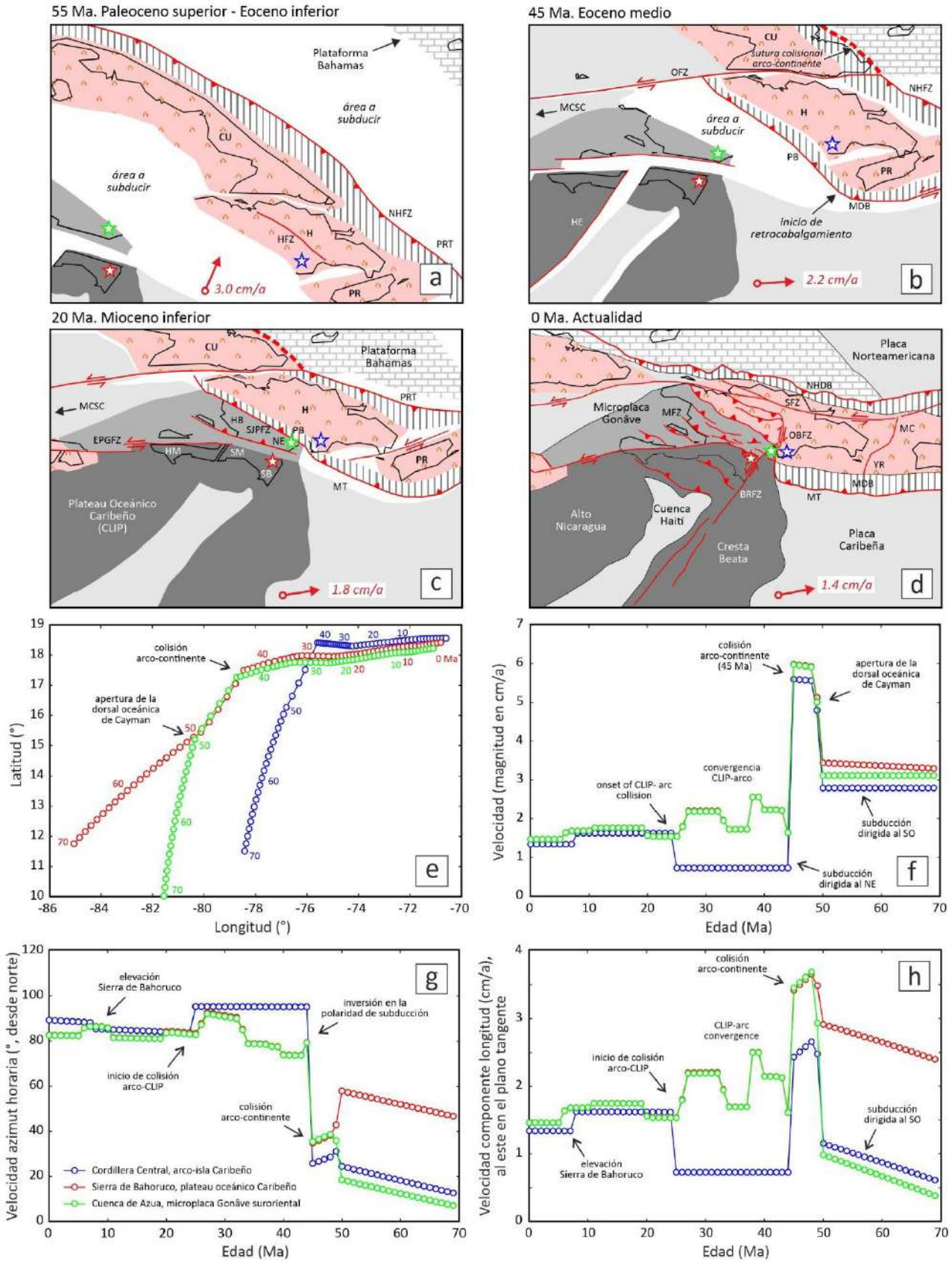


FIGURA 2. *Detalle de las reconstrucciones geodinámicas realizadas para la colisión arco-continente y arco-plateau oceánico en los márgenes septentrional y meridional de La Española, respectivamente. La leyenda es como en la Fig. 1. (a) Reconstrucción a 55 Ma indicando las zonas de corteza oceánica que serán subducidas bajo el arco Caribeño y en el tras-arco. (b) Reconstrucción a 45 Ma mostrando la colision arco-continente, el traslado del acortamiento al tras-arco y el inicio del retrocabalgamiento en el prisma de Peralta-Los Muertos. (c) Reconstrucción a 20 Ma mostrando la colisión oblicua del CLIP de corteza transicional con Peralta. (d) Reconstrucción actual mostrando la accreción del CLIP de corteza engrosada y indentación de la Cresta de Beata en el margen meridional de La Española. (e, f, g y h) La modelización permite reconstruir la historia seguida por puntos de cada unidad geodinámica en términos de posición, velocidad y dirección. Las reconstrucciones de GPlates muestran que la dirección y tasa de movimiento de la Placa de Caribe cambia en el Eoceno inferior (50 Ma), Eoceno medio (45 Ma), Oligoceno más alto-Mioceno inferior (25 Ma) y Mioceno superior (7 Ma), en relación a la apertura de la cuenca de Cayman, la colisión arco-continente, el inicio de la colisión arco-CLIP (o colisión Gonâve-arco) y la acreción del suroeste de La Española, respectivamente. SFZ, zona falla Septentrional; YR, Cresta de Yuna.*

Resultados

La reconstrucción geodinámica obtenida permite distinguir cuatro estadios evolutivos (Figs. 1, 2). En el Campaniense inferior (80 Ma), el arco-isla Caribeño se movía hacia el NE a una velocidad de 4-5 cm/a. En este tiempo, la Placa de Caribe ha pasado sobre el punto caliente de Galápagos, dando lugar a un periodo de volcanismo submarino de plateau oceánico, que se inició a los 139 Ma y fue extensivo a 88 Ma, edificando la *Caribbean Large Igneous Province* (CLIP; Fig. 1a). En una zona de subducción inclinada al SO, el arco intra-oceánico consumía la corteza oceánica proto-Caribeña situada en el actual sector central del Caribe y colisionaba oblicuamente con el bloque Maya del margen meridional de Norte-américa.

Durante el Paleoceno superior- Eoceno inferior (55 Ma; Fig. 2a), el arco se desplazaba hacia el NNE a una velocidad de 3 cm/a respecto a Bahamas, a la vez que seguía consumiendo el proto-Caribe. Los vestigios de esta subducción son ofiolitas compuestas por litosfera oceánica, mélanges de matriz serpentinítica con bloques máficos de signatura MORB y unidades con metamorfismo de alta-P preservadas en el prisma de acreción desarrollado en el sector frontal del arco (Escuder-Viruete et al., 2013). Las rocas volcánicas y plutónicas de edad Aptiense-Eoceno inferior presentes en La Española registran el magmatismo de arco en la Placa de Caribe superior. Localizado en la trasera del arco, el CLIP también avanzó en la dirección NNE (Fig. 2g). Con el cese del magmatismo de pluma mantélica comenzó la sedimentación de una potente secuencia de calizas de plataforma Terciarias, bien preservada en las Sierras de Bahoruco y Neiba. A los 50 Ma, la apertura oceánica de Cayman produjo un cambio hacia el NE en la dirección de convergencia de la Placa de Caribe y la velocidad de convergencia aumento a 5,5-6,0 cm/a (Fig. 2f, g).

A lo largo del Eoceno medio (45 Ma), el avance del arco culminó con su colisión con Norteamérica (Figs. 1b, 2b). En el norte de La Española, la colisión arco-continente causó la extinción del volcanismo, el emplazamiento de ofiolitas zona de supra-subducción y el desarrollo de cabalgamientos dirigidos al NE (Pérez-Estaún et al., 2007; Escuder-Viruete et al., 2013). El bloqueo de la zona de subducción con la entrada de corteza continental originó la transferencia de la convergencia a la región de tras-arco meridional, la inversión de la polaridad de subducción y la deformación por retrocabalgamientos en el prisma de acreción resultante de Peralta-Los Muertos (Hernáiz-Huerta y Pérez-Estaún, 2002; Escuder-Viruete et al., 2023). La nueva zona de subducción dirigida al NE separó la cuenca de Venezuela de la corteza del arco de la Cordillera Central. La colisión produjo un brusco cambio hacia el E en la dirección de convergencia (Fig. 2e, g), y su velocidad disminuyó a 0,8 cm/a en la Cordillera Central y entre 1,7 y 2,5 cm/a en el CLIP de la Sierra de Bahoruco y la cuenca de Azua (Fig. 2. f, h). La convergencia posterior entre el arco y el CLIP fue acomodada en la Fosa de Los Muertos y en el prisma de acreción suprayacente de Peralta entre el Eoceno medio y el Oligoceno superior (entre 44 y 25 Ma).

Desde el Mioceno inferior (20 Ma), el movimiento al ENE del CLIP de corteza transicional originó su colisión/acreción oblicua con el Cinturón de Peralta y la formación del cinturón de pliegues y cabalgamientos dirigidos al SW de Haití-Neiba y las cuencas de San Juan-Azua en el antepaís (Fig. 1c). Esta colisión giró el vector de convergencia ligeramente hacia el E, siendo de magnitud similar (1,7 cm/a) para la Cordillera Central, la Sierra de Bahoruco y la cuenca de Azua (Fig. 2f, h). La acreción del CLIP al arco originó el cambio a un régimen tectónico de desgarres a escala cortical y el escape hacia el E de la Placa de Caribe. Todavía activo en el norte de La Española, este régimen ha dado lugar a una tectónica transpresiva, la fragmentación de la zona de colisión y el escape lateral de los bloques tectónicos resultantes.

Durante el Plioceno y hasta la actualidad (7 a 0 Ma), la convergencia dio lugar a la colisión del CLIP de corteza engrosada, causando el levantamiento y plegamiento del Massif de la Serre-Sierra de Bahoruco y la individualización de la cuenca de Enriquillo-Cul de Sac (Figs. 1c, 2d). Durante este periodo, la tasa de convergencia descendió a 1,3-1,4 cm/a. La indentación de la Cresta de Beata produjo el retroceso del prisma de Los Muertos y la rotación horaria de los pliegues y cabalgamientos del Cinturón de Peralta en la Bahía de Ocoa. Parte del acortamiento inducido por la Cresta de Beata es acomodado por las fallas activas de Beata y Ocoa-Bonao-La Guacara (Escuder-Viruete et al., 2023).

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Proyecto PID2019-105625RB-C22 del MCIN/AEI/10.13039/ 501100011033.

REFERENCIAS

Escuder-Viruete, J., Valverde-Vaquero, P., Rojas-Agramonte, Y., Gabites, J. y Pérez-Estaún, A. (2013): From intra-oceanic subduction to arc accretion and arc-continent collision: Insights from the structural evolution of the Río San Juan metamorphic complex, northern Hispaniola. *Journal of Structural Geology*, 46, 34-56.

Escuder-Viruete, J., Fernández, F.J., Pérez Valera, F. y Medialdea, A. (2023): Present-day accommodation of Caribbean-North American oblique plate convergence through the Ocoa-Bonao-La Guacara fault zone, southern central Hispaniola. *Tectonics*, 42, e2022TC007618.

Hernáiz-Huerta, P.P. y Pérez-Estaún, A. (2002): Estructura del cinturón de pliegues y cabalgamientos de Peralta, República Dominicana. *Acta Geológica Hispánica*, 37, 183-205.

Pérez-Estaún, A., Hernáiz-Huerta, P.P., Lopera, E., Joubert, M. y grupo SYSMIN (2007): Geología de la República Dominicana: De la construcción de arco-isla a la colisión arco-continente. *Boletín Geológico y Minero*, 118, 157-174.

Evolución magmática de las rocas máficas en la ofiolita de la Península del Vizcaíno, Baja California Sur, NO de México: Un enfoque geoquímico y microestructural

Magmatic evolution of mafic rocks from the Vizcaíno Peninsula Ophiolite, Southern Baja California, NW Mexico: A geochemical and microstructural approach

L.J. Gutiérrez-Trejo[1*], V. Colás[2], S. Piazolo[3], E. Fitz-Díaz[4], A. Ramírez-Salazar[4] y E. Centeno-García[4]

1 Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México. luisitoj92@comunidad.unam.mx
2 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50009, Zaragoza, España. vcolas@unizar.es
3 School of Earth and Environment, University of Leeds, LS2 9JT, Leeds, Reino Unido. S.Piazolo@leeds.ac.uk
4 Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México. fitzde@gmail.com; anthony@geologia.unam.mx; centeno@unam.mx

Palabras clave: Ofiolita, gabro, deformación, magmatismo**.**

Resumen

La ofiolita de la Península de Vizcaíno (NO de México) está formada, de base a techo, por tres unidades litoestratigráficas separadas tectónicamente: 1) rocas ultramáficas del manto superior; 2) rocas máficas de la corteza oceánica inferior; y (3) unidad volcansedimentaria. En este estudio enfocado en las rocas máficas, la composición geoquímica de elementos mayores y traza junto con el análisis cuantitativo de la microestructura de las gabronoritas y gabros olivínicos bandeados y faneríticos se empleó para caracterizar la historia magmática, régimen de deformación y ambiente tectónico de origen. Los diagramas de discriminación tectónica de elementos mayores y traza sugieren que las rocas máficas se formaron a partir de fundidos con afinidad boninítica en un ambiente tectónico de antearco o intra-arco. Los granos de olivino y ortopiroxeno, de cristalización temprana, carecen de microestructuras de deformación cristal-plástica penetrantes. Por otro lado, clinopiroxeno y plagioclasa tardíos muestran un patrón de orientación preferencial cristalográfico asociado a flujo magmático, además el primero tiene subgranos poco desarrollados, mientras que la plagioclasa no los presenta. En conclusión, estas rocas máficas, asociadas a la corteza oceánica inferior, se formaron en el ante e intra-arco de una zona de suprasubducción y experimentaron, con menor intensidad, deformación cristal-plástica durante una etapa tardía de la historia magmática. Su exhumación posterior ocurrió en el dominio de deformación frágil.

Abstract

The Vizcaino Peninsula ophiolite (NW Mexico) is composed of three tectonically separated units: 1) ultramafic rocks of the upper mantle; 2) mafic rocks of the lower oceanic crust; and (3) a volcanosedimentary unit. In this study of the mafic rocks, the geochemical composition of major and trace elements, along with quantitative analysis of the microstructure of banded and phaneritic gabbro-norite and olivine gabbro, was used to characterize the magmatic history, deformation regime, and genetic tectonic environment. Tectonic discrimination diagrams of major and trace elements suggest that the mafic rocks were formed from melts with boninitic affinity in a forearc to intra-arc tectonic setting. Early crystallizing olivine and orthopyroxene grains lack penetrative crystal-plastic deformation microstructures. On the other hand, late clinopyroxene and plagioclase exhibit a crystal preferred orientation pattern related with magmatic flow, with the former having poorly developed subgrains, while the latter does not. In conclusion, these mafic rocks are related with the lower oceanic crust in the Vizcaino Peninsula, were formed in a forearc and intra-arc setting of a suprasubduction zone, and only experienced lesser crystal-plastic deformation during a late stage of the magmatic history. Their subsequent exhumation occurred in the brittle deformation domain.

Geoquímica de la sección mantélica de la Ofiolita de Careón (NW del Macizo Ibérico): Procesos de fusión, metasomatismo e hidratación de una litosfera en evolución e implicaciones geodinámicas.

Geochemistry of the Careón Ophiolite mantle section (NW Iberian Massif): Melting, hydration and metasomatic processes in an evolving lithosphere and geodynamic implications

G. Iglesias[1], R. Arenas[1], I. Novo-Fernández[1,2], S. Sánchez Martínez[1] y A. García-Casco[2]

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología e Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. gabigles@ucm.es, rarenas@ucm.es, s.sanchez@geo.ucm.es, inovo@ucm.es
2 Dpto. de Mineralogía y Petrología and Inst. And. Ciencias Tierra (UGR, CSIC), Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain.agcasco@ugr.es, inovo@ugr.es
Palabras clave: Ofiolita de Careón, geoquímica de serpentinitas y peridotitas, Orógeno Varisco, NW del Macizo Ibérico.

Resumen

La Unidad Ofiolítica de Careón (UOC) es considerada una de las ofiolitas Devónicas (c. 395 Ma) mejor preservadas de todo el Orógeno Varisco. Esta contribución presenta un nuevo estudio sobre la petrología y geoquímica de las peridotitas serpentinizadas que forman la sección mantélica de UOC, centrado en la modelización de los procesos de fusión parcial/refertilización que han afectado a las rocas ultramáficas, así como en su naturaleza mineralógica primaria. Dos grupos de rocas ultramáficas han sido identificados en UOC, mostrando la típica composición de peridotitas abisales y de fore-arc, respectivamente. Correspondientemente, se han identificado dos eventos petrogenéticos de alta temperatura que han influenciado las características geoquímicas de los protolitos peridotíticos. Durante el primer evento Cámbrico, la sección mantélica original sufrió bajos grados de fusión parcial/refertilización bajo condiciones anhidras en la periferia de Gondwana, probablemente en una cuenca de back-arc. El segundo evento Devónico se caracterizo por altos grados de fusión parcial/refertilización bajo condiciones hidratadas, probablemente en una zona de fore-arc. Esta evolución es consistente con las características geoquímicas y las edades magmáticas de las rocas máficas de las unidades máficas-ultramáficas en los complejos de Ordenes y Cabo Ortegal del NW del Macizo Ibérico. La evolución de una zona de back-arc hasta una zona de fore-arc desde el Cámbrico hasta el Devónico, respectivamente, es consistente con la evolución Varisca del margen de Gondwana previamente descrita para el Macizo Ibérico.

Abstract

The Careón Ophiolitic Unit (COU) is one of the best-preserved Devonian ophiolites (c. 395 Ma) exposed along the Variscan Orogen. This contribution presents a study of the petrography and geochemistry of serpentinized peridotites forming the ophiolitic mantle section of the COU, focused on modelling the partial melting/refertilization processes affecting these ultramafic rocks as well as their primary mineralogical nature. Two groups of ultramafic rocks have been identified in the COU showing typical compositions of abyssal and fore-arc peridotites, respectively. Correspondingly, two main high-temperature petrogenetic events have influenced the geochemical characteristics of the peridotite protoliths. During a first Cambrian event, the original mantle section underwent low melting/refertilization degrees under anhydrous conditions in a peri-Gondwanan margin, likely in a back-arc setting. A second Devonian event was characterized by higher degrees of partial melting/refertilization under hydrous conditions, probably in a fore-arc setting. This evolution is consistent with the geochemical characteristics and magmatic ages of the mafic rocks of the mafic-ultramafic units in the Órdenes and Cabo Ortegal Complexes of the NW Iberian Massif. The dynamic evolution from a back-arc setting to a fore-arc setting in Cambrian and Devonian times, respectively, is consistent with the previously described peri-Gondwanan Variscan evolution of the Iberian Massif.

Evolución de la Ofiolita de Calzadilla (SO del Macizo Ibérico) desde su formación hasta su colisión

Ediacarian evolution of the Calzadilla Ophiolite (SW Iberian Massif): From forearc formation to tectonic accretion

I. Novo-Fernández[1], A. Garcia-Casco[1], R. Arenas[2], E. Rojo-Pérez[3], N. Pujol-Solà[1], J.A. Proenza[4], R. Díez Fernández[5], A. Cambeses[1], S. Sánchez Martínez[2], G. Iglesias[1]

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada 18071 Granada. inovo@ugr.es, agcasco@ugr.es, npujolsola@ugr.es, aitorc@ugr.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense 28040 Madrid. rarenas@ucm.es, s.sanchez@geo.ucm.es, gabigles@ucm.es
3 Unidad de Geocronología, CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría, Universidad Complutense 28040 Madrid. e.rojo@ucm.es
4 Departamento de Mineralogía, Petrología y Geología Aplicada, Universidad de Barcelona, 08028, Barcelona. japroenza@ub.edu
5 Departamento de Geología y Subsuelo, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CSIC) 37001 Salamanca. r.diez@igme.es

Palabras clave: Ofiolitas, Serpentinitas, Metamorfismo, SW de Iberia, Cadomiense.

Resumen

En el SO del Macizo Ibérico, el Complejo de Ossa-Morena contiene terrenos alóctonos que son clave para descifrar la evolución del margen de Gondwana durante el Neoproterozoico. La Ofiolita de Calzadilla, formada durante el Ediacárico (ca. 602 Ma; Arenas *et al.*, 2018), representa los restos de litosfera oceánica desarrollada durante la subducción del océano que se encontraba al norte de Gondwana bajo este continente (Arenas *et al.*, 2018). La geoquímica de la sección mantélica, altamente serpentinizada, revela un ambiente de formación en una región de fore-arc, compatible con la corteza máfica de composición boninítica de la ofiolita. Además, la ofiolita exhibe un metamorfismo superpuesto. El análisis petrológico de rocas de las secciones máfica y ultramáfica muestra que las rocas progradaron hasta alcanzar el pico metamórfico a ~550 ºC y ~6 kbar según un gradiente barroviense. Este metamorfismo es resultado de la obducción de la ofiolita sobre el arco magmático Cadomiense hacia los 540 Ma.

Abstract

The Ossa-Morena Complex in SW Iberian Massif contains allochthonous terranes that are key for deciphering the evolution of the Gondwana margin during the Neoproterozoic. The Calzadilla Ophiolite, formed during the Ediacaran (ca. 602 Ma; Arenas *et al.*, 2018), is a remnant of an oceanic lithosphere developed during the subduction below Gondwana of the ocean located to the north of this continent (Arenas *et al.*, 2018). The geochemistry of the highly serpentinized mantle section of the ophiolite reveals formation in a fore-arc setting, which is compatible with the boninitic composition of the mafic crust. Besides, the ophiolite shows a superimposed metamorphism. The petrological analysis of rocks from the mafic and ultramafic sections indicates progradation up to ~550 ºC and 6 kbar, following a barrovian gradient. This metamorphism resulted from the collision of the ophiolite with the Cadomian magmatic arc at ca. 540 Ma.

Referencias

Arenas, R., Fernández-Suárez, J., Montero, P., Díez Fernández, R., Andonaegui, P., Sánchez Martínez, S., Albert, R., Fuenlabrada, J. M., Matas, J., Martín Parra, L. M., Rubio Pascual, F. J., Jiménez-Díaz, A. y Pereira, M. F. (2018). *Gondwana Research* 58, 71-86.

Petrogénesis de las peridotitas mantélicas de las ofiolitas de Camagüey, Cuba.

Petrogenesis of the mantle peridotites of Camagüey ophiolites, Cuba.

N. Pujol-Solà[1], M. Castillo-Oliver[2,3], J.A. Proenza[2], I. Novo-Fernández[1], D. Domínguez-Carretero[2], C. Villanova-de-Benavent[2], K. Núñez-Cambra[4], E. Piñero-Pérez[5], y A. Garcia-Casco[1]

1- Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. npujolsola@ugr.es; inovo@ugr.es; agcasco@ugr.es
2- Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain. montgarricastillo@ub.edu; japroenza@ub.edu; ddominguezcarretero@ub.edu; cvillanovadb@ub.edu
3- ARC Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems and GEMOC, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia. montgarricastillo@ub.edu
4- Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, Vía Blanca, Línea del Ferrocarril s/n, San Miguel del Padrón, Habana 10200, Cuba. kelvira62@gmail.com
5- Empresa Geominera Camagüey, Carretera Central Este, Km 5 ½ Camagüey, Cuba. enriquepp@geocmg.minem.cu

Palabras clave: manto, harzburgitas, dunitas, fore-arc, inicio de subducción.

Resumen

El macizo ofiolítico de Camagüey (COM, Cuba central), con una extensión aproximada de 1200 km^2, está compuesto principalmente por tectonitas mantélicas y una zona de transición manto-corteza (MTZ) sobrepuesta por gabros bandeados típicos de niveles inferiores de la corteza oceánica, rocas volcánicas y sedimentos. Las tectonitas corresponden a harzburgitas y dunitas fuertemente empobrecidas, similares a las harzburgitas restíticas del macizo ofiolítico de Moa-Baracoa en Cuba oriental, y presentan un grado variable de serpentinización (entre un 30 y 100 %). Las harzburgitas están compuestas por olivino (Fo_{90-91}), ortopiroxeno ($En_{88}Wo_2Fs_{10}$ en promedio) y Cr-espinela accesoria (Cr# [Cr/(Cr+Al)] = 0.35-0.65, Mg# [Mg/(Mg+Fe^{2+})] = 0.43-0.65, y TiO_2 hasta 0.28 en % en peso). Las dunitas están formadas principalmente por olivino completamente serpentinizado y contienen Cr-espinela accesoria (Cr# = 0.33-0.53, Mg# = 0.44-0.70, y TiO_2 hasta 0.69 en porcentaje en peso). El clinopiroxeno ($En_{47-59}Wo_{50-36}Fs_{3-4}$) impregnando olivino y ortopiroxeno en las peridotitas, junto a la composición de la Cr-espinela accesoria en las dunitas, señala procesos de interacción roca/fundido (refertilización). La química mineral de las peridotitas sugiere que el COM se originó en una región de ante-arco, probablemente relacionado con un estadio de inicio de subducción.

Abstract

The Camagüey ophiolitic massif (COM, central Cuba), with an approximate extension of 1200 km^2, is mainly composed of mantle tectonites and a Moho transition zone (MTZ) overlain by layered gabbros typical of the lower oceanic crust, volcanic rocks, and sediments. The tectonites are strongly depleted harzburgites and dunites, similar to the restitic harzburgites of the Moa-Baracoa ophiolitic massif in easternmost Cuba, and are variably serpentinized (from 30 to 100%). The harzburgites are composed of olivine (Fo_{90-91}), orthopyroxene (average $En_{88}Wo_2Fs_{10}$) and accessory Cr-spinel (Cr# [Cr/(Cr+Al)] = 0.35-0.65, Mg# [Mg/(Mg+Fe^{2+})] = 0.43-0.65, and up to 0.28 wt% TiO_2). Dunites mainly comprise completely serpentinized olivine with accessory Cr-spinel (Cr# = 0.33-0.53, Mg# = 0.44-0.70, and up to 0.69 wt% TiO_2). Clinopyroxene ($En_{47-59}Wo_{50-36}Fs_{3-4}$) occurs as impregnations around olivine and orthopyroxene in the peridotites and the composition of accessory Cr-spinel in dunites point to melt-interactions (refertilization). The mineral composition of the peridotites indicates that the COM was originated in a fore-arc region, likely as a result of subduction initiation.

Cromititas en la base de la corteza oceánica, Camagüey, Cuba.

Chromitites at the base of the oceanic crust, Camagüey, Cuba.

C. Villanova-de-Benavent[1*], D. Domínguez-Carretero[1], J.A. Proenza[1], C.F. Hernández-Fernández[1], N. Pujol-Solà[2], K. Núñez-Cambra[3], E. Piñero-Pérez[4], A. Garcia-Casco[2]

1 Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/ Martí i Franquès, s/n, 08028, Barcelona, España.
cvillanovadb@ub.edu; ddominguezcarretero@ub.edu; japroenza@ub.edu; cristian.hernandez15@correo.uis.edu.co
2 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva, s/n, 18071 Granada, España.
npujolsola@ugr.es; agcasco@ugr.es
3 Instituto de Geología y Paleontología, Vía Blanca, Línea del Ferrocarril s/n, San Miguel del Padrón, Habana 10200, Cuba.
kelvira62@gmail.com
4 Empresa Geominera Camagüey, Carretera Central Este, Km 5 ½ Camagüey, Cuba. enriquepp@geocmg.minem.cu

Palabras clave: cromititas, ofiolita, corteza oceánica, elementos del grupo del platino, Cuba.

Resumen

La ofiolita de Camagüey (Cuba) contiene las cromititas ofiolíticas de grado refractario (Al_2O_3 > 20 % en peso, (Al_2O_3+Cr_2O_3) > 57 % en peso y contenidos bajos Fe) más alto del mundo. Los cuerpos de cromitita encajan mayoritariamente en dunitas y harzburgitas de la zona de transición manto-corteza. No obstante, hay un grupo de cuerpos de cromitita encajados en anortositas, troctolitas y gabros típicos de la base de la corteza océanica. Estos cuerpos representan el único ejemplo de cromititas encajadas en la paleocorteza oceánica inferior de todo el cinturón ofiolítico del Caribe. Petrográficamente, sus Cr-espinelas son euhedrales, con texturas en atolón y con inclusiones de plagioclasa y clinopiroxeno, en continuidad óptica con estos mismos minerales en la matriz. La mediana de los valores de #Cr [Cr/(Cr+Al)] de las Cr espinelas es de 0,34, pudiendo llegar hasta 0,13. Además, las Cr-espinelas, de núcleo a borde, se enriquecen en Al y Mg, y se empobrecen en Cr y Fe. Estos resultados permiten hipotetizar que las cromititas se han formado a partir de la asimilación, por magmas basálticos, de los niveles inferiores de la base de la corteza oceánica.

Asimismo, estas cromititas son muy ricas en Pt-Pd-Au, los cuales se concentran en sulfuros de Fe-Ni-Cu, diseminados abundantemente en las rocas gabroicas y en su contacto con las cromititas. Los sulfuros se formarían por la sobresaturación en S del líquido basáltico del que cristalizan las rocas gabroicas.

Abstract

The Camagüey ophiolite (Cuba) contains the highest refractory-grade ophiolitic chromitites in the world (Al_2O_3 > 20 wt.%, (Al_2O_3+Cr_2O_3) > 57 wt.% and low Fe contents). Mantle-crust transition zone dunites and harzburgites are the main host of these chromitites. However, there is a group of chromitites hosted within anorthosites, troctolites and gabbros representative of the lower oceanic crust. These ore bodies are the only example of chromitites hosted in a paleo-oceanic lower crust throughout the whole Caribbean ophiolitic belt. Chromium-spinel grains are euhedral, with atoll textures, and contain plagioclase and clinopyroxene inclusions in optical continuity with grains of same minerals in the matrix. The Cr-spinel has median Cr# values of 0.34, but can be as low as 0.13, and show zoning from an Al+Mg enrichment and Cr+Fe depletion from core to rim. These results allow hypothesising that these chromitites formed due to assimilation of the lower oceanic crust by basaltic melts.

Additionally, these chromitites are enriched in Pt-Pd-Au, contrary to the typical Ru-Os-Ir enrichment of ophiolitic chromitites. These noble metals are found in abundant Fe-Ni-Cu sulphides disseminated within the gabbroic rocks and at the contact with the chromitites. The Fe-Ni-Cu sulphides formed due to S saturation of the basaltic melt from which the gabbroic rocks crystallised.

Complejo máfico-ultramáfico Zumba (Ecuador), características, correlaciones e implicaciones geodinámicas

Zumba mafic-ultramafic complex (Ecuador), characteristics, correlations, and geodynamic implications

F. Villares[1], A. Nuñez[1] y D. Narváez[1]

1 Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador.
fabian.villares@epn.edu.ec, andres.nuñez@epn.edu.ec, diego.narvaez@epn.edu.ec

Palabras clave: manto, serpentinita, Zumba, geodinámica andina, zona subandina.

Resumen

El complejo máfico-ultramáfico Zumba, localizado en la zona sub-andina en el extremo Sur de Ecuador, corresponde a un conjunto de escamas tectónicas estrechas con orientación NNW que ocurren a lo largo de 5 km. Este complejo está formado por peridotitas serpentinizadas (Ol + Cpx + Srp + Tr + Mag) y serpentinitas, con ocurrencias puntuales de metabasaltos, y encajado en metapelitas de la unidad Plan El Oso de edad Devónico Superior (Chew et al., 2007). El complejo máfico-ultramáfico Zumba está intruido por rocas no datadas correlacionadas con el magmatismo calco-alcalino de edad Jurásica. En la zona sub-andina, en posición equivalente a Zumba se encuentra la unidad Pachicutza, constituida por basaltos toleíticos de afinidad N-MORB (Villares et al., 2014). Considerando las relaciones de campo, estás unidades se correlacionan con las unidades máficas-ultramáficas del Triásico tardío, las cuales fueron generadas en un ambiente extensional de suprasubducción (p.e., Monte Olivo, Quebrada Plata, Peltetec, Aburrá en Colombia). La ocurrencia de complejos máficos-ultramáficos de edad triásica desde Colombia hasta el sur del Ecuador sugiere un amplio desarrolló de un ambiente extensional en el NW de Gondwana, por lo que su estudio provee valiosa información sobre procesos tectónicos a gran escala.

Abstract

The Zumba mafic-ultramafic complex in the sub-Andean zone in the extreme south of Ecuador corresponds to a set of narrow tectonic slices with an NNW trend that occur along 5 km section. This complex is formed by serpentinized peridotites (Ol + Cpx + Srp + Tr + Mag) and serpentinites, with isolated occurrences of metabasalts, and hosted in metapelites of the Plan El Oso unit of Upper Devonian age (Chew et al., 2007). The Zumba mafic-ultramafic complex is intruded by undated rocks correlated with the calc-alkaline magmatism of Jurassic age. In the sub-Andean zone, the Pachicutza unit is in an equivalent position to Zumba, constituted by tholeiitic basalts of N-MORB affinity (Villares et al., 2014). According to the field relationships, these units correlate with the late Triassic mafic-ultramafic units generated in a suprasubduction extensional environment (e.g., Monte Olivo, Quebrada Plata, Peltetec, Aburrá in Colombia). The occurrence of mafic-ultramafic complexes of Triassic age from Colombia to southern Ecuador suggests a broad development of an extensional regimen in NW Gondwana, so their study provides valuable information on large-scale tectonic processes.

Referencias

Chew, D., Schaltegger, U., Košler, J., Whitehouse, M., Gutjahr, M., Spikings, R., y Miškovíc, A. (2007). *Geological Society of America Bulletin*, doi: 10.1130/B26080.1

Villares, F., Egüez, A., y Yanez, E. (2014). In: *EGU General Assembly*. V16, Abstract EGU2014-13614.

Los ojos de la erupción volcánica de La Palma

The eyes of the La Palma volcanic eruption

C. Camuñas[1], C. Lorenzo[1], J.C. García López-Davalillo[2], M. Hernández-Ruiz[1], A. Cabrera[1], E. Díaz-Losada[1], G. Lozano[2] y A. Romero[1]

1 CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. c.camunas@igme.es, c.lorenzo@igme.es, m.hernandez@igme.es, a.cabrera@igme.es, elisabeth.diaz@igme.es, a.romero@igme.es

2 CN IGME-CSIC. C/ La Calera, 1. 28760 Tres Cantos (Madrid). jc.garcia@igme.es, g.lozano@igme.es

Resumen: El avance tecnológico de drones comerciales, con softwares de navegación y sensores cada vez más sofisticados con transmisión de datos en tiempo real, está permitiendo que se utilicen en una amplia variedad de situaciones. La emergencia de la erupción volcánica en la isla de La Palma en 2021 ha sido, con toda probabilidad, una de las zonas más sobrevoladas con drones en el territorio nacional en un breve periodo de tiempo. Durante la misma, estuvo presente un equipo del IGME-CSIC junto con el Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias, cuyo trabajo diario dio pie a vuelos de dron que resultaron fundamentales para el seguimiento del proceso eruptivo. Estos vuelos permitieron la captura de fotografías y videos, tanto ópticos como térmicos, llegando a lugares inaccesibles y en tiempo real, dando apoyo a la población afectada, gestores, intervinientes y personal científico. La gran diferencia entre las múltiples operadoras que sobrevolaron la zona, es que tanto los pilotos del IGME-CSIC, como su personal de apoyo, son geólogas/os y esta formación junto con su experiencia en emergencias geológicas, facilitó la observación de procesos geológicos claves para la interpretación de la evolución de la erupción, favoreciendo la fluidez y el rigor en el asesoramiento a las autoridades.

Palabras clave: Emergencia, dron, geología, volcán

Abstract: *The technological advance of commercial drones (RPAs), with navigation software and increasingly sophisticated sensors with real-time data transmission, is allowing them to be used in a wide variety of situations. The emergency of the volcanic eruption on the island of La Palma in 2021 has been, in all likelihood, one of the places most flown over with drones in the national territory in a short period of time. A team from IGME-CSIC was present throughout the eruption along with the Emergency and Rescue Team (GES) of the Government of the Canary Islands, whose daily work led to drone flights that were essential for monitoring the eruptive process. The RPAs flights made it possible to obtain optical and thermal photographs and videos, reaching inaccessible places and in real time, providing support to those affected citizens, managers, interveners and scientists. The big difference between the multiple aircrafts that flew over the area is that both the IGME-CSIC pilots and their support staff are geologists and this training, together with their experience in geological emergencies, facilitated the observation of key geological processes for the interpretation of the evolution of the eruption, favouring fluidity and rigor in advising the authorities.*

Key words: *Emergency, Remotely Piloted Aircraft (RPA), geology, volcano*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El Servicio de Trabajos Aéreos (STA) del Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) inició su andadura en julio de 2016 con unos objetivos definidos, entre ellos, prestar apoyo a los proyectos técnicos y científicos del IGME, colaborar en proyectos con otros organismos públicos de investigación, universidades y grupos de investigación, generando un contexto adecuado para el desarrollo científico, ofreciendo un servicio personalizado y cualificado, además de poder dar servicio a las administraciones públicas y emergencias dentro del Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias (GADE) del CSIC o a la Unidad de Respuesta Geológica de Emergencias (URGE) del IGME-CSIC.

En 2017 el IGME se incorpora como operadora de trabajos aéreos en el registro oficial de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), organismo del Estado, actualmente adscrito a la Secretaría de Estado de Transporte del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, que vela para que se cumplan las normas de aviación civil en el conjunto de la actividad aeronáutica de España y tiene, entre otras responsabilidades, la competencia en la regulación de las operaciones con drones de hasta 150 kg. Es en julio de ese mismo año cuando se formaliza el STA por el Comité de Dirección del IGME, con la participación de dos operadores titulados de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, de su acrónimo en inglés: *Remotely Piloted Aircraft System*), encargados de realizar operaciones aéreas especializadas

con la responsabilidad de cumplir los requisitos establecidos por Real Decreto 1036/2017 (BOE, 2017) para la ejecución de operaciones como la realización de observaciones y vigilancia aérea (fotografías y filmaciones), levantamientos aéreos (topográficos y fotogramétricos), operaciones de emergencia, búsqueda y salvamento o actividades de investigación.

Durante los siguientes años, el equipo de trabajo del STA experimenta un notable crecimiento y afianza su presencia, aumentando tanto el número de miembros como el de colaboraciones con otros grupos de investigación. Este incremento de recursos redundó en un aumento de los equipos aéreos disponibles y en la formación y desarrollo de técnicas y nuevos productos cartográficos. Fueron utilizadas técnicas fotogramétricas *Structure from Motion* como nubes de puntos, modelos digitales de elevaciones, modelos 3D de teselas con texturizado real de alta resolución o la obtención de fotografías y vídeos aéreos de alta resolución. Así mismo, para el estudio de procesos geológicos, se han realizado trabajos con nubes de puntos obtenidas por fotogrametría o Lidar, analizando las diferencias entre modelos de distintas fechas, o localizando las direcciones de fracturación preferentes y los planos de fallas para análisis estructural y de peligros por desprendimientos. Y, por último, tras la erupción de La Palma, realizando trabajos con imágenes obtenidas con sensores térmicos, incluyendo el análisis y la generación de ortomosaicos térmicos radiométricos.

EMERGENCIA DE LA PALMA

El STA ya se encontraba en la isla de La Palma varios días antes del comienzo de la erupción volcánica, realizando trabajos de fotogrametría destinados a supervisar las deformaciones del terreno y a controlar taludes con riesgo de desprendimiento, en respuesta a la detección de enjambres sísmicos en los días precedentes. En el momento de la explosión inicial de esta erupción, el STA tomó las primeras imágenes del evento y asistió a las autoridades como único organismo presente con medios aéreos disponibles (Figura 1).



FIGURA 1. *Inicio de la erupción. Día 1 (STA, CN IGME-CSIC).*

En los días posteriores, la coordinación de todos los trabajos que se desarrollaron corrió a cargo del CECOES 112 de la Dirección General de Seguridad y Emergencias del Gobierno de Canarias bajo la dirección del Director Técnico del Plan de Emergencia Volcánica de Canarias (PEVOLCA) desde el Puesto de Mando Avanzado (PMA) instalado en el Centro de Visitantes de la Caldera de Taburiente, en la localidad de El Paso.

Así, durante los 85 días que duró la erupción, un equipo formado por un miembro del Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias y dos miembros del STA del IGME, al amanecer de cada día, realizaba vuelos de dron con el objetivo de filmar el estado del volcán y la erupción, para identificar, localizar y describir los cambios diarios producidos en la geometría del edificio volcánico (Figura 2), así como el tipo y el número de centros eruptivos, el grado de explosividad, la ubicación y alcance de las nubes de piroclastos y gases, la evolución de los múltiples frentes de coladas, etc. Esta información era procesada y tratada en un breve tiempo, presentándose vídeos al Grupo de Intervención coordinado por Protección Civil (bomberos, policía local y nacional, Guardia Civil, UME, etc.) para que pudiera tomar las decisiones de actuación diarias. Posteriormente, esta información era trasladada al Comité Científico del PEVOLCA para que asesorasen a las autoridades sobre el estado de la erupción y la evolución del mismo.



FIGURA 2. *Vuelos de reconocimiento al cono volcánico el 19 de noviembre de 2021 (STA, CN IGME-CSIC).*

Para cumplir estos objetivos, fue preciso contar con varios equipos que se alternaban en el tiempo, de manera que el trabajo no se viera interrumpido a lo largo de una emergencia de duración prolongada e indefinida. Para ello, fue necesario desarrollar un flujo de trabajo común a todos los equipos, de manera que la forma de actuar e informar a las autoridades fuese similar en todo momento. Este flujo de trabajo diario fijaba horarios de actuación, distribución de tareas, productos a generar, formatos de entrega de archivos, estructura de repositorios y procedimiento de envío de información.

La integración de drones equipados con cámaras térmicas de alta resolución marcó un notable avance en la observación remota del proceso eruptivo, permitiendo un análisis detallado y preciso durante la erupción volcánica de La Palma. Esta tecnología permitió determinar con gran claridad el avance de las coladas a pesar de las condiciones climatológicas tan adversas existentes en el entorno afectado, que dificultaban la visibilidad (Figura 3).

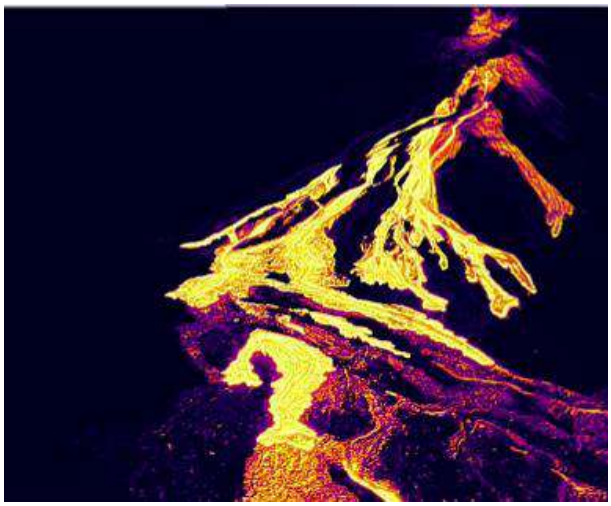


FIGURA 3. *Imagen térmica de un flujo de lava (STA, CN IGME-CSIC).*

Otras de las operaciones llevadas a cabo cada jornada de trabajo eran los vuelos de dron destinados a la realización de ortomosaicos generados a partir de las imágenes fotogramétricamente ortorrectificadas y georreferenciadas. Estos vuelos se hacían con el objetivo de perimetrar el avance diario de las coladas y, en su caso, interpretar la dirección que tomarían los flujos lávicos teniendo en cuenta parámetros como la velocidad de avance de las lavas, el tipo de lava, viscosidad, pendiente del terreno, etc. (Williams y McBirney, 1979). Los mapas actualizados de las coladas eran puestos a disposición de las autoridades y presentados diariamente en el Comité Científico (Figura 4).

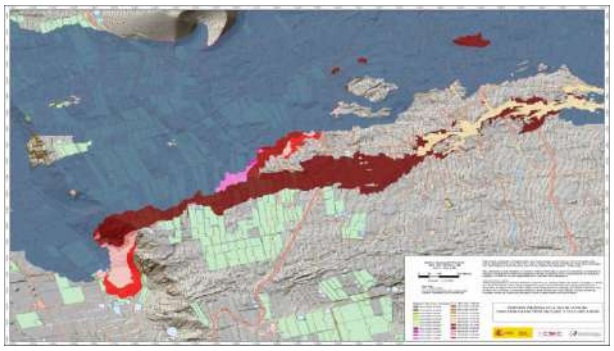


FIGURA 4. *Ejemplo de cartografía diaria con el avance de las coladas.*

El equipo de trabajo del STA contaba con diversos modelos de drones, todos clasificados como multirrotores cuadricópteros, abarcando desde el Matrice 210, hasta el Matrice 300, e incluyendo el Mavic 2 Enterprise Advanced, Phantom 4 Pro, Mavic Pro, Mavic Air 2, entre otros. Todos los drones estaban dotados de sensores RGB de alta resolución y varios de ellos con sensores térmicos. La elección del uso de cada modelo de dron respondía a las condiciones específicas de vuelo, y a sus capacidades particulares. Además de los drones, durante las operaciones de campo se emplearon dispositivos electrónicos portátiles adicionales, como ordenadores portátiles, tabletas, cámaras de captura esférica (comúnmente llamadas cámaras 360), equipos de trasmisión de imágenes en tiempo real para la realización de vuelos de inspección específicos a petición del Comité Científico y/o los gestores de la emergencia, y por último, durante las operaciones en campo, los equipos de trabajo iban provistos de equipos de protección que incluían sensores de gases para garantizar la seguridad de los equipos de trabajo.

Los multirrotores de la marca DJI empleados en los vuelos durante toda la erupción, han resultado ser unos equipos muy robustos en condiciones extremas y se han comportado de una manera muy capaz, soportando lluvias de piroclastos, nubes de ceniza, ondas de choque en vuelo, vientos de gran magnitud, lluvias y, sobretodo, temperaturas extremas, aterrizando en ocasiones con los cubresensores de plástico completamente derretidos. A la finalización de cada vuelo, la reparación y supervisión de las aeronaves era de vital importancia. Las tareas de mantenimiento se centraban principalmente en desatascar los rotores del dron de los piroclastos férricos adheridos, limpiar las lentes de los sensores y realizar el cambio y recarga de baterías. Debido a las impredecibles ráfagas de viento, algunos de estos drones tuvieron que realizar aterrizajes de emergencia en zonas de exclusión de acceso por gases letales, motivo que llevó a que, en algún caso, los equipos se perdieran quedando sepultados posteriormente por las coladas. Las altas temperaturas irradiadas por los canales lávicos incandescentes que se sobrevolaron también ocasionaron daños en los materiales plásticos de algunos drones y en ocasiones afectaron al buen rendimiento de los sistemas inerciales y de navegación debido al sobrecalentamiento de los componentes electrónicos.

A partir de los datos obtenidos en campo y la información oficial que ofrecían distintos organismos, el IGME-CSIC creó una página web que proporcionaba información exhaustiva y actualizada sobre el evento volcánico. Esta plataforma, que registró más de 2,5 millones de visualizaciones durante los 3 meses de la erupción, incluía distintos visores de mapas 2D y 3D, informes sobre la evolución de la delimitación de la lava, gráficos de sismicidad, concentración de dióxido de azufre (SO_2) y datos, informes y mapas que ofrecían otros organismos. La página y el canal de YouTube del IGME-CSIC publicaron más de 500 videos, la mayoría de ellos con imágenes capturadas por drones pilotados por los geólogos del STA. Estos vídeos alcanzaron más de 20 millones de reproducciones en YouTube, siendo difundidos también en telediarios, programas y documentales. Este esfuerzo del personal del IGME-CSIC para formar e informar sobre lo que estaba ocurriendo ha recibido el Premio VIA APIA 2022 a la transparencia informativa en materia de medio ambiente y el Premio CSIC-Fundación BBVA de Comunicación Científica en la categoría de investigadores. Pero el mayor premio fue el de ayudar a minimizar, en la medida de lo posible, la incertidumbre que esta situación provocaba en la población palmera.

Con el estado de Emergencia finalizado, el STA ha continuado con su labor, desarrollando trabajos de carácter científico-técnico y dando apoyo a estudios de monitorización de la fase post-eruptiva. Se han realizado

nuevos vuelos con drones con la finalidad de obtener modelos 3D del edificio volcánico seriados por fechas, con cálculo teórico del espesor de las coladas (Figura 5). Además, se ha continuado la monitorización y seguimiento del estado de las coladas realizando vuelos térmicos de manera continua, lo que ha permitido la generación de nueva información detallada sobre la evolución y recorrido de las lavas. Las medidas de temperatura han sido calibradas mediante la colocación estratégica de sensores térmicos a lo largo del trazado de las dos principales carreteras levantadas sobre el campo de lavas. Estas carreteras son las que se han construido para conectar la zona norte y sur de la isla, en la zona occidental de la misma.



FIGURA 5. *Modelo 3D del edificio volcánico.*

Adicionalmente, se han realizado vuelos de alta resolución sobre varias zonas afectadas, para estudiar la fracturación asociada a la actividad volcanotectónica posterior a la finalización del proceso eruptivo. Estos vuelos han posibilitado la generación de ortomosaicos georreferenciados y, a partir de ellos, obtener cartografía de detalle del desarrollo y orientación de esas fracturas.

También, partiendo del gran volumen de información generado con los vuelos de dron realizados durante el transcurso de la erupción y la información facilitada por los sensores de temperatura instalados después de la misma, se ha logrado crear un mapa dinámico que simula temperaturas de enfriamiento de las coladas a diferentes profundidades, utilizando como base la modelización con la ecuación del calor en materiales basálticos.

Más en detalle, los vuelos fotogramétricos de dron han permitido la modelización 3D de elementos singulares y estructuras volcánicas efímeras en el tiempo, para su conservación y posterior estudio digital. Se han hecho modelos 3D de hornitos de gran tamaño y de un campo formado durante la erupción que contenía estructuras de impacto de bloques/bombas volcánicas inalteradas, en los que se pueden calcular, por ejemplo, la dispersión de las bombas volcánicas a partir de estos modelos fotogramétricos.

CONCLUSIONES

Los drones fueron sin duda la gran novedad organizativa durante la emergencia en la erupción del volcán de La Palma, y han resultado ser una herramienta de observación remota muy útil, que ha servido para dar una rápida respuesta diaria en campo y ha ayudado a la toma de decisiones a los intervinientes, tanto a las autoridades como al Comité Científico del PEVOLCA.

Las claves del éxito del servicio prestado y de la actuación que tuvo el STA en esta emergencia volcánica fue que, tanto los pilotos del STA, como su personal de apoyo, son geólogas/os. Esta formación, unida a una dilatada experiencia en situaciones de emergencia geológica, hizo que el asesoramiento proporcionado en esta situación fuera de grandísima utilidad para la resolución de los problemas que presentó la erupción. El STA, personalizado en su equipo y asistido por los drones, han sido los ojos de la erupción.

Siguiendo en esta línea de actuación, el equipo del STA continúa trabajando sobre el terreno dando apoyo a los múltiples grupos de investigación del IGME-CSIC que trabajan en la isla, realizando vuelos fotogramétricos de zonas concretas afectadas por la erupción, localizando puntos calientes, realizando monitorizaciones de cuál fue el avance de la erupción, reconstrucciones espaciales de cómo fue la dinámica y evolución de los flujos de lava a través de los canales y tubos de lava, así como colaborando en los trabajos de control y reconstrucción de áreas afectadas en la isla. Los excelentes resultados alcanzados en estos estudios demuestran la necesidad de incorporar los drones de manera integral en los planes de emergencias y Protección Civil para hacer frente a grandes emergencias y eventos de riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias, y en particular a sus pilotos de RPAs, Juana Medina y Enrique Sánchez, las facilidades que nos brindaron durante la emergencia para el desarrollo conjunto del trabajo de reconocimiento aéreo.

REFERENCIAS

BOE (2017). Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea https://www.boe.es/boe/dias/2017/12/29/pdfs/BOE-A-2017-15721.pdf

IGME-CSIC. (2021). Erupción volcánica en La Palma Página web: https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma

Williams, H. y McBirney, A.R. (1979). *Volcanology*, 397 p. Edit: Freeman, Cooper and Co. San Francisco, California.

Pronóstico de la duración de una erupción: La Palma 2021.

Forecasting eruption duration: La Palma 2021.

M. Charco[1], P. J. González[2], J.L.G. Pallero[3], L. García-Cañada[4] and C. del Fresno[4]

1 Instituto de Geociencias (IGEO, UCM-CSIC), C/ Dr Severo Ochoa, 7, 28040 Madrid. m.charco@csic.es

2 Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA-CSIC),38206 La Laguna , Santa Cruz de Tenerife. pabloj.gonzalez@csic.es

3 ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Mercator 2, 28031Madrid. jlg.pallero@upm.es

4 Instituto Geográfico Nacional (IGN),C/ Alfonso XII 3, 28014 Madrid. lgarcia@mitma.es; cdelfresno@mitma.es

Palabras clave: Geodesia Volcánica, Despresurización, GNSS

Resumen

En 2021, tras 50 años de inactividad, tuvo lugar en La Palma la erupción más voluminosa de la isla desde que se tienen registros históricos. La erupción tuvo lugar entre el 19 de Septiembre y el 13 de Diciembre con una duración de 85 días y 9 horas. La deformación co-eruptiva observada mediante estaciones GNSS permanentes era consistente con la deflación de un reservorio situado bajo el volcán Cumbre Vieja al nivel del Moho.

Durante la erupción, realizamos un pronóstico de su duración considerando la disminución de presión causante de la deflación observada. Uno de los modelos propuestos el día 38 de erupción, cuya disminución de presión representaba el 99% de la presión inicial del reservorio, permitió realizar una estimación de la duración de la erupción de 86 ± 7 días. Por tanto, antes de que la erupción llegara a su meridiano, este modelo fue capaz de ajustar una duración real plausible y consistente con los registros de la duración de las erupciones históricas en La Palma que oscilan entre 24 y 84 días. La falta de límites a priori sobre la disminución de presión necesaria para detener la erupción con respecto a la presión inicial del reservorio hizo que el pronóstico fuera demasiado incierto para tener un impacto operativo real. No obstante, el análisis posterior de los datos y de los modelos propuestos demuestra empíricamente que la disminución de presión del reservorio estaba limitada por el principio físico de conservación de masa en un sistema cerrado, hipótesis necesaria para que los modelos de disminución de presión puedan arrojar pronósticos precisos de la duración de una erupción. En condiciones similares, este tipo de modelos permitirá realizar pronósticos casi en tiempo real de la duración de erupciones en la isla de La Palma y explorar la posibilidad de su aplicación en otras zonas volcánicas activas.

Abstract

After 50 years of quiescence, the most voluminous eruption since historical records took place in La Palma in 2021 (September, 19th - December, 13th, lasting 85 days and 9 hours). Continuous GNSS data show a wide co-eruptive deflation deformation pattern consistent with a reservoir at a depth close to Moho discontinuity beneath Cumbre Vieja volcano.

During the eruption a forecast of eruption end was carried out considering that magma upflow from an overpressurized reservoir drives the eruptive process. One of the models provided an estimate of duration of 86 ± 7 days, for an assumed scenario of pressure drop equals to 99% of intial overpressure, the 38th day of eruptopn. La Palma historical eruptions have lasted from 24 to 84 days. Therefore, less than halfway through the actual duration of the eruption, the proposed model was able to estimate a duration in line with the longest historical eruptions. Nevertheless, the lack of a priori bounds on the pressure drop, based on overpressure gained to fuel the eruption, made the forecast too uncertain to have an operational impact. We empirically show that mass conservation was hold at La Palma which indicates that pressure drop at the chamber controlled its duration. Under similar eruptive magmatic system conditions, near real-time interpretation of geodetic data could provide with credible forecasts of eruption durations in La Palma and perhaps in other volcanoes.

Caracterización morfodinámica de las removilizaciones de tefra por flujos hídricos no newtonianos post-eruptivos en el Volcán de Tajogaite

Morphodynamic characterisation of tephra remobilisations by post-eruptive non-Newtonian water flows at Tajogaite volcano (La Palma)

A. Díez-Herrero[1], M. Hernández Ruiz[1], J. López Gutiérrez[1], J. Martínez-Martínez[1], J.F. Mediato[1], M.A. Perucha[1], J. Garrote[2], N. Sánchez[3], I. Galindo[3] y J.H. Lorenzo[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. andres.diez@igme.es, m.hernandez@igme.es, j.lopezgu@igme.es, javier.martinez@igme.es, jf.mediato@igme.es; ma.perucha@igme.es
2 Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid (UCM), juliog@ucm.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Unidad Territorial de Canarias, n.sanchez@igme.es, i.galindo@igme.es
4 Parque Nacional Caldera de Taburiente (Gobierno de Canarias), joseheriberto.lzo@gmail.com

Palabras clave: tefra, flujos no newtonianos, lahares, volcán Tajogaite, La Palma.

Resumen

La erupción del volcán de Tajogaite desde septiembre a diciembre de 2021 en la isla de La Palma (Islas Canarias) emitió un gran volumen de piroclastos ($45 \cdot 10^6$ m^3), generando un depósito de tefra (ceniza, lapilli, bombas y bloques) con espesores superiores a los 2,80 m en sectores próximos al cono y en su vertiente suroeste. Con posterioridad a la erupción se han recopilado los datos de todos los eventos de precipitación significativa (P_d>40 mm) registrados en la isla en los años 2022 y 2023; y caracterizado muchas de las formas superficiales del terreno asociadas a la ocurrencia de estos eventos de precipitación y debidas a procesos de removilización de la tefra por flujos hiperconcentrados no newtonianos (semejantes a los lahares) formando: circos de cabecera, canales, levees o diques laterales, lóbulos frontales, etc. Todo ello mediante la adquisición de datos morfométricos en campo y topografías de detalle a partir de restitución fotogramétrica con imágenes de drones. Los resultados preliminares de estimación del umbral de removilización superficial no permiten definir un valor concreto para la relación precipitación acumulada-inicio de la removilización; pero, como es lógico, sí muestran una relación directa del inicio del flujo con las pendientes e intensidades de precipitación, e inversa con la granulometría de los piroclastos. Un aspecto muy interesante de entre los extraídos del análisis de estos resultados preliminares es el papel desencadenante del inicio del movimiento que juega la vegetación arbórea, arbustiva y herbácea en la concentración de la precipitación por escurrimiento cortical, lo que altera localmente el balance entre infiltración y escorrentía, facilitando el inicio de los flujos de removilización.

Abstract

The Tajogaite volcano eruption that took place between September and December 2021 in La Palma Island (Canary Islands), emitted a large volume of pyroclasts ($45 \cdot 10^6$ m^3), generating tephra deposits (ash, lapilli, bombs and blocks) deposits with thickness higher than 2.80 m in sectors close to the cone and on its southwestern slope. After the eruption, all the extraordinary precipitation events recorded on the island during 2022 and 2023 have been inventoried and also the forms of tephra remobilization by non-Newtonian hyperconcentrated flows (similar to lahars) forming head cirques, channels, lateral levees, frontal lobes, etc., have been characterized by means of field morphometry and detailed topographies from photogrammetric restitution with drone images. The results show a direct relationship between the beginning of the flow with the surface slope and intensities of precipitation, and inversely with the tephra granulometry. Specially interesting is the triggering role of the arboreal, shrubby and herbaceous vegetation in the concentration of precipitation related to crustal runoff, which produce a local disruption between infiltration and runoff balance, promoting the initiation of remobilization flows.

Monitorización continua de temperaturas en las coladas del Volcán de Tajogaite, Febrero 2023 - Diciembre 2023.

Continuous temperature monitoring in the lava flows of Tajogaite volcano, February 2023 - December 2023.

J.C. García-Davalillo[1], C. Camuñas[1], A. Castro[1], M. Hernández-Ruíz[1], D. Sanz-Mangas[2], J. López-Gutiérrez[1], I. Galindo[2] y N. Sánchez[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. jc.garcia@igme.es, c.camunas@igme.es, a.castro@igme.es, m.hernandez@igme.es, j.lopezgu@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Alonso Alvarado, 43. 35003 Las Palmas. d.sanz@igme.es, i.galindo@igme.es, n.sanchez@igme.es

Palabras clave: Enfriamiento, Lavas, Monitorización, Emergencia, Tajogaite.

Resumen

La erupción Volcán de Tajogaite en la isla de La Palma (archipiélago canario) en 2021 dejó una amplia superficie, más de 1.200 ha, cubierta de lavas con espesores de hasta 70 m. Desde la finalización de la actividad eruptiva el 13 de diciembre, el conocimiento de las temperaturas de las lavas y el tiempo necesario para poder abordar de forma segura las actuaciones de recuperación en las zonas afectadas, han sido dos de las preguntas de mayor interés. El presente trabajo muestra los resultados preliminares del seguimiento continuo de temperatura en una red de puntos seleccionados a lo largo de la nueva carretera LP-213. Esta carretera cruza el campo de lavas en dirección N-S uniendo las zonas urbanas de La Laguna con Las Norias. Con el fin de llevar a cabo un seguimiento del enfriamiento de las lavas, se instalaron ocho termopares hincados a un metro de profundidad en puntos escogidos en función de su localización, temperatura y tipología y estructura de las lavas. Además, se perforaron quince sondeos con profundidades de entre 3 y 23,5 m en cuyo interior se instalaron termopares. Los resultados hasta diciembre de 2023 reflejan un enfriamiento general de las lavas con espesores menores de 10 m. En general, las temperaturas más elevadas tienen relación con la presencia de canales lávico activos durante la erupción, el número de coladas superpuestas y su espesor. La existencia de zonas con temperaturas superficiales anormalmente altas requiere la realización de futuros estudios para poder explicar su comportamiento. La continuidad de este sistema de monitorización de temperatura está ayudando a planificar las actuaciones sobre el campo de lavas.

Abstract

The eruption of Tajogaite volcano in La Palma island (Canary archipelago) in 2021 left a wide surface more than 1,200 ha, covered in lavas with thicknesses of up to 70 m. Since the end of the eruptive activity on December 13th, the knowledge of the lavas temperatures, as well as the time needed to face safely the recovery actions in the affected areas, have been two of the questions of greatest interest. The present work shows the results of the preliminary results of the continuous temperature monitoring of a checkpoint network selected along the new LP-213 road. This road crosses the lava field in a N-S direction, connecting La Laguna and Las Norias urban areas. With the aim of carrying out the monitoring of the lava cooling, eight thermocouples were installed at one-meter depth in sites chosen based on their location, temperature and type and structure of the lavas. In addition, fifteen boreholes were drilled with depths between 3 and 23.5 m and thermocouples were installed inside them. The results until December 2023 show a general cooling of lavas with thicknesses less than 10 m. In general, the highest temperatures are related to the presence of active lava channels during the eruption, the number of superimposed flows and their thickness. The existence of areas with abnormally high surface temperatures require future studies to explain their behavior. The continuity of this temperature monitoring system is helping to plane actions on the lava field.

Cartografía prospectiva de temperaturas subsuperficiales del campo de lavas del Volcán de Tajogaite.

Prospective mapping of subsurface temperatures of the Tajogaite volcano lava field.

J.C. García-Davalillo[1], C. Lorenzo[1], J.A. Fernández-Merodo[1], A. Cabrera[1], C. Camuñas[1], M. Hernández-Ruíz[1], D. Sanz-Mangas[2], I. Galindo[2]

[1]Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. jc.garcia@igme.es, c.lorenzo@igme.es, j.a.@fernandez, a.cabrera@igme.es, c.camunas@igme.es, m.hernandez@igme.es
[2]Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Alonso Alvarado, 43. 35003 Las Palmas. d.sanz@igme.es, i.galindo@igme.es

Palabras clave: Volcán, Temperatura, Cartografía, Enfriamiento, La Palma.

Resumen

Durante los 85 días que duró la erupción del "Volcán de Tajogaite" en la isla de La Palma en 2021, las lavas sepultaron edificios, cultivos, fábricas, carreteras y otras infraestructuras cubriendo una extensión de 12.012 km^2. En las fases de post-emergencia y recuperación, los gestores y planificadores plantearon la necesidad de conocer información detallada sobre la distribución espacial de las temperaturas de las lavas y su evolución temporal. Por esta razón, planteamos una propuesta metodológica pionera para la obtención rápida de mapas de enfriamiento de coladas lávicas basálticas. En ellos se representa la temperatura esperada a 1 y 3 m de profundidad, calculada a partir de modelos de enfriamiento basados en la ecuación del calor (Wittman *et al.*, 2017) y validados mediante comparación con temperaturas obtenidas *in situ* tres meses después del final de la erupción. El procesado, análisis e interpretación de imágenes y vídeos ópticos y térmicos obtenidos con plataformas satelitales y sistemas aéreos no tripulados (UAS) han sido la base para elaboración de los mapas y la definición de los inputs temporales en los modelos. Esta cartografía prospectiva ha sido una herramienta básica en la planificación de usos del territorio y la rehabilitación de carreteras y servicios, permitiendo identificar áreas críticas de intervención prioritaria y evaluar los riesgos potenciales asociados a cualquier actuación sobre el campo de lavas.

Abstract

During the 85 days that the "Volcán de Tajogaite" eruption on La Palma Island lasted in 2021, the lavas buried buildings, crops, factories, roads and other infrastructures covering an area of 12,012 km^2. In the post-emergence and recovery phases, managers and planners raised the need to know the spatial distribution of the temperatures of the lavas and their temporal evolution. For this reason, we put forward a pioneering methodological proposal for quickly obtaining cooling maps of basaltic lava flows. In them, the expected temperature at 1 and 3 meters-depth is represented, calculated from cooling models based on the heat equation (Wittman *et al.*, 2017) and validated by comparison with temperatures obtained in situ three months after the end of the eruption. The processing, analysis and interpretation of optical and thermal images and videos obtained with satellite and UAS platforms have been the basis for the preparation of the maps and the definition of the temporal inputs in the models. This prospective cartography has been a basic tool for land planning uses and rehabilitation of roads and other services, allowing to identify critical areas of priority intervention and to evaluate the associated potential risks with any action on the lava field.

Referencias

Wittmann, W., Sigmundsson, F., Dumont, S. and Lavallée, Y. (2017). Post-emplacement cooling and contraction of lava flows: InSAR observations and a thermal model for lava fields at Hekla volcano, Iceland. J. Geophys. Res. Solid Earth, 122, 946-965.

Evaluación del impacto de la erupción volcánica de La Palma en 2021 en la calidad del agua subterránea: Parte I - Análisis hidráulico

Assessment of the 2021 La Palma volcanic eruption impact on groundwater quality: Part I - Hydraulic analysis

A. García Gil[1], J. Jiménez[1], M.Á. Marazuela[1], C. Baquedano[1], J. Martínez-León[1], S. Gasco Cavero[1,2], N. Cruz-Pérez[3], C. Laspidou[4], J.C. Santamarta[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España
a.garcia@igme.es; jon.jimenez@igme.es; ma.marazuela@igme.es; c.baquedano@igme.es; j.martinez@igme.es
2 Departamento de Salud de Madrid, Ayuntamiento de Madrid, España. gascocs@madrid.es
3 Departamento de Ingeniería Agraria y Ambiental. Universidad de La Laguna, Tenerife (Islas Canarias), España.
ncruzper@ull.edu.es; jcsanta@ull.edu.es
4 Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Tesalia, Volos, Grecia. laspidou@uth.gr

Palabras clave: Volcán Tajogaite; Volatilización del agua subterránea; Acuíferos volcánicos.

Resumen

La erupción volcánica de 2021 en la isla de La Palma (Islas Canarias, España) suscitó la preocupación sobre su posible impacto en los recursos hídricos subterráneos. Este estudio profundiza en los efectos hidráulicos de la erupción. Dos sondeos piezométricos y un pozo ubicados cerca del volcán fueron equipados cada uno con sensores de registro de carga hidráulica, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea. El registro de datos comenzó durante la erupción y continuó durante el año siguiente al cese de la actividad magmática. Se realizaron análisis estadísticos para dilucidar la relación entre las variables medidas y las mediciones en tiempo real de la amplitud sísmica (RSAM). Además, se evaluó la posible vaporización del agua subterránea debido a la posible interacción con el magma mediante un modelo numérico del flujo de agua subterránea en la isla. Asimismo, se calcularon los coeficientes de correlación para discernir la asociación lineal entre los parámetros del agua subterránea y las señales sísmicas, revelando una correlación estadísticamente significativa entre ellos, e indicando fluctuaciones casi instantáneas en parámetros, como los niveles de agua subterránea y la conductividad eléctrica. Estos hallazgos presentan importantes implicaciones para comprender los efectos adversos de las erupciones volcánicas en los recursos hídricos subterráneos, enfatizando la necesidad de un monitoreo y evaluación consistentes por parte de hidrogeólogos y administración competente.

Abstract

The volcanic eruption of 2021 on the island of La Palma (Canary Islands, Spain) raised concerns about its potential impact on groundwater resources. This study delves into the hydraulic effects of the eruption. Two piezometers and one well located near the volcano were each equipped with sensors to record groundwater hydraulic head, temperature, and electrical conductivity. Data recording commenced during the eruption and continued for the year following the cessation of magmatic activity. Statistical analyses were conducted to elucidate the relationship between the measured variables and real-time seismic amplitude measurements (RSAM). Additionally, the potential vaporization of groundwater due to possible interaction with magma was evaluated using a numerical model of groundwater flow on the island. Furthermore, correlation coefficients were calculated to discern the linear association between groundwater parameters and seismic signals, revealing statistically significant correlations between them and indicating nearly instantaneous fluctuations in parameters such as groundwater levels and electrical conductivity. These findings have important implications for understanding the adverse effects of volcanic eruptions on groundwater resources, emphasizing the need for consistent monitoring and assessment by hydrogeologists and competent administrative bodies.

Evaluación del impacto de la Erupción Volcánica de La Palma en 2021 en la calidad del Agua Subterránea: Parte II - Análisis Hidroquímico

Assessment of the 2021 La Palma Volcanic Eruption Impact on Groundwater Quality: Part II - Hydrochemical Analysis

A. García Gil[1], J. Jimenez[1], S. Gasco Cavero[1,2], M.Á. Marazuela[1], C. Baquedano[1], J. Martínez-León[1], N. Cruz-Pérez[3], C. Laspidou[4], J.C. Santamarta[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España
a.garcia@igme.es; jon.jimenez@igme.es; ma.marazuela@igme.es; c.baquedano@igme.es; j.martinez@igme.es
2 Departamento de Salud de Madrid, Ayuntamiento de Madrid, España. gascocs@madrid.es
3 Departamento de Ingeniería Agraria y Ambiental. Universidad de La Laguna, Tenerife (Islas Canarias), España
ncruzper@ull.edu.es; jcsanta@ull.edu.es
4 Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Tesalia, Volos, Grecia laspidou@uth.gr

Palabras clave: Erupción volcánica; Contaminación agua subterránea; Acuíferos volcánicos.

Resumen

Las erupciones volcánicas pueden tener implicaciones significativas para la gestión y sostenibilidad de los recursos hídricos en islas volcánicas. La reciente erupción del volcán Tajogaite en la Isla de La Palma (Islas Canarias, España), en 2021, generó preocupaciones sobre su posible impacto en la calidad de los recursos de agua subterránea. Este estudio se centra en examinar los efectos hidrogeoquímicos de la erupción en la calidad del agua subterránea. La investigación incluyó tres campañas de muestreo de agua subterránea durante la erupción y dos muestreos posteriores, seis meses y un año después de que cesara la erupción, respectivamente. Se muestrearon un total de 15 puntos de control situados relativamente cerca (2–15 km) del volcán en erupción. El estudio reveló cambios estadísticamente significativos, pero de pequeña magnitud absoluta, en el pH, la temperatura, la conductividad y la composición del agua subterránea. Especialmente, se observaron aumentos relativos estadísticamente significativos en las concentraciones de varios elementos traza (por ejemplo, Al, Cr, Fe, Mo, Ni, Sr, Th, Tl, V, Zn, Ba, Cd, Co, Cu, Pb y U) durante la erupción, que fueron sustanciales en algunos casos. Estos hallazgos contribuyen a la comprensión sobre cómo las erupciones volcánicas afectan la calidad del agua subterránea y resaltan la resiliencia de los recursos de agua subterránea frente a eventos eruptivos.

Abstract

Volcanic eruptions can have significant implications for the management and sustainability of water resources in volcanic islands. The recent eruption of the Tajogaite volcano on the island of La Palma (Canary Islands, Spain) in 2021 raised concerns about its potential impact on the quality of groundwater resources. This study focuses on examining the hydrogeochemical effects of the eruption on groundwater quality. The research included three groundwater sampling campaigns during the eruption and two subsequent samplings, six months and one year after the eruption ceased, respectively. A total of 15 monitoring points located relatively close (2–15 km) to the erupting volcano were sampled. The study revealed statistically significant changes, albeit of small absolute magnitude, in pH, temperature, conductivity, and groundwater composition. Particularly, statistically significant relative increases were observed in the concentrations of various trace elements (e.g., Al, Cr, Fe, Mo, Ni, Sr, Th, Tl, V, Zn, Ba, Cd, Co, Cu, Pb, and U) during the eruption, which were substantial in some cases. These findings contribute to understanding how volcanic eruptions affect groundwater quality and highlight the resilience of groundwater resources to eruptive events.

Monitorización petrológica de la erupción del Volcán de Tajogaite en 2021 (La Palma, Islas Canarias)

Petrological monitoring of the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Canary Islands)

R. Herrera[1], A. Márquez[2], J. J. Coello-Bravo[3], T. Ubide[4], M.J. Huertas[2] D. Sanz-Mangas[5], I. Galindo[2] y E. Ancochea[2]

1 Área de Geología, ESCET, Univ. Rey Juan Carlos, Grupo de Investigación Tecvolrisk, 28933 Móstoles, Madrid. raquel.herrera@urjc.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. 28040 Madrid. amarqu13@ucm.es, huertas@ucm.es, anco@ucm.es
3 Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello, 38400 Puerto de la Cruz, Santa Cruz de Tenerife. juancoellobravo@gmail.com
4 The University of Queensland, School of the Environment, Brisbane, Australia. t.ubide@uq.edu.au
5 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) 35003 Las Palmas de Gran Canaria. david.sanz.mangas@ucm.es, i.galindo@igme.es

Palabras clave: Tajogaite, La Palma, Análisis petrológico, Monitorización volcánica, Evolución

Resumen

La erupción del Volcán de Tajogaite en 2021 en La Palma ha sido la más monitorizada hasta la fecha en las Islas Canarias, tanto desde el punto de vista petrológico como sísmico, geodésico, etc. Toda la información obtenida está siendo analizada en detalle con el fin de mejorar el conocimiento de los mecanismos eruptivos que condicionan la actividad monogenética en Canarias y en otras islas oceánicas. Pero también se debe avanzar en determinar cuáles son las técnicas analíticas y de obtención de información mas útiles para la interpretación de la evolución magmática en tiempo real, con el fin de aplicarlas en futuras erupciones para mejorar en la gestión de la emergencia volcánica. Para ello, se ha realizado un estudio comparativo de las diferentes técnicas petrológicas aplicadas al muestreo exhaustivo y sistemático de muestras de lava de las coladas emitidas durante toda la erupción. En este trabajo se muestran los resultados y se discute su eficacia en términos de la información que proporcionan para interpretar la evolución del proceso volcánico, su aplicación en la monitorización de la erupción, rapidez y accesibilidad a la técnica analítica, correlación con otras variables vulcanológicas, etc. Se confirma la gran utilidad de los análisis petrológicos y mineralógicos en términos de relación resultados-rapidez.

Abstract

The eruption of Tajogaite volcano in 2021 in La Palma has been the best monitored so far in the Canary Islands, both from the point of view of the petrology as well as the seismic, geodesic, remote sensing, and gas monitoring data. Post-eruption, we are analyzing petrological information from time-constrained samples to better understand the eruptive mechanisms involved in monogenetic activity in the Canary Islands and other volcanic provinces. A key goal is to determine which petrological and analytical information is most useful for the interpretation of magmatic evolution in real time, to inform monitoring of future eruptions. We have examined magmatic information obtained from different petrological techniques applied to the exhaustive and systematic sampling of the lava flows throughout three months of eruptive activity. In this contribution, we will discuss our results in terms of interpreting the evolution of the volcanic processes and their application in the monitoring of the eruption. We will also highlight the relative usefulness of each approach in the context of the speed and accessibility of analytical techniques and the correlation of results with other vulcanological information.

Macrocristales de plagioclasa en la erupción de 2021 en La Palma: evidencias de incorporación sin-eruptiva de un *mush* evolucionado.

Plagioclase macrocrysts record syn-eruptive incorporation of evolved mush during the 2021 eruption in La Palma

Y. Jegal[1], T. Ubide[1], M. J. Huertas[2], R. Herrera[3], E. Ancochea[2], J. J. Coello-Bravo[4], Á. Márquez[2]

1 The University of Queensland, School of the Environment, Brisbane, Australia. y.jegal@uq.edu.au
2 Dpto. Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. 28040 Madrid. huertas@ucm.es, anco@ucm.es. amarqu13@ucm.es
3 Área de Geología, ESCET, Univ. Rey Juan Carlos, Grupo de Investigación Tecvolrisk, 28933 Móstoles. raquel.herrera@urjc.es
4 Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello, 38400 Puerto de la Cruz, Santa Cruz de Tenerife. juancoellobravo@gmail.com

Palabras clave: plagioclasa, mezcla de magmas, ablación laser ICP-MS, erupción de La Palma 2021.

Resumen

La mezcla de magmas en un *mush* es un detonante eruptivo frecuente que puede modular la composición de las lavas. Los cristales de plagioclasa son un excelente archivo de los procesos de mezcla, pero en basaltos de islas oceánicas suelen aparecer como una fase tardía en la matriz. En la erupción de 2021 en La Palma aparecen excepcionalmente macrocristales de plagioclasa (0,3–2,3 mm) con texturas de desequilibrio que permiten investigar las interacciones dentro de un *mush*. La erupción produjo lavas máficas porfídicas con clinopiroxeno-anfibol (tefritas) al inicio y clinopiroxeno-olivino (basanitas) a partir del 7º día. Entre los días 13º y 31º algunas muestras contienen macrocristales de plagioclasa con contrastes composicionales entre sus núcleos (antecristales evolucionados de textura homogénea y composición andesina: An_{30-52}) y bordes (de textura anubarrada y composición labradorita: An_{50-64}). Estos bordes son similares en composición a los microcristales de la matriz (labradorita: An_{54-66}) cogenética con el líquido basanítico emitido. Los mapas elementales con espectrometría de masas acoplada a laser indican que los elementos traza también cambian bruscamente entre los núcleos de los antecristales y los bordes/matriz (p.e., Sr; 3352-5139 vs. 1624-3097 ppm). Esos contrastes sugieren el reciclado de un *mush* magmático evolucionado por la recarga de magma basanítico, en un momento en que los datos geoquímicos e isotópicos de la matriz indican una mezcla magmática eficiente (Ubide et al., 2023).

Abstract

Magma mixing in mush zones constitutes a common eruption trigger and modulates the composition of erupted lavas. The 2021 La Palma eruption included rare macrocrysts of plagioclase (0.3-2.3 mm length) with disequilibrium textures that afford investigation of mush mixing. The eruption produced mafic, porphyritic lavas with clinopyroxene-amphibole at the start of the eruption (tephrites) and clinopyroxene-olivine from day 7 (basanites). From days 13 to 31, some lavas contained plagioclase macrocrysts with compositional contrasts between cores (evolved antecrysts of homogeneous textures and andesine compositions An_{30-52}) and rims (An_{50-64} labradorite with spongy textures). The rims are similar in composition to matrix microlites (An_{54-66}), cogenetic with the erupted basanite liquid. Elemental mapping via LA-ICP-MS indicates trace element compositions change abruptly between antecrysts cores (e.g., 3352-5139 ppm Sr) and rims and microlites (1624-3097 ppm Sr). Such contrasts suggest recycling of distinctly evolved plagioclase-bearing mush with basanite magma, at a time when elemental and Sr isotope analysis of volcanic matrix indicates mixing between discrete magma batches (Ubide et al., 2023).

Referencias

Ubide, T. Márquez, Á., Ancochea, E., Huertas, M. J, Herrera, R., Coello-Bravo, J. J, Sanz-Mangas, D., Mulder, J., MacDonald, A., Galindo, I. (2023) *Sci. Adv.*, 9 eadg4813.

Impactos de la erupción volcánica de La Palma en 2021 sobre los recursos de agua subterránea. (Parte III): modelización geoquímica

Assessment of the 2021 La Palma volcanic eruption impacts on the quality of groundwater resources. (Part III): geochemical modelling

J. Jimenez[1], A. García-Gil[1], S. Gasco Cavero[2], C. Baquedano[1], MÁ. Marazuela[1], J. Martínez-León[1], N. Cruz-Pérez[3], C. Laspidou[4], J.C. Santamarta[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España. jon.jimenez@igme.es, a.garcia@igme.es, c.baquedano@igme.es, ma.marazuela@igme.es, j.martinez@igme.es
2 Departamento de Salud de Madrid. Ayuntamiento de Madrid, España. samantagc@hotmail.com
3 Departamento de Ingenieria Agraria y Ambiental. Universidad de La Laguna. ncruzper@ull.edu.es, jcsanta@ull.edu.es
4 Departamento de Ingenieria Civil, Universidad de Tesalia, Volos, Grecia. laspidou@uth.gr

Palabras clave: La Palma, erupción volcánica, agua subterránea, modelización geoquímica.

Resumen

Se ha desarrollado la modelización geoquímica del impacto de la reciente erupción en 2021 del volcán Tajogaite en la isla de La Palma sobre sus recursos hídricos subterráneos. Se realizaron muestreos de agua durante y después de la erupción en 15 puntos monitorizados cerca del volcán Tajogaite, analizándose elementos mayoritarios, menores y traza. Se calcularon los índices de saturación (IS) respecto a los principales minerales primarios de las rocas basálticas del reservorio, utilizando el código PHREEQC, y se realizaron simulaciones de entrada de CO_2 volcánico en disolución y de interacción agua-roca. La erupción dio lugar a aumentos significativos en la conductividad eléctrica, Na^+, Ca^{2+}, SiO_2 y SO_4^{2-}. Además, a través de las simulaciones se calculó un aumento en el CO_2 de origen volcánico disuelto de hasta 5 mmol/L de este gas en la mayoría de los puntos muestreados, con la consiguiente disminución en el pH de hasta - 0.6 puntos. Los cálculos de PHREEQC muestran que la acidificación debida a la entrada de CO_2 dio lugar a la subsaturación con respecto al vidrio basáltico, polimorfos de la sílice, albita y anortita, incrementando el potencial de disolución de las rocas basálticas en los reservorios. Además, las simulaciones indicaron que, junto con la disolución de CO_2 volcánico y la subsaturación, el principal proceso que da lugar a los incrementos observados de Na^+, Ca^{2+}, SiO_2 y SO_4^{2-} es la evolución de las aguas hacia las composiciones extremas o *end-members* de los fluidos hidrotermales representados por la surgencia de Fuente Santa de la Palma, así como hacia la composición del agua de mar, mostrando una mayor influencia de fluidos hidrotermales y agua marina en las aguas subterráneas durante y después de la erupción volcánica de 2021.

Abstract

The geochemical modeling of the hydrochemical impacts derived from the 2021 volcanic eruption in La Palma Island on its groundwater resources has been developed. 6 water sampling campaigns were conducted during and after the eruption at 15 monitored points near the Tajogaite volcano, analyzing major, minor, and trace elements. Saturation indices (SI) with respect to the primary minerals of the basaltic rocks in the reservoir were calculated using the PHREEQC geochemical modelling code, and simulations of volcanic CO_2 input into solution and water-rock interaction were performed. The eruption led to significant measured increases in electrical conductivity (EC), Na^+, Ca^{2+}, SiO_2, and SO_4^{2-}. Additionally, simulations estimated an increase in dissolved volcanic CO_2 of up to 5 mmol/L of this gas in most sampled groundwaters, resulting in a subsequent pH decrease of up to -0.6 units. PHREEQC calculations showed that acidification due to CO_2 input resulted in undersaturation with respect to basaltic glass, silica polymorphs, albite, and anorthite, increasing the potential for basaltic rock dissolution in the reservoirs. Furthermore, simulation results indicated that, along with volcanic CO_2 dissolution and undersaturation, the main process leading to observed increases in Na^+, Ca^{2+}, SiO_2, and SO_4^{2-} was the evolution of waters towards extreme compositions or end-members of an hydrothermal fluid represented by the Fuente Santa de la Palma spring, as well as towards seawater composition, demonstrating a greater influence of hydrothermal fluids and seawater in groundwater hydrochemistry during and after the volcanic eruption.

Propiedades magnéticas de los depósitos piroclásticos del volcán Tajogaite (La Palma, Islas Canarias) y su aportación al conocimiento sobre la evolución de la erupción de 2021.

Magnetic properties of the pyroclastic deposits of the Tajogaite volcano (La Palma, Canary Islands) and their implications for the evolution of the 2021 eruption.

J. C. Larrasoaña[1,2], M. P. Mata[3†], J. I. Pérez-Landazabal[2], C. Gómez-Polo[2], E. Garayo[2], J. I. Espeso[4], A. López-Ortega[2], M. A. Rodríguez-Pascua[5], M. A. Perucha[5], J. Martínez-Martínez[5], R. Pérez-López[5], J. López-Gutiérrez[5], J. F. Mediato[5], J. Vegas[5], I. Galindo[6], N. Sánchez[6]

1 CN IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza, 50059 Zaragoza. jc.larra@igme.es
2 Dpto. Ciencias & INAMAT[2], Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, Navarra. ipzlanda@unavarra.es, gpolo@unavarra.es, eneko.garayo@unavarra.es, alberto.lopez@unavarra.es
3 CN IGME, CSIC, 28760 Tres Cantos, Madrid.
4 Dpto. de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, Cantabria. jose.espeson@unican.es
5 CN IGME, CSIC, 28003, Madrid. ma.rodriguez@igme.es, ma.perucha@igme.es, javier.martinez@igme.es, r.perez@igme.es, j.lopezgu@igme.es, j.vegas@igme.es, jf.mediato@igme.es
6 CN IGME, CSIC, Unidad de Canarias, 35003 Las Palmas de Gran Canaria. i.galindo@igme.es, n.sanchez@igme.es

Palabras clave: magnetismo de rocas, titanomagnetita, tefra, La Palma, Islas Canarias

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de propiedades magnéticas del material piroclástico acumulado en dos secciones distales situadas alrededor del volcán Tajogaite (Cumbre Vieja, La Palma, Islas Canarias) durante su erupción de finales del 2021. La combinación de propiedades magnéticas y observaciones realizadas con el microscopio electrónico de barrido (SEM) indican que el principal mineral magnético presente en las tefras estudiadas es la titanomagnetita, que aparece como partículas de distintos tamaños, texturas y composición. Tanto la concentración como el tamaño de grano y el contenido en Ti de la titanomagnetita son mayores durante los primeros 20 días de la erupción, mientras que disminuyen paulatinamente entre esa fecha y el cese de la erupción. Estas variaciones se relacionan con la emisión inicial de un magma tefrítico enfriado y diferenciado lentamente en un reservorio superficial (8-15 km), que evoluciona posteriormente a una composición basanítica, menos diferenciada, asociada a un reservorio más profundo (30-40 km) y a unas velocidades de enfriamiento más rápidas. Las concentraciones más bajas de titanomagnetita se observan en las tefras emitidas durante las dos últimas semanas de la erupción, de manera que podrían estar relacionadas con el agotamiento del reservorio profundo y el final de la erupción.

Abstract

In this work we present a rock magnetic study of the pyroclastic material accumulated in two distal sections located around the Tajogaite volcano (Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands) during its 2021 eruption. The combination of magnetic properties with scanning electron microscopy (SEM) observations indicates that the main magnetic mineral in the studied tephra is titanomagnetite, which is present as particles of different sizes, textures and composition. The highest concentration, grain size and Ti content of titanomagnetite are observed during the first 20 days of the eruption, and gradually decrease from that date till the end of the eruption. These variations are related to the initial emission of a slowly cooled, tephritic magma differentiated in a superficial reservoir (8-15 km) that subsequently evolved to a less differentiated basanitic composition, associated with a deeper reservoir (30-40 km) cooled at faster rates. The lowest concentrations of titanomagnetite are observed in the tephra emitted during the last two weeks of the eruption, apparently linked to the depletion of the deep reservoir and the end of the eruption.

Sedimentos detríticos de la plataforma insular en el oeste de La Palma (Tazacorte) asociados a la erupción volcánica de Tajogaite en 2021.

Insular shelf detrital sediments in the west of La Palma (Tazacorte) associated to the 2021 Tajogaite volcanic eruption.

M.A. López-Rodríguez[1], I. Menéndez[1] y J. Mangas[1]

1 Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. maria.lopez253@alu.ulpgc.es; inmaculada.menendez@ulpgc.es, jose.mangas@ulpgc.es

Palabras clave: análisis de procedencia, sedimentos marinos detríticos, petrografía, erupción Tajogaite, La Palma.

Resumen

La erupción del Tajogaite (La Palma), en otoño de 2021, dio lugar a la formación de un cono volcánico y varios flujos lávicos, dos deltas de lava en zonas costeras del municipio de Tazacorte y una significativa deposición de piroclastos de caída, contribuyendo a la creación de nuevos depósitos sedimentarios detríticos emergidos y sumergidos. Se llevó a cabo un análisis de 18 muestras de sedimentos de la plataforma insular de Tazacorte, mediante análisis microscópico petrográfico, utilizando el método de conteo de puntos, con el objetivo de caracterizar la composición de los granos de tamaño arena e identificar posibles fuentes. Se distinguieron cuatro categorías distintas de componentes: fragmentos de roca volcánica, granos monominerales, bioclastos e intraclastos. Los sedimentos se clasificaron como arenas volcanoclásticas con bajo contenido de bioclastos e intraclastos basándose en las proporciones relativas de estos componentes. Los componentes dominantes incluyeron fragmentos de roca volcánica con texturas *en tableta* y granos monominerales, principalmente clinopiroxeno, olivino y minerales opacos, en concordancia con los productos eruptivos del Tajogaite (tefritas-basanitas). Además, la abundancia de líticos volcánicos vítreos y feldespatos en sectores específicos sugiere la influencia de fuentes alternativas como los materiales volcánicos del Plio-Cuaternario de la Caldera de Taburiente. Este estudio representa el primer análisis de procedencia de sedimentos detríticos en las Islas Canarias occidentales.

Abstract

The eruption of Tajogaite (La Palma) in autumn 2021 led to the formation of a volcanic cone, several lava flows, two lava deltas in coastal areas of the municipality of Tazacorte and a significant deposition of fall pyroclasts, contributing to the creation of new emerged and submerged detrital sedimentary deposits. An analysis of 18 sediment samples from the Tazacorte island platform was carried out through petrographic microscopic analysis, using the point counting method, with the objective of characterizing the composition of sand-sized grains and identifying possible sources. Four different categories of components were distinguished: volcanic rock fragments, monomineral grains, bioclasts and intraclasts. The sediments were classified as volcaniclastic sands with low content of bioclasts and intraclasts based on the relative proportions of these components. The dominant components included volcanic rock fragments with lathwork textures and monomineral grains, mainly clinopyroxene, olivine and opaque minerals, consistent with the Tajogaite eruptive products (tephrites-basanites). Furthermore, the abundance of glassy volcanic lithics and feldspars in specific sectors suggests the influence of alternative sources such as Plio-Quaternary volcanic materials from the Caldera de Taburiente. This study represents the first provenance analysis of detrital sediments in the western Canary Islands.

Evaluación del impacto en las aguas subterráneas del dióxido de carbono emitido en la erupción del Volcán de Tajogaite (La Palma)

Assessment of groundwater impact of the carbon dioxide emitted in the Tajogaite volcanic eruption (La Palma)

R. Marrero[1], M. Mejías[2], J. Jiménez[3], T. Peinado[3], M.A. Fernández[4], M. Meléndez[5], C. Camuñas[2] y F. Lorenzo[6]

1 CN IGME-CSIC. C/ Alonso Alvarado, 43, 2ºA. 35003 Las Palmas de Gran Canaria. r.marrero@igme.es
2 CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. m.mejias@igme.es, c.camunas@igme.es
3 CN IGME-CSIC. Urbanización Alcázar del Genil, 4. Edif. Zulema, Bajo. 18006 Granada. j.jimenez@igme.es, t.peinado@igme.es
4 CN IGME-CSIC. Edificio Estación Experimental de Zonas Áridas. Ctra. de Sacramento, s/n, La Cañada de San Urbano. 04120 Almería. ma.jurado@igme.es
5 CN IGME-CSIC. C/ Matemático Pedrayes, 25. 33005 Oviedo. m.melendez@igme.es
6 Consejo Insular de Aguas de La Palma. Avenida Marítima 34. 38700. Santa Cruz de La Palma. fernando.lorenzo@cablapalma.es

Resumen: La erupción del volcán de Tajogaite, en Cumbre Vieja (La Palma) en el año 2021, emitió cantidades excepcionalmente elevadas de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. No obstante, es muy posible que una proporción considerable de CO_2 haya interaccionado con las aguas subterráneas, disolviéndose y transportándose en ellas hasta zonas relativamente distantes. La composición físico-química e isotópica de los gases disueltos en las aguas subterráneas ratifica que existe una contribución significativa de gases endógenos, principalmente dióxido de carbono, al acuífero. El objetivo de este estudio se centra en ayudar a delimitar las zonas cuyas aguas subterráneas pueden estar actualmente afectadas por el aporte de gases endógenos.

Palabras clave: dióxido de carbono, gases disueltos, aguas subterráneas, Tajogaite, La Palma.

Abstract: *The Tajogaite volcanic eruption that took place at Cumbre Vieja (La Palma) in 2021 emitted exceptionally high amounts of carbon dioxide (CO_2) into the atmosphere. However, it is quite possible that a considerable proportion of CO_2 has interacted, dissolved, and transported with groundwater to relatively distant areas. The physicochemical and isotopic composition of dissolved gases in groundwater have shown that there is a significant contribution of endogenous gases, mainly carbon dioxide, to the aquifer. The objective of this study is focused on helping to delimit the areas whose groundwaters may be currently affected by the contribution of endogenous gases.*

Key words: *carbon dioxide, dissolved gases, groundwater, Tajogaite, La Palma*

INTRODUCCIÓN

Entre el 19 de septiembre y el 13 de diciembre de 2021, la erupción del volcán de Tajogaite, en la isla de La Palma, emitió cantidades excepcionalmente elevadas de dióxido de carbono a la atmósfera (Burton *et al*., 2022). Es muy posible que una proporción considerable del CO_2 emitido por el magma haya interaccionado con las aguas subterráneas, disolviéndose en ellas y modificando las características físico-químicas e isotópicas de las mismas, antes, durante y después de la erupción (Amonte et al., 2022; García-Gil et al., 2023).

El Consejo Insular de Aguas de La Palma (CIALP), como Organismo de Cuenca de la Demarcación Hidrográfica de La Palma, valoró la posibilidad de que este fenómeno pudiera ocasionar algún tipo de afección sobre las aguas subterráneas. En este marco, el CIALP y el Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC) formalizaron un contrato de apoyo tecnológico para llevar a cabo un estudio hidrogeológico preliminar, a nivel local y regional (Jiménez-Sánchez et al., 2022) y, posteriormente, ha dado lugar a la formalización de un convenio de colaboración entre ambas instituciones.

El objetivo principal de este estudio es caracterizar la abundancia, distribución y origen de los gases disueltos en las aguas subterráneas, con el fin de ayudar a delimitar las zonas de la isla cuyos recursos hídricos pueden estar actualmente afectados por el aporte de gases endógenos asociados a la erupción del volcán de Tajogaite.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La isla de La Palma es, junto con El Hierro, la isla más joven del archipiélago Canario (< 4 M.a.) y la que ha experimentado un mayor número de erupciones históricas (un total de 8 entre el s. XV y el s. XXI), todas en el edificio volcánico de Cumbre Vieja, en la mitad meridional de la isla. La secuencia volcánica de La Palma consiste, a grandes rasgos, en un vulcanismo submarino y una fase subaérea, constituida a su vez por varios edificios volcánicos superpuestos (Carracedo et al., 2001), en los que se pueden distinguir 3 unidades principales:

(1) *Complejo Basal:* abarca el edificio submarino y constituye la base de las estructuras posteriores.
(2) *Escudo Norte*: con una gran extensión, ocupa las zonas central y norte de la isla, y está formado por varios edificios volcánicos superpuestos, siendo de más antiguos a más modernos: Garafía, Taburiente I, Taburiente II y Bejenado.
(3) *Edificio de Cumbre Vieja o Dorsal*: extenso volcán poligénico de 220 km^2 de superficie que ocupa la mitad meridional de la isla y está compuesto fundamentalmente por lavas alcalinas y depósitos piroclásticos.

La recarga de aguas subterráneas en la isla de La Palma procede, casi exclusivamente, de la infiltración del agua de lluvia, con una pequeña parte de retornos de riego (BOC, 2018). Ésta se produce preferentemente en la zona de cumbres y en la vertiente nororiental, donde tienen lugar las mayores precipitaciones (Fig. 1), y se favorece por la elevada permeabilidad de los materiales volcánicos, más modernos, que recubren la superficie. La descarga natural se realiza a través de manantiales, principalmente en la zona central de la isla, y hacia el mar, de forma submarina y/o en la zona intermareal.

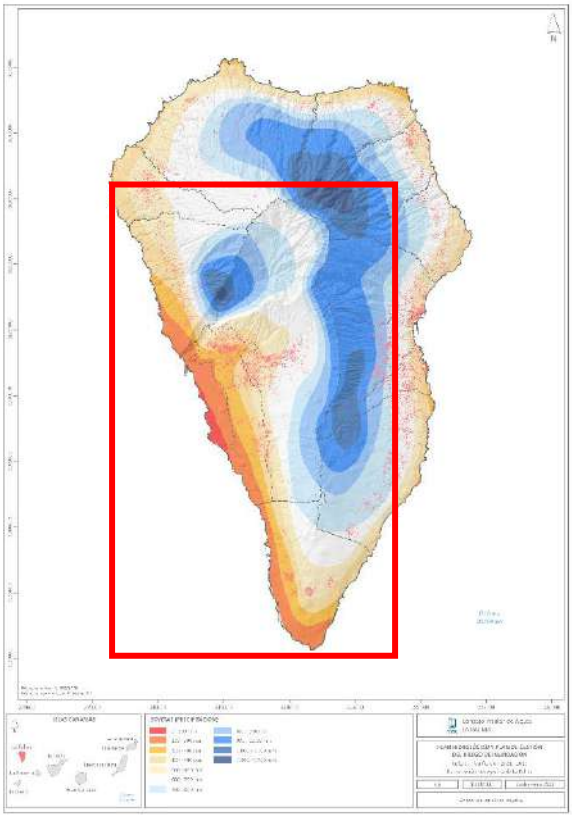


FIGURA 1. *Mapa de isoyetas de La Palma. Fuente: CIALP (https://lapalmaaguas.com/). Rectángulo rojo: área de estudio (ver Fig. 2).*

La captación de las aguas subterráneas es generalmente a través de galerías en las zonas de cumbres y medianías, y se realiza por medio de pozos y pozos-galerías, en las zonas costeras. El caudal que captan el conjunto de las captaciones era de 66 hm^3, para el año 2015 (BOC, 2018).

La complejidad geológica e hidrogeológica de la isla, junto con los sistemas de aprovechamiento y la afección por nitratos, han sido los factores condicionantes de la actual delimitación de las Masas de Agua Subterránea (MASb). El vigente Plan Hidrológico define 5 MASb (Fig. 2): LP001 Insular-Vertientes, constituye el acuífero principal y engloba el acuífero Coebra; LP002 Costero, delimitado por la ubicación de la mayor parte de los pozos funcionales; LP003 Complejo Basal, de escaso interés hidrogeológico; LP004 Dorsal Sur, abarca el edificio Cumbre Vieja y en la que se ha detectado presencia de CO_2 volcánico, que deteriora la calidad de las aguas; LP005 Valle de Aridane-Tazacorte, delimitada debido a la mala calidad del agua por procesos puntuales de intrusión marina incipiente y contaminación difusa por NO_3^- (BOC, 2018).

El acuífero Coebra, en la MASb LP001, drena tanto hacia el interior de la Caldera de Taburiente como hacia el exterior, principalmente a través de los manantiales de Marcos y Cordero (Fig. 2), con un caudal conjunto superior a los 50 l/s.

METODOLOGÍA

Un total de 10 puntos de muestreo de aguas subterráneas fueron seleccionados para analizar los gases disueltos. En la Tabla I se resumen las principales características:

Nombre	Facies Hidroquímica	Características
El Salto	Bicarbonatada sódica	Pozo canario de 108,59 m + 2 Galerías en fondo
San Miguel	Bicarbonatada sódica	Pozo canario de 31,44 m + 2 Galerías en fondo
Charco Verde	Clorurada sódica	Surgencia en zona costera, localizada en el interior de una caseta
Dos Aguas	Bicarbonatada-sulfatada cálcica	Sondeo geotécnico artesiano de pocos metros.
El Tablero	Bicarbonatada sódica cálcica	Pozo canario de 117 m + 2 galerías de fondo
Fuente Santa (Poceta F)	Clorurada sódica	Surgencias a lo largo de un túnel o galería de 200 m de longitud con 3 pocetas (A, B y C) y un ramal derecho, con 3 pocetas (D, E y F). Muestra de la poceta F, la más profunda y de mayor temperatura y gases
La Prosperidad	Bicarbonatada sódica	Pozo canario de 55 m + galería de fondo de 2343 m.
San Antonio	Bicarbonatada sódica-magnésica	Galería de 200 m + sondeo de 16 m en bocamina
San Isidro	Bicarbonatada sódica-magnésica	Pozo canario de 80 m + galería de fondo
Zona Alta	Bicarbonatada sódica	Pozo canario de 76 m + galería de fondo

TABLA I. *Principales características de los puntos de muestreo de los gases disueltos en las aguas subterráneas de la isla de La Palma.*

En cada punto seleccionado se comprobó su idoneidad, verificando que las características constructivas, de la propia surgencia y/o del régimen de bombeo permitieran garantizar la representatividad de la muestra y minimizar la posibilidad de contaminación con

el aire atmosférico. Los 10 puntos de muestreo seleccionados se sitúan en el interior de La Caldera de Taburiente, a lo largo del Barranco de Las Angustias, en el Barranco de Tenisca y en la costa occidental de la isla de La Palma (Fig. 2).

Para la toma de muestra y posterior análisis de los gases disueltos se siguió el método descrito por Capasso e Inguaggiato (1998). Las muestras se analizaron en el laboratorio del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) en Palermo, donde se determinó tanto la concentración de CO_2 disuelto, como la relación isotópica de $\delta^{13}C$ del carbono inorgánico total disuelto ($\delta^{13}C_{TDIC}$). La composición química de la fase gaseosa disuelta se obtuvo mediante un cromatógrafo de gases y teniendo en cuenta los coeficientes de solubilidad (coeficiente de Bunsen "β") para cada especie de gas, el volumen de gas extraído y el volumen de la muestra de agua (Italiano et al., 2014). Los valores $\delta^{13}C_{TDIC}$, se determinaron mediante extracción ácida, en un espectrómetro de masas Finnigan Delta S (precisión ±0,1‰). Al mismo tiempo, se analizó en un laboratorio acreditado la composición físico-química de las muestras de aguas, obteniéndose, entre otros parámetros, la concentración del carbono inorgánico disuelto total.

RESULTADOS

La concentración de CO_2 disuelto en las aguas muestreadas varía entre 0,47 y 53,87 % Vol., con un valor promedio de 15,15 %. En la Figura 2**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se ha representado la distribución espacial de la concentración de CO_2 en las muestras de gases disueltos en las aguas analizadas.

Los resultados obtenidos reflejan que los valores de CO_2 disuelto en todas las muestras son mucho más elevados que la concentración típica en el aire (0,04 % Vol.) y en el agua saturada en aire (0,034 % Vol.), excepto en las muestras de La Prosperidad, El Tablero y Zona Alta, todos ubicados en el Barranco de Las Angustias (Fig. 2), donde los valores son mucho menores. La máxima concentración de CO_2 disuelto se ha medido en la surgencia gaseocarbónica del sondeo de Dos Aguas (54 % Vol.), en el interior de La Caldera de Taburiente, como era de esperar a tenor de los elevados contenidos previos medidos por otros autores en el burbujeo de gases en el mismo punto de muestreo (>95%) (Torres-González et al., 2020; Padrón et al., 2022). A su vez, también se observa que, descartando Dos Aguas que presenta una fuerte contribución de CO_2 (gas), existe una correlación positiva con la concentración de carbono inorgánico disuelto total en las aguas (Fig. 3).

En las surgencias termo-minerales costeras de Charco Verde y Fuente Santa, así como en la galería San Antonio, y en los pozos San Isidro y El Salto, se han medido valores muy similares, entre 14 y 22 % Vol., indicando que en todos ellos existe una fuerte contribución de CO_2 endógeno al acuífero, como apuntan los datos de isótopos estables del carbono inorgánico disuelto total ($\delta^{13}C_{TDIC}$) de la mayoría de las muestras, que presentan firmas isotópicas entre -9 y -6 ‰ (V-PDB) (Fig. 3).

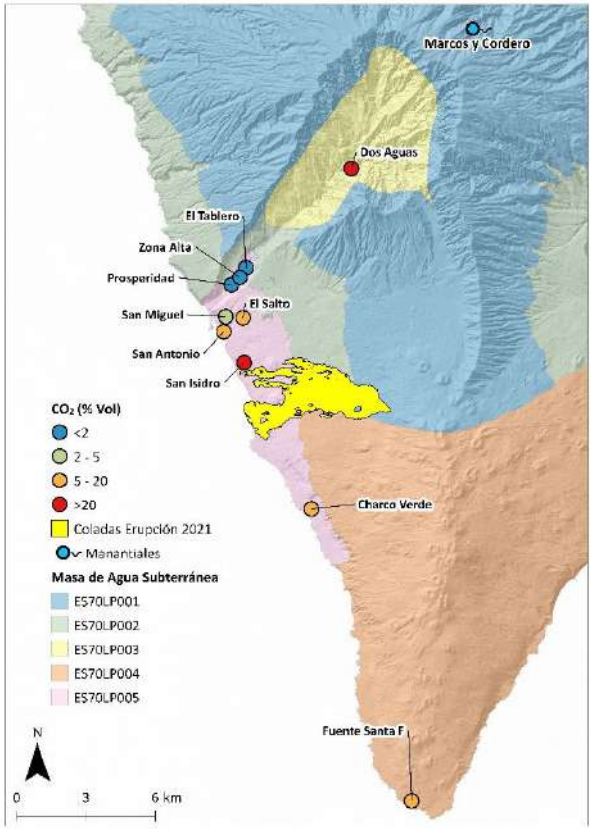


FIGURA 2. *Distribución espacial de la concentración de CO_2 en las muestras de gases disueltos en las aguas analizadas en la campaña de 2023.*

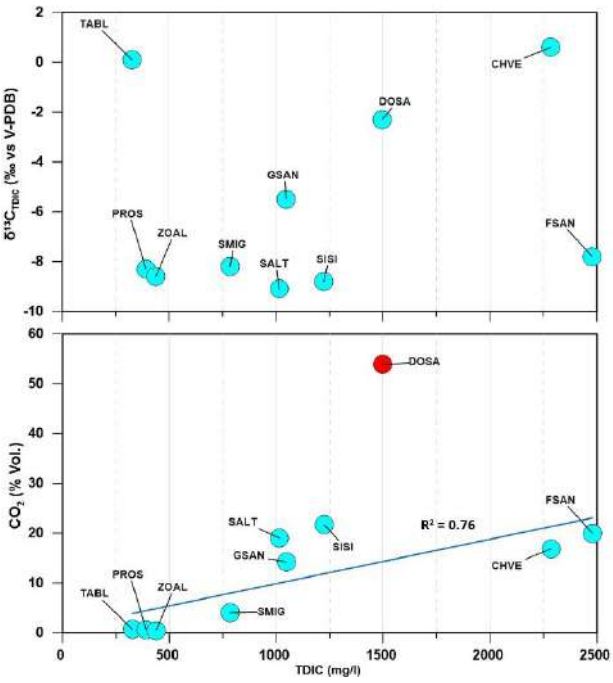


FIGURA 3. *Concentración del carbono inorgánico disuelto total (TDIC, total dissolved inorganic carbon) frente a la concentración de*

CO_2 (gas) disuelto (arriba) y frente a la firma isotópica del $\delta^{13}C_{TDIC}$ (abajo) en las aguas analizadas.

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de la composición físico-química e isotópica de los gases disueltos obtenidos han permitido observar que la mayoría de los puntos presentan una contribución significativa de gases endógenos, principalmente dióxido de carbono. En los 3 puntos de muestreo localizados en el Barranco de Las Angustias (los pozos El Tablero, Zona Alta y La Prosperidad), la contribución endógena en sus aguas es relativamente menos intensa que en las otras 4 captaciones (San Isidro, San Antonio, San Miguel y El Salto). Este resultado es coherente con el hecho que, según la información disponible, en la atmósfera interior de estas 4 captaciones se han empezado a detectar elevadas concentraciones de dióxido de carbono desde, como mínimo, abril-mayo de 2023 hasta la actualidad (enero de 2024). A excepción de Dos Aguas, Fuente Santa y Charco Verde, en el resto de estos puntos no se tiene constancia de la existencia previa a la erupción de estas anomalías en la atmósfera exterior. Esta situación se puede interpretar, por tanto, como una consecuencia directa de una fuerte contribución de CO_2 endógeno al acuífero.

Se concluye finalmente que las zonas próximas a la erupción es donde previsiblemente se está produciendo o se ha producido la mayor afección al acuífero debido a la interacción con los fluidos endógenos (principalmente dióxido de carbono) asociados con el proceso eruptivo. En una fase posterior, las aguas subterráneas que se encuentran próximas al equilibrio con este gas fluyen hacia la costa occidental, donde son captadas por los pozos-galería del Barranco de Tenisca, así como San Isidro y la galería San Antonio, o surgen en el Charco Verde. Estas aguas, al llegar a las zonas de captación, donde la presión parcial del CO_2 es mucho menor, se favorece su difusión a lo largo de la propia obra de la captación, generando concentraciones anómalas de CO_2 en la atmósfera de las mismas.

REFERENCIAS

Amonte, C., Melián, G.V., Asensio-Ramos, M., Pérez, N.M., Padrón, E., Hernández, P.A., y D'Auria, L. (2022): Hydrogeochemical temporal variations related to the recent volcanic eruption at the Cumbre Vieja Volcano, La Palma, Canary Islands. Frontiers in Earth Science, 10. https://10.3389/feart.2022.1003890

BOC. (2018): Boletín Oficial de Canarias. Decreto 169/2018, de 26 de noviembre, por el que se aprueba definitivamente el Plan Hidrológico Insular de la Demarcación Hidrográfica de La Palma. BOC-A-2018-237-5637.

Burton, M., Aiuppa, A., Asensio-Ramos, M., La Spina, A., Allard, P., Liu, E., Zanon, V., Pardo Cofrades, A., Barrancos, J., Wood, K., Bitetto, M., Padrón, E., Lages, J. P., Hayer, C., Cyrzan, K., Schiavi, F., Rose-Koga, E., Hernández, P., D'Auria, L. y Pérez, N. (2022): CO_2-rich emissions from alkalic magmatism in the Canary Islands, Spain. EGU General Assembly 2022, Viena, Austria, 23-27 Mayo, EGU22-5629, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5629

Capasso, G. e Iguaggiato, S. (1998): A simple method for the determination of dissolved gases in natural waters. An application to thermal waters from Vulcano Island. Applied Geochemistry, 13, 5, 631-642. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00109-1

Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., de la Nuez, J. y Pérez-Torrado, F.J. (2001): Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*, 57: 175-273.

García-Gil, A., Jimenez, J., Gasco Cavero, S., Marazuela, M.A., Baquedano, C., Martínez-León, J., Cruz-Pérez, N., Laspidou, C., Santamarta, J.C. (2023). Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater resources (part II): Hydrochemical impacts, Groundwater for Sustainable Development, Volume 23, 2023, 100992, ISSN 2352-801X, https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100992.

Italiano, F., Yuce, G., Uysal, I.T., Gasparon, M. y Morelli, G. (2004): Insights into mantle-type volatiles contribution from dissolved gases in artesian waters of the Great Artesian Basin, Australia. Chemical Geology, 378–379, 75-88, https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.04.013

Jiménez-Sánchez, J., Meléndez-Asensio, M.L., Peinado-Parra, T., Fernández-Jurado, M.A., Mejías-Moreno, M., Marrero-Díaz, R., Ballesteros-Navarro, B.J. y Camuñas-Palencia, C. (2022): Memoria final del contrato de apoyo tecnológico al CIALP para la valoración de la posible afección del volcán de Tajogaite a las masas de agua subterránea de la demarcación hidrográfica de La Palma. Documento inédito, 124 p. CN IGME-CSIC, Madrid.

Padrón, E., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Sumino, H., Melián, G. V., Alonso, M., Rodríguez, F., Asensio-Ramos, M., y D'Auria, L. (2022): Early precursory changes in the $^3He/^4He$ ratio prior to the 2021 Tajogaite eruption at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. Geophysical Research Letters, 49, e2022GL099992. https://doi.org/10.1029/2022GL099992

Torres-González, P.A. Luengo-Oroz, N., Lamolda, H., D'Alessandro, W., Albert, H., Iribarren, I., Moure-García, D. y Soler, V. (2020): Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 392, 106757. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106757

Mediciones de concentración de CO2 en el suelo, relación isotópica y reflujo para la exploración geotérmica en La Palma, Islas Canarias.

Soil gas CO2 concentration, isotopic ratio and efflux measurements for geothermal exploration in La Palma, Canary Islands.

A. Martín Lorenzo [1,2], K. Copete-Murillo[3], A. Reyes[4], A. Gironés[1,2], G.V. Melián[1], M. Asensio-Ramos[1], F. Rodríguez[1], E. Padrón[1,2], G.D. Padilla[1,2], P. A. Hernández[1,2] y N. M. Pérez[1,2]

1 Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), Puerto de la Cruz, Tenerife, Islas Canarias. gladys@iter.es; maria.asensio@involcan.org; fatima.rguez83@gmail.com
2 Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER), Granadilla de Abona, Tenerife, Islas Canarias. amartin@iter.es; agirones@iter.es; eleazar@iter.es; german@iter.es; phdez@iter.es; nperez@iter.es
3 Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 16486, Colombia. karencopet@gmail.com
4 Universidad de Huelva, Huelva, 21004, España. angel.reyes@alu.uhu.es

Palabras clave: Prospección geoquímica, flujo de CO2, sistema geotérmico potencial, relación isotópica.

Resumen

La Palma es una de las islas volcánicamente más activas del archipiélago. La isla experimentó una erupción volcánica del 19 de septiembre al 13 de diciembre de 2021, que tuvo importantes impactos sociales, económicos y científicos. Este estudio se llevó a cabo entre julio y septiembre de 2023 y presenta los resultados de un estudio de gases en el suelo ubicado al SW del flujo de lava de 2021. El estudio tuvo como objetivo identificar áreas permeables mediante la realización de mediciones in situ de emisiones difusas de CO_2 y el muestreo y análisis de la concentración de CO_2 y la composición isotópica. Se seleccionaron 766 sitios de muestreo en un área de unos 25 km^2, con una distancia media de 100 m entre sitios. Las concentraciones de CO_2 en el suelo oscilaron entre los valores atmosféricos típicos hasta 40.000 ppm. La composición isotópica de $\delta^{13}C$-CO_2 reveló la presencia de tres miembros distintos: CO_2 biogénico, atmosférico y endógeno. Los resultados muestran que el CO_2 en la mayoría de los sitios de muestreo está compuesto por mezclas de CO_2 atmosférico y biogénico, con algunas contribuciones de CO_2 endógeno. Asimismo, muestran una correlación significativa entre la distribución de las anomalías del gas 222Rn y los valores más altos de flujo de CO_2 en la parte oriental del área de estudio. Las mediciones de la concentración de CO_2, la relación isotópica y el flujo de CO_2 en el suelo son una técnica valiosa para la exploración superficial, ayudan a definir las áreas permeables y las posibles zonas de flujo ascendente de las posibles estructuras de los sistemas geotérmicos.

Abstract

La Palma is one of the most volcanically active islands in the archipelago. The island experienced a volcanic eruption from 19 September to 13 December 2021, which had significant social, economic, and scientific impacts. This study was carried out between July and September 2023 and presents the results of a soil gas study located SW of the 2021 lava flow. The survey aimed to identify permeable areas by conducting in-situ measurements of diffuse CO_2 emissions and sampling and analyzing CO_2 concentration and isotopic composition. A total of 766 sampling sites were selected over an area of approximately 25 km^2, with an average distance of 100 m between sites. Soil CO_2 concentrations ranged from typical atmospheric values up to 40,000 ppm. The $\delta^{13}C$ - CO_2 isotopic composition revealed the presence of three distinct members: biogenic, atmospheric and endogenous CO_2. Results show that CO_2 at most sampling sites is composed of various mixtures of atmospheric and biogenic CO_2, with some contributions from endogenous CO_2. Results also show a significant correlation between the distribution of 222Rn gas anomalies and the highest CO_2 efflux values in the eastern part of the study area. Soil gas measurements of CO_2 concentration, isotopic ratio and efflux are a valuable technique for surface exploration, helping to define permeable areas and potential upflow zones of potential geothermal system structures.

Modelización termo-reológica de coladas de lava: erupción de La Palma 2021 (Islas Canarias).

Thermo-rheological lava flow modelling during 2021 La Palma eruption (Canary Islands).

S. Martín-Velázquez[1,2], L. Antón[3] y N. Sánchez[4]

1 Dpto. Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, URJC. C/Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid. silvia.martin@urjc.es.
2 Grupo de investigación Geofísica y Geoquímica Ambiental, URJC. C/Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid.
3 Dpto. Ciencias Analíticas, Facultad de Ciencias, UNED. Paseo Senda del Rey, 9, 20840 Madrid. lanton@ccia.uned.es
4 Dpto. Investigación en Recursos Geológicos, IGME. C/ Alonso Alvarado, 43, 35003 Las Palmas de Gran Canaria. n.sanchez@igme.es

Resumen: El 19 de septiembre de 2021 se inició una erupción volcánica en la isla de La Palma. Durante los 85 días que duró la erupción, la actividad combinada efusiva y explosiva formó un nuevo cono de escoria de 187 m de altura y construyó un campo de lava de ~12 km^2. Este proceso impactó significativamente en la parte occidental de la isla, afectando a miles de edificios, plantaciones, tierras de cultivo e infraestructuras. En zonas volcánicas activas, la comprensión cuantitativa de los factores que controlan el emplazamiento de las coladas es clave para una correcta toma de decisiones pre-erupción y para la propia gestión de la emergencia. Igualmente, puede ser de utilidad para la correcta planificación urbanística y diseño de infraestructuras. El presente trabajo aborda la modelización termo-reológica de los flujos de lava de la erupción de La Palma, utilizando el módulo FLOWGO del programa Q-LavHA. Los resultados aportan información sobre las áreas de inundación y el alcance de los flujos de lava en las diferentes etapas de la erupción. La concordancia entre los modelos y la cartografía de las coladas reales revelan la aproximación metodológica presentada como potencial herramienta de pronóstico de avance de coladas durante futuras emergencias volcánicas.

Palabras clave: Q-LavHA, FLOWGO, Tajogaite, emergencia volcánica, riesgo volcánico.

Abstract: *On September 19, 2021, a volcanic eruption began on La Palma Island. During the 85-day eruption, the combined effusive and explosive activity formed a new scoria cone (187 m high) and built a lava field of ~12 km^2. The eruption significantly impacted the western side of the island, affecting thousands of buildings, plantations, farmland, and infrastructures. In active volcanic areas, the quantitative understanding of the factors that govern the location of lava flows is key to correct decision making, pre-eruption and emergency management. It can also be useful for proper urban planning and infrastructure design. The present work addresses the thermo-rheological modeling of the La Palma eruption's lava flows, using the FLOWGO module in Q-LavHA. Results provide information on the flooding areas and the extent of the lava flows during the successive eruption's stages. The agreement between the models and the mapping of real lava flows reveals the methodological approach presented in this work as a potential powerful tool for forecasting the advance of lava flows during future volcanic emergencies.*

Key words: *Q-LavHA, FLOWGO, Tajogaite, volcanic emergency, volcanic hazard*

INTRODUCCIÓN

En zonas volcánicas activas, las coladas de lava van cubriendo la superficie sucesivamente y creando nuevas tierras. Sus trayectorias pueden llegar a ser complejas ya que pueden avanzar en forma de lóbulos sinuosos que van apilándose y engrosándose a medida que van construyendo un campo de lavas. El desplazamiento y distribución de las coladas están condicionados entre otros factores por las características del relieve, del magma/lava o de los centros de emisión. La comprensión de estos elementos es fundamental para realizar una evaluación ajustada del recorrido de la lava y mitigar los peligros asociados durante una emergencia volcánica en una región poblada.

El complemento Q-LavHA (*Quantum-Lava Hazard Assessment*; Mossoux et al., 2016) para la plataforma libre de sistemas de información geográfica QGIS (https://qgis.org/es/site/) permite modelizar la probabilidad de inundación por coladas sobre un modelo digital del terreno. Los estudios que utilizan esta herramienta se centran en el ajuste del recorrido máximo de las coladas una vez que ha finalizado la erupción volcánica. Pero si se quieren estimar los peligros a lo largo del proceso eruptivo, es necesario tener en cuenta la tasa a la que la lava avanza, y que depende de aspectos tales como la temperatura, viscosidad o la tasa de emisión. Q-LavHA incorpora el módulo FLOWGO (Harris y Rowland, 2001) en el que se pueden detallar estas variables reológicas para que las coladas se paren no al recorrer una distancia establecida sino cuando su

velocidad sea cero, su temperatura alcance el *solidus* o el esfuerzo crítico en la base del canal sea mayor que el esfuerzo paralelo a la pendiente.

La erupción del 19 de septiembre de 2021 en la isla de La Palma (Islas Canarias) permaneció activa durante 85 días y afectó a un territorio densamente poblado. Sobre la fisura, por la que inicialmente se emitieron coladas de lava tefrítica, fueron creciendo conos superpuestos de escorias con una actividad estromboliana y pulsos episódicos freatomagmáticos, que generaron coladas, fuentes de lava, y columnas eruptivas de cenizas y gases. Del 19 al 26 de septiembre, el magma procedía de una cámara situada en el límite corteza-manto (Montesinos et al., 2023) y las coladas eran más viscosas (Romero et al., 2022). Posteriormente, la fuente del magma se situó en zonas más profundas (Montesinos et al., 2023), se produjo un aumento de la tasa de emisión, fueron frecuentes los desplomes de flanco, las lavas se hicieron más fluidas y su composición cambió a basanitas (Romero et al., 2022; Bonadonna et al., 2022; Ubide et al., 2023). La estructura volcánica final, el Tajogaite (también llamado volcán de Cumbre Vieja o Cabeza de Vaca), consiste en un cono alargado con seis cráteres alineados NO-SE que se eleva hasta los 1.120 m.s.n.m. y cuya altura es de 187 m. La actividad combinada efusiva y explosiva generó un campo de lavas de unos 12 km^2 (6 km de longitud y 3 km de anchura máximos), con un volumen de lavas y piroclastos de 200 x 10^6 m^3, que se extendió por la ladera occidental del edificio Cumbre Vieja y generó dos deltas de lava en la costa. Entre los numerosos daños producidos, más de 7.000 personas fueron evacuadas de sus hogares, se destruyeron o quedaron afectadas más de 2.900 edificaciones, 73 km de vías de comunicación y 370 ha de cultivo, y las pérdidas calculadas superaron los 842 millones de euros (Comisión Mixta, 2022).

La herramienta Q-LavHA fue utilizada con éxito para modelizar la extensión final del campo de lavas creado por la erupción del Tajogaite teniendo en cuenta el espesor y recorrido máximo de las coladas, los desniveles que sorteaban y los centros de emisión activos (Martín-Raya et al., 2022). En este trabajo, las coladas debían recorrer 10 km, consiguiendo con esto que alcanzasen la costa. Sin embargo, durante el proceso eruptivo, y debido a su complejidad, el avance y recorrido reales de las coladas hacia la costa no fueron constantes, dificultando en ocasiones la evaluación de escenarios durante la emergencia.

La cantidad de investigaciones multidisciplinares realizadas sobre la erupción volcánica de La Palma nos ha permitido incorporar variables reológicas en el módulo FLOWGO y explorar las posibilidades de Q-LavHA como herramienta de predicción de avance de coladas durante una emergencia volcánica. En las siguientes secciones se mostrarán los resultados de la modelización y se analizará la influencia de distintos factores en el avance y distribución de las coladas.

CARACTERÍSTICAS DE LA MODELIZACIÓN

Las trayectorias de las coladas se han modelizado en Q-LavHA sobre el modelo digital del terreno PNOA anterior a la erupción, disponible en el Instituto Geográfico Nacional (https://centrodedescargas.cnig.es), con un tamaño de píxel de 25 m. En cada modelización se han realizado 1.500 iteraciones y, para estimar la precisión de las coladas simuladas respecto a las coladas reales, se han calculado los siguientes índices de ajuste (IA) cuya suma es 1: a) $IA_{verdadero\ positivo}$, que es el área común de coladas reales y modelizadas dividida entre el área cubierta por las dos coladas, por lo que cuanto más se aproxime este valor a 1, mejor será el ajuste; b) $IA_{falso\ positivo}$, que refleja las áreas sobrestimadas en la modelización; y c) $IA_{falso\ negativo}$, que refleja las áreas infraestimadas en la modelización (Mossoux et al., 2016). En una emergencia volcánica es más problemático infraestimar las zonas que quedarán cubiertas por la lava que sobrestimarlas.

Se ha utilizado información relacionada con las fases eruptivas para caracterizar el comportamiento de la lava, y con la distribución de las coladas para establecer la evolución de su movimiento. Debido al magmatismo básico de la erupción del Tajogaite, se han utilizado los parámetros avanzados que están por defecto en el módulo FLOWGO (Mossoux et al., 2016) y además se han incluido los parámetros termo-reológicos (tasa de emisión, viscosidad, densidad) de Bonadonna et al. (2022), Castro y Feisel (2022), Romero et al. (2022) y Ubide et al. (2023). El número y posición de los centros emisión fue variando a lo largo de la erupción. La localización de los mismos y la cartografía temporal de las coladas se han obtenido de la web europea Copernicus en la que se activó la monitorización de la emergencia (https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR546). Por último, se midieron espesores de coladas en el campo de lavas y su valor medio (3 m) fue incorporado a la modelización.

MODELIZACIÓN DEL 19 AL 26 SEPTIEMBRE: INICIO DE LA ERUPCIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE COLADAS EN LA ROTONDA DE TODOQUE

Para construir la fisura de esta primera etapa se usaron los dos centros de emisión de los días 20 y 21 (Fig. 1). Las trayectorias modelizadas ocupan aproximadamente la extensión cartografiada de coladas del 26 de septiembre, con un $IA_{verdadero\ positivo}$ de 0,67, un $IA_{falso\ positivo}$ de 0,26 y un $IA_{falso\ negativo}$ de 0,07 (Fig. 2). Las trayectorias con mayores probabilidades (0,76) siguen una serie de barrancos anastomosados E-O situados al norte de Montaña Rajada, por donde se canalizó la lava el día 20 (Fig. 1, 2). Otras trayectorias de menor probabilidad bordean Montaña Rajada por el sur y después se canalizan entre Montaña Rajada y Montaña Cogote, que fue por donde continuó el flujo a partir del día 21. Sin embargo, la cartografía del día 26 incluye también el desplome de flanco que bordeó Montaña Rajada (Romero et al., 2022). Esto indicaría que este flujo también aprovechó los desniveles topográficos previos. Sin embargo, hay trayectorias que bordean

Montaña Cogote que realmente no se ocuparon hasta el 24 de noviembre. Posiblemente la topografía elevada por el desplome mantuvo preservada esta zona que no fue ocupada hasta que se abrieron nuevos focos hacia el SE.

La erupción fisural de coladas inicialmente viscosas, porque el magma había experimentado procesos de diferenciación (Romero et al., 2022; Montesinos et al., 2023), explicaría por qué las coladas se quedaron paradas varios días en la rotonda de Todoque hasta el 26 de septiembre.

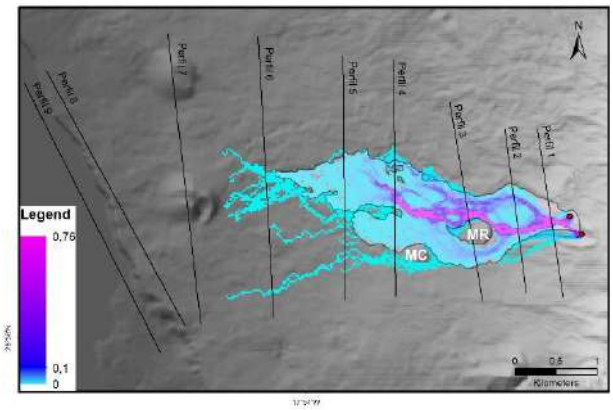


FIGURA 1. *Mapa de probabilidad de trayectorias de coladas (azul a rosa) sobre el que se superponen las coladas del 26 de septiembre (área rosa claro de contorno negro). Centros de emisión del 20 y 21 de septiembre (círculos). MC, Montaña Cogote; MR, Montaña Rajada. Fondo: modelo digital del terreno PNOA.*

MODELIZACIÓN DEL 26 AL 29 SEPTIEMBRE: AVANCE DE COLADAS HASTA LA COSTA

El 26 de septiembre se abrió un nuevo centro de emisión al NO de los anteriores (Fig. 3). Aquí hemos modelizado su efecto manteniendo el resto de los parámetros iguales a los de la fase anterior. La mayoría de las trayectorias coinciden con la cartografía del 29 de septiembre, que muestra la formación del primer delta lávico en el litoral. Los respectivos $IA_{verdadero\ positivo}$, $IA_{falso\ positivo}$ e $IA_{falso\ negativo}$ son 0,64, 0,22 y 0,14. Las trayectorias con mayor probabilidad (0,53) son similares a las del periodo anterior en la mitad oriental y continuación de estas hacia la mitad occidental (Fig. 2, 3). En este último sector, siguen valles orientados hacia el SO y después hacia el NO, bordeando Montaña Todoque y derramándose por el acantilado costero. Hay que indicar que la geometría de los deltas no se puede reproducir porque FLOWGO solo contempla la opción de coladas aéreas.

Este modelo indicaría que la apertura de un nuevo centro de emisión fue suficiente para que las coladas se movilizaran y avanzaran hasta el mar. Este cambio en la actividad coincidió con el desarrollo de sismicidad profunda, una mayor tasa de emisión y una menor viscosidad que apuntaban un ascenso de magmas más profundos. Este aporte extra de magma aumentó la deformación de la corteza y el dique-fisura se propagó hacia el NO. A pesar de la incorporación al sistema de un magma de composición diferente, según esta modelización, las lavas que se movilizaron durante este periodo debieron ser similares a las de la etapa anterior. Este hecho coincide con el cambio progresivo en la composición geoquímica detectado por Ubide et al. (2023).

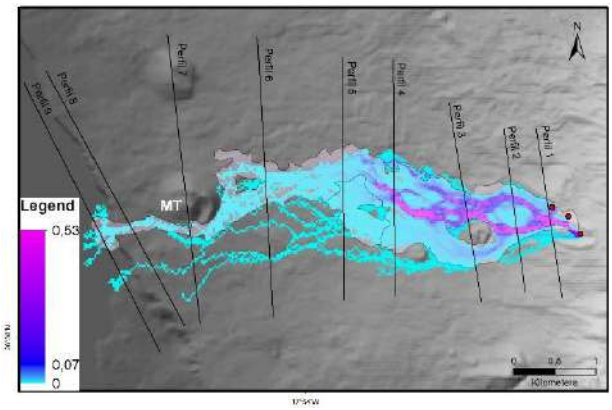


FIGURA 3. *Mapa de probabilidad de trayectorias de coladas (azul a rosa) sobre el que se superponen las coladas del 29 de septiembre (área rosa claro de contorno negro). Centros de emisión del 20, 21 y 26 de septiembre (círculos). MT, Montaña Todoque. Fondo: modelo digital del terreno PNOA.*

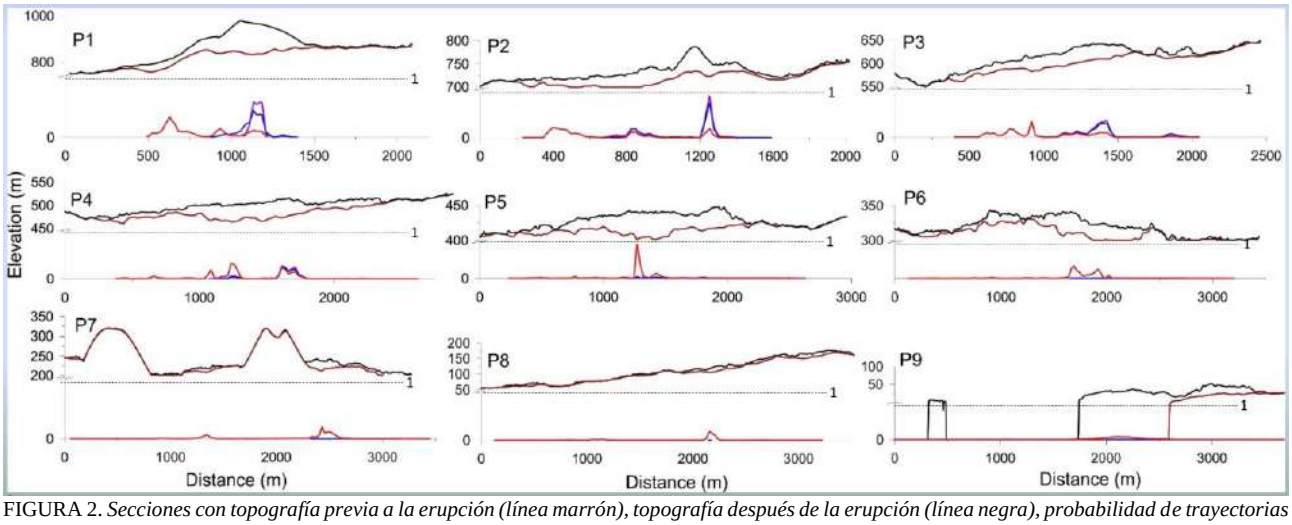


FIGURA 2. *Secciones con topografía previa a la erupción (línea marrón), topografía después de la erupción (línea negra), probabilidad de trayectorias de coladas 19-26 septiembre (línea morada), probabilidad de trayectorias de coladas 26-29 septiembre (línea azul), y probabilidad de trayectorias de coladas del 29 septiembre al 13 de diciembre (línea roja). La localización de los perfiles P1-P9 están en las figuras 2-4.*

MODELIZACIÓN DEL 29 SEPTIEMBRE AL 13 DE DICIEMBRE: AVANCE DE COLADAS HACIA EL NORTE

En esta última etapa se han incorporado la mayor tasa de emisión y menor viscosidad registradas a partir del 26 de septiembre y que se mantuvieron hasta el final de la erupción. Además, se ha tenido en cuenta la propagación de la fisura hacia el NO utilizando los dos centros de emisión más extremos del 2 de octubre (con 5 centros intermedios; Fig. 4). La distribución de las trayectorias reproduce el campo de lavas del 13 de diciembre que se extiende hasta Montaña Laguna, la bordea por el sur y genera un nuevo delta en la costa. El $IA_{verdadero\ positivo}$ es 0,62, el $IA_{falso\ positivo}$ es 0,23 y el $IA_{falso\ negativo}$ es 0,14. Las mayores probabilidades (0,58) se localizan en barrancos E-O al norte de los barrancos de mayor probabilidad de las modelizaciones anteriores (Fig. 2, 4).

Esta modelización muestra que la amplia extensión de las coladas al terminar la erupción se debió a un cambio en el proceso eruptivo originado por el ascenso de un gran volumen de fundidos más profundos y fluidos, que propagó la fisura hacia el NO. Sin embargo, algunas cuestiones no quedarían bien resueltas: a) la multitud de trayectorias entre Montaña Laguna y Montaña Todoque que llegan a la costa y generan un gran delta, b) la ausencia de trayectorias en los bordes norte y sur en las proximidades del cono, que debieron ser generados por coladas que fluían desde la topografía más elevada del cono, c) las trayectorias en la mitad sur del campo de lavas cuya topografía era diferente debido a las coladas de los días anteriores, o d) la franja estrecha de coladas del borde sur, que aísla un gran kipuka, y que fue generada en diciembre desde una nueva fisura al oeste del Tajogaite.

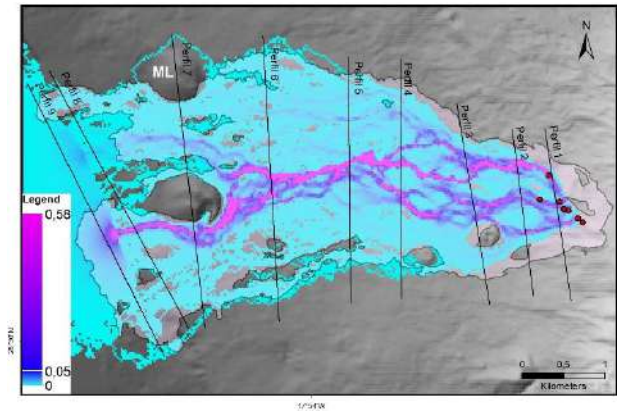


FIGURA 4. Mapa de probabilidad de trayectorias de coladas (azul a rosa) sobre el que se superponen las coladas del 13 de diciembre (área rosa claro de contorno negro). Centros de emisión del 2 de octubre (círculos). ML, Montaña Laguna. Fondo: modelo digital del terreno PNOA.

CONCLUSIONES

El presente trabajo aborda la modelización de la distribución de las coladas de lava emitidas durante la erupción de La Palma de 2021 utilizando el módulo FLOWGO de la herramienta Q-LavHA para QGIS. Se han analizado tres fases eruptivas, que abarcan todo el periodo de actividad. Las áreas cubiertas por los recorridos probables se ajustan muy satisfactoriamente a las áreas cartografiadas. Frente a otras modelizaciones que requieren definir la longitud de la colada como dato de entrada, la modelización con FLOWGO ha permitido pronosticar su avance a partir de variables reológicas y de la tasa de emisión. Esto pone de manifiesto la adecuación de la aproximación metodológica durante una erupción volcánica y su potencial utilidad para la gestión de la emergencia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto "Análisis de los condicionantes geomorfológicos en la distribución de las coladas de lava. La erupción de La Palma 2021", financiado por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED50).

REFERENCIAS

Bonadonna, C., Pistolesi, M., Biass, S., et al. (2022): Physical characterization of long-lasting hybrid eruptions: The 2021 Tajogaite eruption of Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127: e2022JB025302.

Castro, J.M. y Feisel, Y. (2022): Eruption of ultralow-viscosity basanite magma at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands. *Nature Communications*, 13: 3174.

Comisión Mixta para la reconstrucción, recuperación y apoyo a la isla de La Palma (2022): *Informe sobre las actuaciones y medidas emprendidas tras la erupción del volcán de Cumbre Vieja (La Palma), seis meses después del inicio de la emergencia*. Agencia Estatal Boletín Ofcial del Estado, Madrid, 63 p.

Harris, A.J. y Rowland, S. (2001): FLOWGO: a kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel. *Bulletin of Volcanology*, 63: 20-44.

Martín-Raya, N., Díaz-Pacheco, J., López-Díez, A., Dorta Antequera, P. y Cabrera, A. (2023): A lava flow simulation experience oriented to disaster risk reduction, early warning systems and response during the 2021 volcanic eruption in Cumbre Vieja, La Palma. *Natural Hazards*, 117: 3331-3351.

Montesinos, F.G., Sainz-Maza, S., Gómez-Ortiz, D., Arnoso, J., Blanco-Montenegro, I., Benavent, M., Vélez, E., Sánchez, N. y Martín-Crespo, T. (2023): Insights into the Magmatic Feeding System of the 2021 Eruption at Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands) Inferred from Gravity Data Modeling. *Remote Sensing*, 15: 1936.

Mossoux, S., Saey, M., Bartolini, S., Poppe, S., Canters, F. y Kervyn De Meerendre, M. (2016): Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers & Geosciences*. 97: 98-109.

Romero, J.E., Burton, M. Cáceres, F., et al. (2022): The initial phase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 431: 107642.

Ubide, T., Márquez, A., Ancochea, E., et al. (2023): Discrete magma injections drive the 2021 La Palma eruption. *Science Advance*, 9: eadg48.

Aproximación preliminar a la biorreceptividad de lavas mediante parámetros petrofísicos en el contexto del volcán Tajogaite (La Palma, Islas Canarias).

Preliminary approach to the bioreceptivity of lavas through petrophysical parameters in the context of the Tajogaite volcano (La Palma, Canary Islands).

J. Martínez-Martínez[1], J. Vegas[1], E. Fernández de Arévalo[1], S. Gutiérrez-Patricio[2], B. Cubero-García[2], N. Jiménez-Morillo[2], J. López-Gámez[3], B. Martínez-Haya[3], A. Z. Miller[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. javier.martinez@igme.es, j.vegas@igme.es, e.fernandez@igme.es

2 Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNAS, CSIC). Avda. Reina Mercedes, 10. 14012 Sevilla. Sara.gutierrez@irnas.csic.es, bcubero@irnas.csic.es, ntjm@irnas.csic.es, anamiller@irnas.csic.es

3 Center for Nanoscience and Sustainable Technologies (CNATS), Department of Physical, Chemical and Natural Systems, Universidad Pablo de Olavide, 41013 Seville, Spain. bmarhay@upo.es

Palabras clave: porosidad, capilaridad, rugosidad, vacuola, basalto,

Resumen

El campo de lavas generado tras la erupción del volcán Tajogaite (septiembre-diciembre 2021) en la isla de La Palma (Islas Canarias) ofrece un sustrato rocoso inerte idóneo para el estudio del proceso de biocolonización de lavas en islas volcánicas activas. Con el fin de estimar la susceptibilidad intrínseca del sustrato para el desarrollo de biofilms, se han identificado y muestreado cuatro tipos de lava: cordada, escoriácea, masiva y vacuolar. En todas ellas se han determinado parámetros directamente relacionados con la biorreceptividad, tales como: rugosidad superficial, porosidad conectada, distribución de tamaño de poro y coeficiente capilar. Los resultados muestran fuertes diferencias entre un tipo y otro de lava (porosidades variables entre 6% y 46%, coeficientes capilares con rangos entre 5 y 407 $g/s^{0.5}m^2$), incluso se han identificado variaciones significativas entre las superficies exteriores (enfriamiento rápido) y el interior del cuerpo de lava (enfriamiento lento) dentro de un mismo litotipo. Una segunda fase del estudio correlacionará los parámetros petrofísicos obtenidos con los resultados del ensayo de crecimiento controlado de biofilms en condiciones de laboratorio.

Abstract

The lava field generated after the eruption of the Tajogaite volcano (September-December 2021) on the island of La Palma (Canary Islands) offers an inert rock substrate very interesting for the study of the biocolonization process of lavas in active volcanic islands. In order to estimate the intrinsic susceptibility of the substrate for biofilm development, four types of lava have been identified and sampled: cordate, scoriaceous, massive and vacuolar. In all of them, parameters closely related to bioreceptivity have been determined, such as surface roughness, connected porosity, pore size distribution and capillary coefficient. The results show strong differences between one type of lava and another (porosity variations between 6% and 46%, capillary coefficients ranging from 5 to 407 $g/s^{0.5}m^2$). Moreover, significant variations have even been identified between the exterior surfaces (rapidly cooling) and the interior of the lava (slowly cooling) considering the same lithotype. A second phase of the study will correlate the petrophysical parameters obtained with the results of the controlled biofilm growth test under laboratory conditions.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto HIRES-SOM (TED2021-130683B-C22) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Análisis *in situ* mediante equipo portátil de Fluorescencia de rayos-X en la erupción de 2021 en la isla de La Palma. Aplicación ante la emergencia.

In situ analysis using portable X-ray fluorescence equipment in the eruption of 2021 on the La Palma island. Emergency application.

J.F. Mediato[1]; R. Pérez-López[1]; J. Martínez-Martínez[1]; B. Ordoñez[1]; J. Lopez-Gutierrez[1]; B. del Moral[1]; E. Bellido[1]; M.A. Rodríguez-Pascua[1]; M.A. Perucha[1]; R. Mateos[1]; M.P. Mata[1]; J.A. Díaz-Muñoz[1]; G. Lozano[1]; A.I. Montoya[1,2]; E. Galindo[1]; I. Galindo[1]; y N. Sánchez[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). 28003 Madrid. jf.mediato@igme.es
2 Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 35117 Las Palmas de Gran Canaria, Spain. isabel.montoya@ulpgc.es

Palabras clave: geoquímica, equipo portátil de fluorescencia rayos-X (p-XRF), basaltos, tefra, La Palma.

Resumen

Los equipos portátiles de fluorescencia de rayos-X (FRX portátil) se diseñaron inicialmente para la exploración minera en campo, pero en los últimos años su uso se ha extendido a otras ramas de la geología como puede ser la quimioestratigrafía o la geoarqueología. Este trabajo pretende mostrar por primera vez el uso de un FRX-portátil en la caracterización geoquímica de materiales durante una emergencia volcánica, utilizando la experiencia adquirida durante la erupción del volcán Tajogaite, en 2021, en La Palma (Islas Canarias).

El equipo empleado es una VANTA M profesional de la marca Olympus, que permite la determinación composicional de roca o sedimento, analizando hasta 32 elementos químicos, y su semicuantificación en campo, de una forma rápida y sencilla. Durante la erupción se utilizó dicho equipo para caracterizar geoquímicamente muestras de lavas y piroclastos. Algunos inconvenientes observados son:1) la imposibilidad de medir algunos elementos, como el Na; 2) las incertidumbres en la cuantificación de los elementos mayores, como Si, Al y Mg; y 3) la variabilidad en las condiciones de las medidas. Es por ello, que se ha llevado a cabo una comparación entre los resultados obtenidos con el FRX-portátil y análisis de laboratorio, de forma que elementos químicos como Rb, Zr, Y o Ba muestran unas variaciones relativas similares entre ambas técnicas. En resumen, la calibración de los datos indica que, ante un evento volcánico de condiciones similares, volcanismo monogenético, el equipo portátil de FRX puede ser una herramienta útil en la determinación de la evolución geoquímica de la erupción durante el propio evento.

Abstract

Portable X-ray fluorescence (pXRF) analyzers were initially designed for mining exploration, but in recent years their use has extended to other parts of geology such as chemostratigraphy or geoarchaeology. The objectives of this work are to show for the first time the use of a pXRF for the geochemical characterization of an eruptive process during a volcanic emergency, using the experience acquired in the eruption of the Tajogaite volcano (2021, La Palma, Canary islands).

pXRF used is a professional VANTA M from Olympus, which allow compositional determination of lava and pyroclasts samples, but several uncertainties about the results of the measurements led us to doubt its usefulness. For this reason, a comparison has been carried out between the results obtained with pXRF and laboratory analysis, so the chemical elements such as Rb, Zr, Y or Ba show similar relative variations between both techniques. In a volcanic event with similar conditions (monogenetic), pXRF can be a useful tool in the geochemical evolution of the eruption.

Primeros avances sobre la posible afección, tras la erupción del año 2021 en la zona de Cumbre Vieja, al agua subterránea de la isla de La Palma

First advances on the possible impact after the 2021 eruption in the Cumbre Vieja area of the groundwater of the island of La Palma

M. Meléndez Asensio[1], J. Jiménez Sánchez[2], T. Peinado Parra[2], F. Lorenzo García[3], R. Marrero Díaz[4], M.A. Fernández Jurado[5], C. Camuñas Palencia[6] y M. Mejías Moreno[6]

1 CN IGME-CSIC. C/ Matemático Pedrayes, 25. 33005 Oviedo. m.melendez@igme.es
2 CN IGME-CSIC. Urbanización Alcázar del Genil, 4. Edif. Zulema, Bajo. 18006 Granada. j.jimenez@igme.es, t.peinado@igme.es
3 Consejo Insular de Aguas de La Palma. Avenida Marítima 34. 38700. Santa Cruz de La Palma. fernando.lorenzo@cablapalma.es
4 CN IGME-CSIC. C/ Alonso Alvarado, 43, 2ºA. 35003 Las Palmas de Gran Canaria. r.marrero@igme.es
5 CN IGME-CSIC. Edificio Estación Experimental de Zonas Áridas. Ctra. de Sacramento, s/n, La Cañada de San Urbano. 04120 Almería. ma.jurado@igme.es
6 CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. m.mejias@igme.es, c.camunas@igme.es

Resumen: Este artículo resume las principales características geológicas e hidrogeológicas de la isla de La Palma y analiza la posible afección a las aguas subterráneas por la erupción del volcán de Tajogaite, ocurrida entre los días 19 de septiembre y 13 de diciembre de 2021, en la zona de Cumbre Vieja. Este trabajo aporta los resultados de los análisis químicos realizados en los años 2022 y 2023 y su comparativa con los análisis previos llevados a cabo por el Consejo Insular de Aguas de La Palma, con el objetivo de estudiar posibles variaciones en los parámetros físico-químicos del agua subterránea y su relación con la erupción. Los efectos más notables detectados han sido un descenso del pH y un aumento de los bicarbonatos y de la conductividad en las muestras de aguas situadas al sur del Barranco de las Angustias. Este fenómeno podría estar relacionado con el aumento de CO_2 endógeno disuelto en el agua debido a la actividad volcánica.

Palabras clave: acuífero volcánico, agua subterránea, hidroquímica, La Palma, infiltración

Abstract: *This article summarizes the main geological and hydrogeological characteristics of La Palma Island and examines the possible impact on groundwater due to the eruption of Tajogaite volcano, between September 19 and December 13, 2021, in the Cumbre Vieja area. This work provides the results of the chemical determinations on groundwater carried out in the years 2022 and 2023 and their comparison with previous analyses provided by the Island Water Council of La Palma, with the aim of studying possible variations in the physical-chemical parameters of the groundwater and its relationship with the eruption. The most notable effects are a decrease in pH and an increase in bicarbonates and conductivity in the water samples located to the south of Las Angustias ravine. This phenomenon could be related to the increase in endogenous CO_2 dissolved in water due to volcanic activity.*

Key words: *aquifer in volcanic rocks, groundwater, hydrochemistry, La Palma, natural infiltration*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Entre los días 19 de septiembre y 13 de diciembre de 2021, en la isla de La Palma, tuvo lugar una erupción volcánica en la zona de Cumbre Vieja (Fig. 1). El Consejo Insular de Aguas de La Palma (CIALP), como Organismo de Cuenca de la Demarcación Hidrográfica de La Palma, valoró la posibilidad de que este fenómeno pudiera ocasionar algún tipo de afección sobre las aguas subterráneas. En este marco, el CIALP y el Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC) formalizaron un contrato de apoyo tecnológico para llevar a cabo un estudio hidrogeológico preliminar, a nivel local y regional (Jiménez-Sánchez et al., 2022) y, posteriormente, ha dado lugar a la formalización de un convenio de colaboración entre ambas instituciones.

Una de las consecuencias indirectas de la erupción es la disminución de la demanda hídrica por destrucción de los sistemas de distribución de riego y de superficies de cultivos, lo que conlleva una reducción de la extracción en varias captaciones. Esta circunstancia puede tener algún tipo de variación en las características hidroquímicas detectadas.

El objetivo primordial de este trabajo ha sido valorar la posible influencia de la erupción sobre las aguas subterráneas de la isla, mediante el estudio de las variaciones en la composición química de las mismas. En concreto, se presentan los primeros resultados referentes a los cambios observados en la composición hidroquímica.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La secuencia estratigráfica insular se puede dividir, a grandes rasgos, en dos unidades: el Complejo Basal, constituido por materiales volcánicos submarinos y rocas intrusivas, que aflora en el fondo de la Caldera de Taburiente, y las Unidades Volcánicas Subaéreas, compuestas por grandes edificios volcánicos superpuestos (Garafía, Taburiente I, Taburiente II, Bejenado y Cumbre Vieja) discordantes sobre el Complejo Basal (Carracedo et al., 2001).

Esta secuencia estratigráfica coincide con los principales conjuntos diferenciados según su comportamiento hidrogeológico (Navarro, 1992; Poncela, 2015): el Complejo Basal se considera un basamento de muy baja permeabilidad; las Unidades Volcánicas Subaéreas, conservan en su conjunto una permeabilidad y porosidad relativamente elevadas, alojando a los principales acuíferos de la isla (Navarro, 1992; BOC, 2018; Poncela, 2015) (Fig. 1).

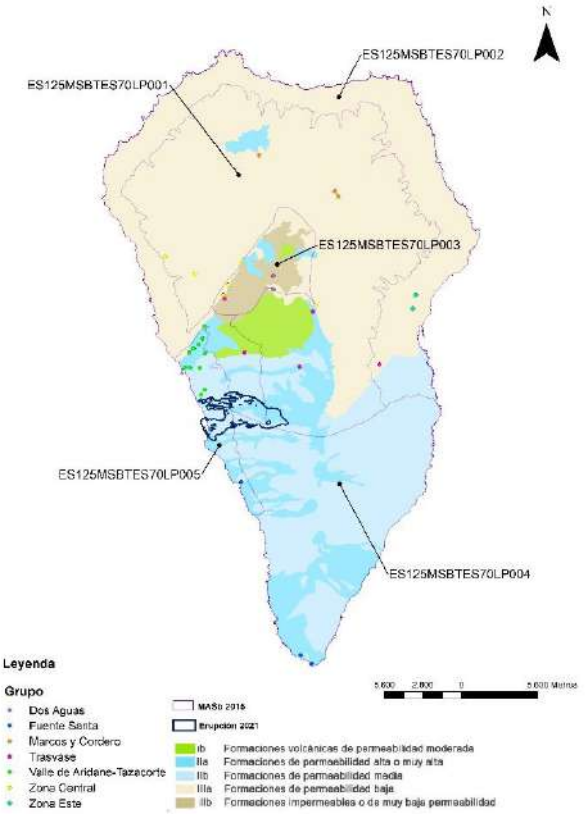


FIGURA 1. *Mapa hidrogeológico de la isla de La Palma (www.igme.es) con los puntos de muestreo agrupados y las zonas afectadas por las coladas lávicas de la erupción del volcán de Tajogaite, en el edificio volcánico de Cumbre Vieja en 2021.*

La recarga de los acuíferos procede casi exclusivamente de la infiltración del agua de lluvia, con una pequeña parte de retornos de riego (BOC, 2018). Ésta se produce preferentemente en la zona de cumbres, favorecida por la elevada permeabilidad de los materiales volcánicos más modernos que recubren la superficie (Fig. 1). La descarga natural se realiza a través de manantiales, principalmente en la zona central de la isla, y hacia el mar, de forma submarina (González-Delgado, 2021) y/o en la zona intermareal. La captación de las aguas subterráneas es generalmente a través de galerías en las zonas de cumbres y medianías, y por medio de pozos y pozos-galerías, en las zonas costeras. El dato de disponible de caudal conjunto que captan corresponde al año 2015 y es de 66 hm^3 (BOC, 2018).

En el límite sur de Cumbre Vieja existen aguas termales cloruradas-sódicas ricas en CO_2 y elevadas salinidades (manantial de la Fuente Santa) que parecen reflejar procesos de mezcla con agua de mar (Navarro et al., 2014; Jiménez-Sánchez et al., 2022).

La complejidad geológica e hidrogeológica de la isla, junto con los sistemas de aprovechamiento y la afección por nitratos, han sido los factores condicionantes de la actual delimitación de las Masas de Agua Subterránea (MASb). El actual Plan Hidrológico define 5 MASb (Fig. 1): LP001 Insular-Vertientes, constituye el acuífero principal y engloba el acuífero Coebra; LP002 Costero, delimitado por la ubicación de la mayor parte de los pozos funcionales; LP003 Complejo Basal, de escaso interés hidrogeológico; LP004 Dorsal Sur, abarca el edificio Cumbre Vieja y en la que se ha detectado presencia de CO_2 volcánico, empeorando su calidad; LP005 Valle de Aridane-Tazacorte, delimitada debido a la mala calidad del agua por procesos puntuales de intrusión marina incipiente y contaminación difusa por NO_3^- (BOC, 2018).

En el sector norte de la isla, destaca el acuífero Coebra, situado en la MASb LP001, que drena tanto hacia el interior de la Caldera de Taburiente como hacia el exterior, principalmente a través de los manantiales de Marcos y Cordero, con un caudal conjunto superior a los 50 l/s. También existen algunos acuíferos colgados, que dan lugar a pequeños manantiales, captados en su mayor parte a través de galerías.

METODOLOGÍA

Se realizaron 3 campañas de muestreo de puntos de agua en 2022 y otras 3 en 2023. En ellas se procedió a la toma de muestras de agua para su posterior análisis hidroquímico en laboratorio y se registraron los parámetros físico-químicos en campo: pH, conductividad eléctrica y temperatura del agua. Los puntos de muestreo seleccionados (un total de 34 puntos) están localizados, en su mayoría, en el sector occidental de la isla, tanto en el Valle de Aridane como en la zona costera (Fig. 1) y comprende, pozos, galerías, pozos-galerías, piezómetros y manantiales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para una mejor interpretación de los resultados, y debido a las notables diferencias en las características físico-químicas dentro de una misma MASb, se han agrupado los puntos de agua, en función de sus similitudes, en 7 grupos: Valle de Aridane-Tazacorte, Fuente Santa, Trasvases, Zona Central, Marcos y Cordero, Dos Aguas y Zona Este.

Grupo Valle de Aridane-Tazacorte. Pese a la proximidad de los puntos que componen este grupo, un total de 13, se detectan ciertas diferencias en su composición química. La mayor parte de las muestras presenta facies bicarbonatada sódica, si bien, El Salto, San Isidro y San Antonio son bicarbonatadas sódico-magnésicas y el Tablero es bicarbonatada-sulfatada cálcica. La relación iónica es bastante homogénea, con un aumento de la salinidad y de la concentración de iones, de forma proporcional, hacia el suroeste, en la dirección del flujo hacia el mar.

Grupo Fuente Santa. Está compuesto por las 6 pocetas de la Fuente Santa, el manantial del Charco Verde y el pozo de Las Salinas, todos con una elevada salinidad. Las Salinas y las pocetas de La Fuente Santa son aguas cloruradas sódicas, con una ligera variación en las pocetas debido posiblemente al diferente grado de mezcla con el agua de mar. El Charco Verde, en cambio, es bicarbonatada-clorurada sódica, indicando un fuerte contenido en carbono disuelto en sus aguas y, además, a tenor de su firma isotópica de oxígeno e hidrógeno (Peinado et al., en prensa), la mezcla con agua de mar es prácticamente despreciable.

Grupo Trasvases. Lo componen las dos galerías de los Trasvases (Oeste y Este), el sondeo Matadero, la galería El Roque y el manantial Charco de las Ovejas. Son todas aguas de baja mineralización y de facies bicarbonatada sódica, excepto el trasvase Este que es bicarbonatada sódico-magnésica. En todas ellas se detectó, en agosto de 2023, un aumento de la proporción de magnesio.

Grupo Zona Central. Se corresponde con 6 galerías de la zona central de la isla (Aguatavar; Caboco; Santa Teresa; Cadenas de Agua; Tabercorade; Tenerra). Presentan menor salinidad que el grupo Trasvases, por lo que se ha definido este grupo específico con ellos. Se observa un enriquecimiento en salinidad hacia el este. Todas las muestras presentan facies aniónica bicarbonatada, siendo la facies catiónica, sódica para los puntos situados al norte de este grupo (Caboco, Aguatavar y Tenerra) y sódico-magnésica para los situados más al sur (Cadenas de Agua, Santa Teresa y Tabercorade).

Grupo de Marcos y Cordero. Se han incluido las muestras de los puntos situados al norte de la isla y que poseen mineralización más débil (manantiales de Marcos, Cordero y la captación El Cedro). Presentan una facies bicarbonatada sódica, y las tres son muy homogéneas, aunque El Cedro presenta un contenido en sales ligeramente superior al de los manantiales.

Grupo Dos Aguas. Representado por las muestras tomadas en la Cascada de Colores y en la surgencia carbogaseosa de Dos Aguas, ambos en el interior de la Caldera de Taburiente. Estas muestras presentan una elevada mineralización, siendo el segundo grupo, tras el de Fuente Santa, con mayores conductividades eléctricas y carga iónica. La facies hidroquímica es bicarbonatada-sulfatada sódica. Estos datos muestran notables diferencias respecto a otros puntos del entorno con valores de conductividad mucho más bajos.

Grupo Zona Este. Este grupo está integrado por los puntos situados en la zona oriental de la isla y al norte del trasvase (Pozo del Carmen y Pozo del Roque), cuyas características hidroquímicas no son similares a ninguno de los grupos más próximos a su ubicación. Se trata de aguas con conductividades medias, parecidas a las del grupo Valle de Aridane-Tazacorte, pero con facies sensiblemente distinta, clorurada sódico-magnésica.

Evolución de parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas

A fin de realizar un análisis de la evolución histórica de parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas y valorar la posible influencia de la erupción del volcán de Tajogaite, se han utilizado, además, los datos disponibles de los muestreos históricos realizados por el CIALPL. En la Figura 2 se han representado las concentraciones medias de los puntos con análisis desde abril de 2021 (previo a la erupción) hasta 2023 correspondientes al Grupo Trasvases y al grupo Valle de Aridane-Tazacorte.



FIGURA 2. *Evolución del pH, HCO^{3-} y $Ca^{2+}+Na^{+}$ en los grupos Valle de Aridane-Tazacorte y Trasvase en el periodo abril-21 agosto-23*

Zona del Valle de Aridane-Tazacorte: En la primera campaña, realizada tras la erupción en enero de 2022, se ha detectado un aumento puntual en la conductividad y en el contenido en Ca^{2+} y HCO_3^-, y también, aunque en menor medida, en Cl^- y Na^+, acompañado de un descenso del pH y del contenido en SO_4^{2-}. El incremento en estos parámetros es más acusado en los puntos ubicados al sur del Barranco de las Angustias que en los ubicados al norte de este, especialmente en el caso de los bicarbonatos.

El descenso generalizado de los valores de pH junto con el aumento del HCO_3^- detectado en los puntos al sur del Barranco de Las Angustias, no resulta proporcional al aumento del resto de los iones y podría relacionarse con un aporte de CO_2 endógeno al acuífero asociado a la erupción del volcán de Tajogaite, antes, durante y/o después de la misma.

En las campañas de muestreo posteriores a enero de 2022, se ha observado que, en general, la tendencia de las concentraciones y del pH fue la de regresar a los valores pre-eruptivos. Sin embargo, en las captaciones ubicadas en el sur del barranco, dicha tendencia se invierte en abril-mayo de 2023. En estas fechas, se tuvo conocimiento de la existencia de concentraciones anómalas de CO_2 en el aire en algunas captaciones del Barranco de Tenisca, que nunca habían sido detectadas. A raíz de esta información se realizó un muestreo específico en las 3 captaciones de la zona, donde se detecta un nuevo incremento de los

bicarbonatos y un descenso del pH, junto con el aumento de los parámetros conductividad eléctrica, Na^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}.

Grupo Trasvases: La evolución en estos puntos de agua es análoga a lo observado en las muestras del Grupo Valle de Aridane-Tazacorte. Durante la erupción se detecta un descenso generalizado del pH acompañado de un aumento de la conductividad y del contenido en HCO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+ y K^+, así como del Ca^{2+}, especialmente en el Trasvase Boca Oeste. Estas variaciones están muy probablemente relacionadas, nuevamente, con el aporte de gases endógenos ácidos (como el CO_2, el H_2S y el SO_2) procedentes de la desgasificación magmática, que se disuelven en el acuífero, disminuyendo el pH y aumentando así su agresividad, lo que favorece los procesos de hidrólisis del medio por el que circulan, aportando cationes a las aguas subterráneas.

En la última campaña los valores de pH muestran una tendencia ascendente, de tal forma que se alcanzan niveles similares a los registrados antes de la erupción. El Na^+ muestra un comportamiento similar, aunque su ascenso se detecta más tarde. El efecto contrario le sucede al Cl^-, que experimenta un descenso en marzo de 2023, para volver a recuperarse en la campaña de agosto de 2023 a niveles previos a la erupción.

Se puede concluir que, en este grupo, con la información de que se dispone hasta la fecha, la mayoría de los parámetros controlados están volviendo a los niveles que tenían previos a la erupción.

CONCLUSIONES

Se han realizado 6 campañas de muestreo de las aguas subterráneas de la isla de La Palma, 3 en 2022 y otras 3 en 2023. Para su interpretación, se han diferenciado siete grupos según su composición química: Valle de Aridane-Tazacorte, Trasvases, Fuente Santa, Marcos y Cordero, Zona Central, Dos Aguas y Zona Este. De los 7 grupos propuestos, los de mayor mineralización son el grupo de Fuente Santa y Dos Aguas. El grupo Valle de Aridane-Tazacorte, el grupo Trasvases y el de Zona Este, presentan una mineralización intermedia, siendo el grupo Zona Central y el de Marcos y Cordero los grupos de menor mineralización. En el Valle de Aridane-Tazacorte la conductividad eléctrica del agua presenta una tendencia ascendente, si bien el comportamiento muestra diferencias entre los puntos situados al norte y al sur del Barranco de las Angustias. Cabe destacar el aumento de la concentración de bicarbonato y la conductividad eléctrica, unido al descenso del pH en los puntos situados al sur de este, detectado en mayo de 2023, y que puede estar relacionado con la presencia de CO_2 endógeno disuelto en el agua subterránea, procedente de los gases producidos durante la erupción del volcán de Tajogaite. Este efecto no se ha apreciado, hasta el momento, en los puntos situados al norte del Barranco de las Angustias.

En el resto de los grupos en los que se cuenta con información del año 2022, pese a presentar un aumento en marzo del 2023 en la mayoría de los parámetros controlados, tienden a situarse, en la campaña de agosto del 2023, en valores semejantes a los que presentaban en agosto de 2022. Se produce un descenso generalizado de la conductividad eléctrica y del sodio y un aumento del pH en los grupos del Trasvase, Zona Central y los manantiales de Marcos y Cordero.

Por otra parte, cabe indicar que durante la erupción del volcán se produjo una disminución considerable en la extracción de los caudales de varias captaciones, llegando incluso a la paralización completa de alguna de ellas. No obstante, tras la reanudación de las actividades y la puesta en funcionamiento de nuevas canalizaciones, el régimen de bombeo se ha incrementado considerablemente, pudiendo influenciar las variaciones hidroquímicas observadas. La continuidad de estas investigaciones durante los próximos dos años aportará información más precisa sobre la influencia de cada uno de los factores tenidos en consideración.

REFERENCIAS

BOC. (2018): Decreto 169/2018, de 26 de noviembre, por el que se aprueba definitivamente el Plan Hidrológico Insular de la DH de La Palma. BOC-A-2018-237-5637.

Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., de la Nuez, J. y Pérez-Torrado, F.J. (2001): Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*, 57: 175-273.

González-Delgado, S., González-Santana, D., Santana-Casiano, M., González-Dávila, M., Hernández, C. A., Sangil, C., y Hernández, J. C. (2021). Chemical characterization of the Punta de Fuencaliente CO_2-enriched system (La Palma, NE Atlantic Ocean): a new natural laboratory for ocean acidification studies, Biogeosciences, 18, 1673–1687.

Jiménez-Sánchez, J., Meléndez, M.L., Peinado, T., Fernández, M.A., Mejías, M., Marrero, R., Ballesteros, B.J. y Camuñas, C. (2022): Valoración de la posible afección del volcán de Tajogaite a las masas de agua subterránea de la DH de La Palma. Documento inédito, 124 p. CN IGME-CSIC, Madrid.

Navarro, J.M. (1992): Avance del Plan Hidrológico de La Palma. Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Aguas (Gobierno de Canarias). CILP. Santa Cruz de Tenerife. 245 p.

Navarro, E., Alonso, J., Concha, K. y Navarro, R. (2014): Características físico químicas y componentes mineralizantes de las aguas de la Fuente Santa. Isla de La Palma: indicaciones terapéuticas. *Bol. Soc. Esp. de Hidrología Médica*, 29-2: 193-194.

Peinado, T., Marrero, R., Jiménez, J., Fernández, M.A., Meléndez, M., Camuñas, C., Lorenzo, F., y Mejías M. (en prensa): Primeros avances en el estudio de los isótopos estables de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ sobre la posible afección, tras la erupción del año 2021 en la zona de Cumbre Vieja, al agua subterránea de la isla de La Palma. En: XI Congreso Geológico de España.

Poncela, R. (2015): *Hidrogeología del sistema acuífero volcánico de La Palma (Islas Canarias).* Tesis doctoral. Universidad de Alicante, 227 p.

Evolución espacial y temporal de la dispersión de tefra en la erupción de 2021 en la isla de La Palma.

Spatial and temporal evolution of tephra dispersion in the eruption of 2021 on the La Palma island.

I. Montoya[1,2], J. Vegas[1], J.F. Mediato[1]; M.A. Rodríguez-Pascua[1]; R. Pérez-López[1]; J. Martínez-Martínez[1]; J. López-Gutiérrez[1]; M.A. Perucha[1]; I. Galindo[1]; J.A. Díaz-Muñoz[1]; G. Lozano[1], A. Díez-Herrero[1]; R. Mateos[1]; J.M. López[1]; E. Galindo[1] y N. Sánchez[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). 28003 Madrid. j.vegas@igme.es
2 Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG), 35117 Las Palmas de Gran Canaria, Spain. isabel.montoya@ulpgc.es

Palabras clave: columna eruptiva, erupciones híbridas, dispersión, tefra, La Palma.

Resumen

El 19 de septiembre de 2021 comenzó la erupción del volcán Tajogaite en la isla de La Palma, siendo la emisión de material piroclástico (tefra) en las columnas eruptivas una de las primeras manifestaciones en superficie de este fenómeno volcánico. Desde el comienzo, el equipo del IGME-CSIC destinado en campo puso en marcha la denominada 'Operación Cenicienta', siguiendo la metodología del Servicio Geológico Americano (USGS) https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash. Para ello, se muestreó en campo una densa red de estaciones de 30x30 cm, donde se recolectaron más de 300 muestras en los 85 días que duró esta erupción. A partir de los datos de espesor, volumen y posición se han realizado los mapas de dispersión de tefra empleando diferentes modelos de interpolación para las distintas fases eruptivas. Los mayores espesores una vez finalizada la erupción se alcanzaron en el sector suroeste de la isla, con más de 2,5 metros de espesor en un radio de 1 km del cono en el área de Las Manchas-El Corazoncillo. Dos años después de la erupción la mayoría de tefra emitida se ha perdido, tanto por erosión eólica como por las actividades de recuperación post-erupción que han eliminado la mayoría de los depósitos que se acumularon originalmente. Por ello, es vital la recogida sistemática de estos datos de acumulación diarios durante las emergencias volcánicas, puesto que son los materiales más efímeros de una erupción.

Abstract

On 19 September 2021 the eruption of the Tajogaite volcano on the island of La Palma began, being the pyroclasts and ash (tephra) dispersion in the eruptive columns one of the first surface manifestations of this volcanic phenomenon. Since the beginning, the so-called 'Operation Cinderella' was launched by the IGME-CSIC team, following the methodology of the American Geological Survey (USGS) https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/. For this purpose, a dense network of 30x30 cm stations was sampled in the field, where more than 300 samples were collected during the 85 days of this eruption. In addition, an initiative was enabled so that any citizen could collect and send their samples from anywhere in the archipelago. Based on the thickness, volume and position data, tephra dispersion maps were produced using different interpolation models for the different eruptive phases. The greatest thicknesses after the end of the eruption were reached in the southwest sector of the island, with more than 2.5 metres thick within a radius of 1 km from the cone in the Las Manchas-El Corazoncillo sector. Two years after the eruption most of the tephra emitted has been lost, both by wind erosion and by post-eruption recovery activities that have removed most of the deposits that originally accumulated. Systematic collection of these daily accumulation data during volcanic emergencies is therefore vital as these are the most ephemeral volcanic materials from this eruption.

¿Podemos calibrar los modelos de flujos de lava más rápido que en tiempo real para facilitar la primera respuesta a una emergencia volcánica?

Can we calibrate lava flow models faster than real-time to assist on a first volcanic emergency response?

C. Paredes[1], M. Marquez[1] y M. Llorente Isidro[2]

1 Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid, Calle Alenza 4, 28003, Madrid (España) carlos.paredes@upm.es
2 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CN-IGME, CSIC) Calle Ríos Rosas 23, 28003 Madrid (España) m.llorente@igme.es

Palabras clave: peligros volcánicos, colada de lava, simulación numérica, reología, optimización.

Resumen

Este trabajo evalúa la viabilidad y los requisitos necesarios para hacer simulaciones pronóstico del emplazamiento de coladas de lava para ser usados en el contexto de una emergencia volcánica. Se han usado datos de teledetección y modelos isotérmicos de simulación numérica de flujos de lava. Se ha tomado como referencia y para ensayo, la primera semana del episodio eruptivo de Cumbre Vieja (19/09/2021 – 13/12/2021). Para ello se han utilizado productos distribuidos en abierto por COPERNICUS, por el Cabildo Insular de la Palma y por el IGN. Se ha calibrado la reología de la colada de lava en las simulaciones realizadas con VolcFlow (Kelfoun y Vargas, 2015). La morfometría se ha utilizado para la calibración y optimización del índice de Jaccard. El resultado ha permitido estimar parámetros reológicos consiguiendo una semejanza del 85% entre la extensión real y la simulación de la colada. Además, ello ha permitido diseñar un flujo de trabajo para resolver el problema de optimización, con la integración temporal de los datos. El resultado es muy prometedor ya que permitiría una mejor preparación y gestión de emergencias volcánicas con emplazamiento de lavas para escenarios similares al simulado.

Abstract

This work evaluates the feasibility and requirements for simulating lava flow emplacement forecasts in the context of a volcanic emergency, using remote sensing data and isothermal numerical simulation models. The study focuses on the first week of the Cumbre Vieja eruptive episode (19/09/2021 - 13/12/2021) for testing purposes. The products distributed openly by COPERNICUS, the Cabildo Insular de la Palma, and the IGN were utilized. The rheology of the lava flow was calibrated using VolcFlow (Kelfoun y Vargas, 2015) simulations. Morphometry was employed to optimize the Jaccard index, resulting in an 85% similarity between the actual and simulated lava flow extensions. This process also enabled the estimation of rheological parameters and the development of a workflow to solve the optimization problem, with data time integration. The outcome is promising as it would enable improved preparation and management of volcanic emergencies involving lava emplacement, similar to the scenario that was simulated.

Referencias

Kelfoun, K., y Vargas, S. V. (2016). En: *Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions.* (A.J.L. Harris, T. De Groeve, F. Garel y S.A. Carn, Eds). Geological Society, London, Special Publications, 426(1), 337-343.

Primeros avances en el estudio de los isótopos estables de $\delta^{18}O$ Y $\delta^{2}H$, sobre la posible afección, tras la erupción del año 2021 en la zona de Cumbre Vieja, al agua subterránea de la isla de La Palma.

Advances in the study of stable isotopes $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$, regarding with the possible impact on groundwater, after the 2021 eruption in Cumbre Vieja area, La Palma island.

T. Peinado Parra[1], R. Marrero Díaz[2], J. Jiménez Sánchez[1], M.A. Fernández Jurado[3], M.L. Meléndez Asensio[4], C. Camuñas Palencia[5], F. Lorenzo García[6], M. Mejías Moreno[5].

1 CN IGME-CSIC. Urbanización Alcázar del Genil, 4. Edif. Zulema, Bajo. 18006 Granada. t.peinado@igme.es, j.jimenez@igme.es
2 CN IGME-CSIC. C/ Alonso Alvarado, 43, 2ºA. 35003 Las Palmas de Gran Canaria. r.marrero@igme.es
3 CN IGME-CSIC. Edificio Estación Experimental de Zonas Áridas. Ctra. de Sacramento, s/n, La Cañada de San Urbano. 04120 Almería. ma.jurado@igme.es
4 CN IGME-CSIC. C/ Matemático Pedrayes, 25. 33005 Oviedo. m.melendez@igme.es
5 CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. m.mejias@igme.es, c.camunas@igme.es
6 Consejo Insular de Aguas de La Palma. Avenida Marítima 34, 38700. Santa Cruz de La Palma. fernando.lorenzo@cablapalma.es

Resumen: En este artículo se realiza un primer estudio de los isótopos estables $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ para investigar la posible afección a las aguas subterráneas, que pudiera haber provocado la erupción ocurrida entre los días 19 de septiembre y 13 de diciembre de 2021, en la zona de Cumbre Vieja de la isla de La Palma. El trabajo aporta los resultados de los análisis realizados en cinco campañas de muestreo a lo largo de los años 2022 y 2023, con el objetivo de estudiar posibles variaciones y su relación con la erupción teniendo en cuenta los valores de los análisis físico-químicos que durante ese mismo período de muestreo se han realizado. Lo más reseñable es un desplazamiento, manifestado en la campaña de enero de 2022, que ha provocado una desviación respecto de las líneas meteóricas locales y que puede estar relacionado con el aporte de CO_2 mantélico.

Palabras clave: agua subterránea, erupción, isótopos estables, La Palma.

Abstract: *This article is a first study of the stable isotopes $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ to investigate the possible impact on groundwater, due to the eruption that occurred between September 19 and December 13, 2021, in the Cumbre Vieja area. This work provides the results of the analyses carried out in five sampling campaigns throughout the years 2022 and 2023, with the aim of studying possible variations and their relationship with the eruption, taking into account the values of the physical-chemical analyses carried out during the same sampling period. The most noteworthy is a displacement, manifested in the January 2022 campaign, which has caused a deviation from the local meteoric lines and that it could be related to the increase in mantelic CO_2.*

Key words: *groundwater, eruption, stable isotopes, La Palma.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Entre los días 19 de septiembre y 13 de diciembre de 2021, en la isla de La Palma, tuvo lugar una erupción volcánica en la zona de Cumbre Vieja. El Consejo Insular de Aguas de La Palma (CIALP), como Organismo de Cuenca de la Demarcación Hidrográfica de La Palma, valoró la posibilidad de que este fenómeno pudiera ocasionar algún tipo de afección sobre las aguas subterráneas de la isla. En este marco, el CIALP y el Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC) formalizaron un contrato de apoyo tecnológico para llevar a cabo un estudio hidrogeológico preliminar, a nivel local y regional (Jiménez-Sánchez et al., 2022) y, posteriormente, ha dado lugar a la formalización de un convenio entre ambas instituciones.

Una de las consecuencias indirectas de la erupción es la disminución de la demanda hídrica por destrucción de los sistemas de distribución de riego y de superficies de cultivos, lo que conllevó a una reducción de la extracción de algunas captaciones y la paralización total de otras. Esta circunstancia debe tenerse en cuenta, ya que puede tener algún tipo de influencia en los resultados de los valores de isótopos analizados.

El objetivo primordial de este trabajo ha sido valorar la posible influencia de la erupción sobre las aguas subterráneas, mediante el estudio de los isótopos estables $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, en comparación con los valores obtenidos en los muestreos físico-químicos. En concreto, se presenta un primer estudio de las cinco campañas realizadas entre enero de 2022 y agosto de 2023.

METODOLOGÍA

Durante el período de enero de 2022 a diciembre de 2023 se han realizado cinco campañas de muestreos de aguas subterráneas para el análisis de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno del agua (Figura 1); en enero de 2022 se recogieron un total de 21 muestras, en mayo de 2022 fueron 9 muestras, en agosto de 2022 se recogieron 35 muestras, en marzo de 2023 alcanzaron las 31 muestras y en agosto de 2023 se tomaron 30 muestras.

Los resultados obtenidos se expresan en δ ‰ respecto al estándar internacional V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), proporcionados por la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA). La precisión de las medidas es de ±0,1‰ para $\delta^{18}O$ y ±1‰ para $\delta^{2}H$.

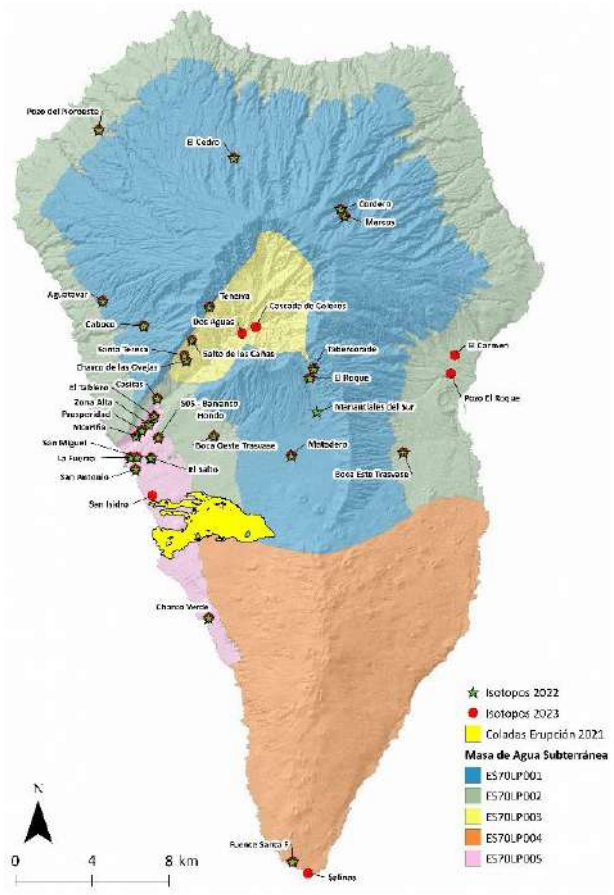


FIGURA 1. *Mapa de localización de las muestras recogidas para análisis isotópicos de las campañas de 2022 y 2023 con indicación del área afectada por el volcán de Tajogaite, en la zona de Cumbre Vieja.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar los valores isotópicos de los puntos de agua muestreados en las diferentes campañas de 2022 y 2023, se han comparado con la línea meteórica mundial de Rozanski et al. (1993), y con las líneas meteóricas locales de La Palma por Veeger (1991) y Poncela (2015). En la Figura 2 se han representado en un mismo gráfico todos los datos de las campañas realizadas en el año 2022.

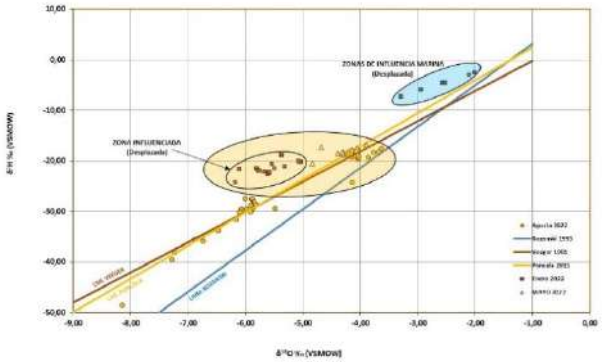


FIGURA 2. *Diagrama binario de $\delta^{18}O$ vs $\delta^{2}H$ en las muestras de aguas subterráneas de las campañas de 2022. Líneas meteóricas $\delta^{2}H = 8{,}17\ \delta^{18}O + 11{,}27$ (Rozanski et al., 1993), $\delta^{2}H = 5{,}98\ \delta^{18}O + 5{,}78$ (Veeger, 1991) y $\delta^{2}H = 6{,}55\ \delta^{18}O + 9{,}03$ (Poncela, 2015).*

Lo más destacable de este análisis comparativo es que se ha identificado un claro empobrecimiento relativo tanto en $\delta^{18}O$ como en $\delta^{2}H$, aunque de menor entidad, durante la campaña de enero de 2022, respecto a los valores existentes previos de los mismos (Veeger, 1991; ITGE, 1993; Poncela, 2015; CIALP, 2017; Benavides, 2019), así como en las campañas de mayo y agosto de 2022. La disminución en $\delta^{18}O$, detectada en todas las muestras analizadas de enero de 2022, es posible que pueda estar asociado a una fuerte interacción con CO_2 mantélico relativamente empobrecido en $\delta^{18}O$ a baja temperatura (<150ºC) (D'Amore y Panichi, 1980). Este fraccionamiento isotópico del $\delta^{18}O$ se detecta sólo durante la campaña más próxima al final de la erupción, lo que parece indicar que durante el periodo pre y/o inter-eruptivo se produjo un elevado aporte de CO_2 mantélico en las aguas subterráneas que drenaban las captaciones, tal y como indican el descenso de pH y el aumento en el contenido en bicarbonatos recogido en los análisis físico-químicos. Las muestras que presentan un fraccionamiento isotópico, aparentemente asociado al aporte de CO_2 endógeno, se encuentran principalmente en el Valle de Aridane y en los puntos de muestreo de ambos túneles de trasvase.

En las campañas posteriores a enero de 2022, no se aprecia el desplazamiento (fraccionamiento) hacia valores más ligeros que se observó en esa primera campaña, que puede ser debido al mayor aporte de CO_2 al acuífero unido a un diferente régimen de bombeo durante la erupción. La mayoría de las captaciones muestreadas estuvieron sin bombear varios meses durante y después de la erupción, al mismo tiempo que el acuífero recibía enormes cantidades de CO_2, lo que posiblemente produjo una modificación de su quimismo, disminuyendo el pH y aumentando la concentración de bicarbonatos y otros elementos (Amonte et al., 2022; García-Gil et al., 2023). Una vez puesta en marcha las captaciones a partir de febrero de 2022, la variación del régimen de bombeo favoreció una mayor dinámica en el acuífero, que facilitó la dilución del efecto del aporte de CO_2 en las aguas, con mezcla de aguas de recarga.

A partir de este criterio se considera la existencia de una zona influenciada en la que se incluyen los siguientes puntos: Boca Este Trasvase, Boca Oeste Trasvase, Barranco Hondo, Casitas, Charco Verde, Piezómetro El Salto, El Salto (C.R. Tenisca), El Tablero, La Fuerza, San Miguel, Matadero, Morriña, Prosperidad, San Antonio, San Isidro, Zona Alta y Piezómetro S-09. Todos ellos en el Valle de Aridane-Tazacorte y las Bocas del Trasvase. Del mismo modo, también es importante diferenciar los puntos de muestreo situados al sur de la isla, que presentan una mezcla con agua de mar, con valores de isótopos más pesados, que corresponden con las diferentes pocetas, A, B, C, D, E y F de la Fuente Santa, además del pozo de las Salinas.

La Figura 3 representa los datos de las campañas en el año 2023, donde la mayor parte se ajustan razonablemente bien a lo largo de las líneas meteóricas locales, si bien, con notables diferencias que permiten seguir distinguiendo la zona de influencia marina, con valores isotópicos más pesados del resto de muestras.

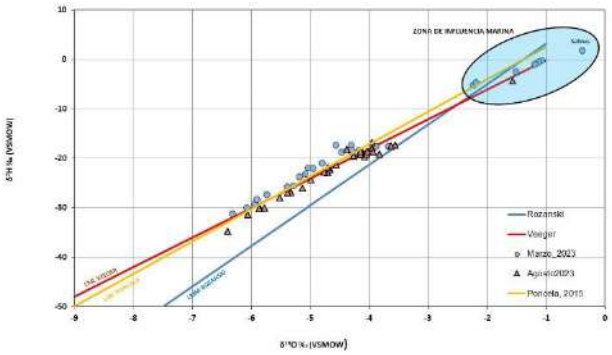


FIGURA 3. *Diagrama binario de $\delta^{18}O$ vs $\delta^{2}H$ en las muestras de aguas subterráneas de las campañas del año 2023.*

En las campañas de 2023 tampoco se aprecia el desplazamiento hacia los valores más ligeros observados en la campaña de enero de 2022. No obstante, los resultados obtenidos del análisis de la hidroquímica y de los gases disueltos en algunas de las aguas subterráneas muestreadas, indican que, a partir de marzo-abril de 2023, se ha producido una disminución del pH y un aumento de los bicarbonatos como consecuencia del aporte de CO_2 endógeno, pero sin provocar un fraccionamiento isotópico de las muestras, tal y como se observó en enero de 2022. Esta ausencia de fraccionamiento puede deberse a la menor magnitud del aporte de CO_2 y/o a que las captaciones tienen un régimen de bombeo más dinámico y continuado desde principios de 2023 como consecuencia de la entrada en funcionamiento de la nueva tubería de Las Hoyas-El Remo. Esta interpretación debe ser verificada y analizada en las siguientes campañas de muestreo.

En cuanto a las cotas de recarga, en general, el gradiente altitudinal suele ser menor en las islas volcánicas con un abrupto relieve que en las zonas continentales debido a la rápida elevación de las nubes asociadas a las precipitaciones por las laderas de las islas (Custodio et al., 1987). Aun así, el δ-altitud es muy útil para determinar la cota de recarga y las posibles líneas de flujo del agua subterránea (Gonfiantini, 1973; Veeger, 1991). Por tanto, asumiendo el efecto orográfico de las precipitaciones (a mayor altitud, precipitaciones isotópicamente más ligeras) y que estas no han variado su composición isotópica desde que se infiltraron en el terreno hasta que alcanzan la zona de descarga en las galerías y pozos muestreados, es posible estimar la cota de recarga preferente de las mismas.

La cota de la recarga estimada representa un valor mínimo, ya que posiblemente, dada la ausencia de formaciones confinantes de gran extensión a lo largo de la circulación del agua subterránea hacia las zonas más bajas y/o en las propias galerías, ha recibido aportes de aguas de recarga de menor cota, generando aguas isotópicamente más pesadas. La Tabla I expone los gradientes altitudinales dados por diferentes autores en la isla de La Palma.

Referencia	$\delta^{18}O$ 100 m	$\delta^{2}H$ 100 m
Veeger (1991)	-0,24	-1,27
Poncela (2015)	-0,20	-1,28

TABLA I. *Gradientes altitudinales o variación del contenido de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ con la altitud en la isla de La Palma, según los estudios locales (Veeger, 1991 y Poncela, 2015).*

Se ha representado el contenido en $\delta^{18}0$ y $\delta^{2}H$ de las aguas subterráneas frente a la altitud del punto de muestreo y se ha comparado con las rectas que corresponden al gradiente altitudinal obtenidas por Veeger (1991) para la isla de La Palma, que es muy similar a la de Poncela (2015). Estas rectas que relacionan el contenido isotópico de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ con la cota topográfica, responden a las ecuaciones $\delta^{18}O = -1,81 - 0,0024 \cdot Z$ y $\delta^{2}H = -6,22 - 0,0127 \cdot Z$, en las que el $\delta^{18}0$ y $\delta^{2}H$ está en ‰ V-SMOW y Z es la altitud en m (Figuras 4 y 5 y Tabla I).

Los contenidos en $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de las aguas subterráneas respecto a los gradientes altitudinales, de las muestras se sitúan a la izquierda de estas rectas (Figuras 4 y 5), de modo que, proyectando sobre ellas su composición isotópica, se obtiene la cota de recarga preferente. Se han desechado los valores obtenidos en los puntos con influencia marina de Fuente Santa y Salinas. En la denominada zona influenciada, que corresponde al Valle de Aridane-Tazacorte y Bocas del Trasvase, el valor promedio de las cotas obtenidas, a partir del gradiente altitudinal de Veeger (1991), se sitúa entre 800 y 1.600 m en los valores de la recta de $\delta^{18}O$ y entre 880 y 1.560 m en los de la recta de $\delta^{2}H$. Las mayores cotas de recarga corresponden a las Bocas Este y Oeste del Trasvase. En el resto, el valor promedio de las cotas obtenidas, a partir del gradiente altitudinal de Veeger (1991), se sitúa entre 1.300 y 2.200 m en los valores de la recta de $\delta^{18}O$ y entre 1.200 y 2.200 m en los de la recta de $\delta^{2}H$). Las mayores cotas de recarga corresponden a los manantiales de Marcos y Cordero y a la galería El Cedro.

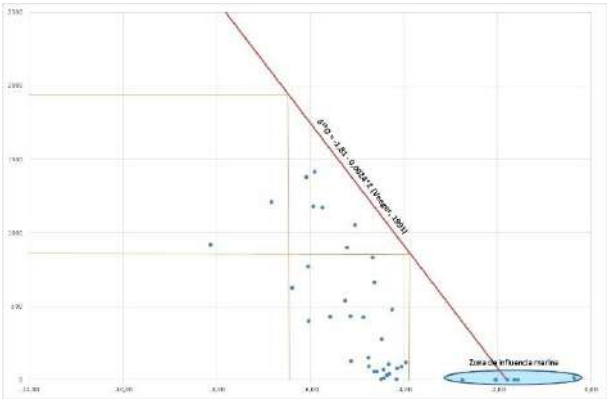


FIGURA 4. *Valor promedio del contenido de isótopos estables en las aguas subterráneas y la altitud (Relación δ^{18}O-Altura, en las campañas de 2022 y 2023.*

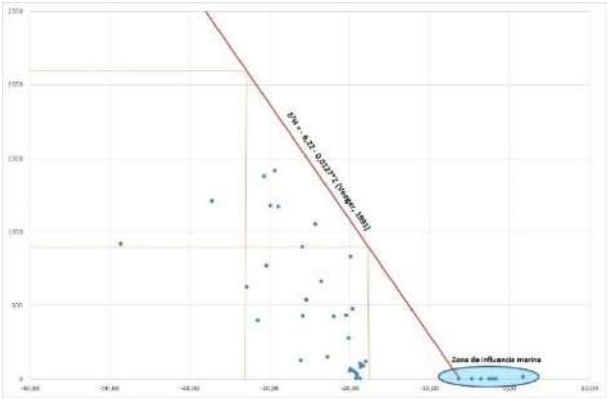


FIGURA 5. *Valor promedio del contenido de isótopos estables en las aguas subterráneas y la altitud (Relación δ^{2}H-Altura), en las campañas de 2022 y 2023.*

CONCLUSIONES

Se han realizado cinco campañas de muestreo para el análisis de isótopos estables de las aguas subterráneas de la isla de La Palma en 2022 y 2023. En la campaña de enero de 2022 se ha observado un desplazamiento (fraccionamiento) respecto de las líneas meteóricas locales hacia valores más ligeros, en principio atribuible a un aporte de CO_2 mantélico. Al mismo tiempo, en los análisis físico-químicos también se constata, además de este aumento de CO_2, un descenso del pH y un aumento de los valores de bicarbonatos.

En las campañas posteriores a enero de 2022, no se aprecia este fraccionamiento que puede justificarse por el cese de los bombeos en las captaciones durante la erupción, con el consiguiente mayor aporte de CO_2 al acuífero en la mayoría de los puntos muestreados en esas fechas. Una vez puesta en marcha las captaciones, a partir de febrero de 2022, la variación del régimen de bombeo favoreció una mayor dinámica en el acuífero que facilitó la dilución del efecto del aporte de CO_2 en las aguas.

A partir de este criterio se considera la existencia de una zona influenciada en la que se incluyen los puntos situados en el Valle de Aridane-Tazacorte y las Bocas del Trasvase. Del mismo modo, se deben diferenciar los puntos de muestreo en la zona sur de la isla, que presentan una mezcla importante de agua de mar, con valores de isótopos más pesados, que corresponden con las pocetas A, B, C, D, E y F de la Fuente Santa, además del pozo de las Salinas.

Esta hipótesis de trabajo debe ser verificada y analizada con nuevas campañas de muestreo. La continuidad de las investigaciones durante los próximos años aportará información más precisa sobre la influencia de cada uno de los factores en consideración.

REFERENCIAS

Amonte, C. et al (2022): Hydrogeochemical temporal variations related to the recent volcanic eruption at the Cumbre Vieja Volcano, La Palma, Canary Islands. *Front. Earth Sci. 10:1003890. doi: 10.3389/feart.2022.1003890*

Benavides Gelabert, A. (2019): La hidrogeología del entorno del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, La Palma (Islas Canarias). *Boletín Geológico y Minero*, 130 (4): 641-660

CIALP (2017). *Estudio Hidrogeológico sobre la estimación de la recarga natural del acuífero Coebra y su posible sobreexplotación zonal dentro de la Masa de Agua LP001. La Palma, Islas Canarias.* Informe Inédito. Consejo Insular de Aguas de La Palma.

Custodio, E. et al. (1987). *Aportaciones al conocimiento hidrogeológico de Tenerife utilizando isótopos ambientales*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Asociación Española de Hidrogeología Subterránea, 11: 263-280.

D'Amore, F. y Panichi, C. (1980): Evaluation of deep temperatures by a new gas geothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 549-556.

García-Gil, A. et al. (2023): Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater resources (part II): Hydrochemical impacts. *Groundwater for Sustainable Development 100992. 18 pp.*

Gonfiantini, R. (1973): *Isotope study of Canary Island groundwater*. Proyecto SPA-15, 69: 515.

ITGE - Instituto Tecnológico y Geominero de España (1993): *Estudio isotópico de las aguas subterráneas en la isla de La Palma*. 185 p.

Jiménez-Sánchez, J., Meléndez-Asensio, M.L., Peinado-Parra, T., Fernández-Jurado, M.A., Mejías-Moreno, M., Marrero-Díaz, R., Ballesteros-Navarro, B.J. y Camuñas, C. (2022): *Memoria final del contrato de apoyo tecnológico al Consejo Insular de Aguas de La Palma para la valoración de la posible afección del volcán de Tajogaite a las masas de agua subterránea de la demarcación hidrográfica de La Palma*. Documento inédito, 124 p. CN IGME-CSIC, Madrid.

Poncela, R. (2015): *Hidrogeología del sistema acuífero volcánico de La Palma (Islas Canarias)*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante, 227 p.

Rozanski, K., Araguás-Araguás, L. y Gonfiantini, R. (1993): Isotopic patterns in Global Precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 78.

Veeger, A.I. (1991): *Geochemical methods for evaluating the origin and evolution of ground water in volcanic rocks*. Tesis Doctoral. The University of Arizona. 251 pp.

Emisión de radón durante la erupción de Cumbre Vieja (2021) medido en los tubos volcánicos de San Juan.

Radon emission in San Juan tubes during the Cumbre Vieja eruption (2021).

R. Pérez-López[1], O. Fernández-Lorenzo[2], D. Sanz-Mangas[3], S. Palanco[4], I. Galindo[3], J. López-Gutiérrez[1], A. Bernal[4], B. del Moral[1], J. F. Mediato[1], E. Bellido[1], N. Sánchez[3], S. Sánchez-Moral[5], A.Z. Miller[6], Á. Fernández-Cortés[7]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. r.perez@igme.es, j.lopezgu@igme.es, j.mediato@igme.es,e.bellido@igme.es
2 Tebexcorade - La Palma Espeleo Club & Federación Canaria de Espeleología, Santa Cruz de La Palma. octavio.fl@gmail.com
3 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC), C/Alonso Alvarado, 43, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, España. d.sanz@igme.es, ines.galindo@csic.es, n.sanchez@igme.es
4 Dep. Física Aplicada I. Laboratorio de Materiales, Universidad de Málaga, Málaga. spalanco@uma.es
5 Museo Nacional de Ciencias Naturales CSIC. Madrid. ssmilk@mncn.csic.es
6 Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, Sevilla. anamiller@irnas.csic.es
7 Dep. Biología y Geología. Universidad de Almería, Almería. acortes@ual.es

Palabras clave: radón, tubo lávico, terremotos, erupción, Cumbre Vieja.

Resumen

Durante la reciente erupción volcánica de Cumbre Vieja, en 2021, en La Palma (Islas Canarias, España), se introdujeron varios detectores de CO_2 y radón (^{222}Rn) en los tubos lávicos formados en la erupción del San Juan (1949). Suponiendo una conexión estructural entre ambas erupciones, marcadas por el alineamiento de centros eruptivos según una dirección NW-SE, colocamos los medidores en el tubo lávico de Las Palomas y en la parte superior del Llano del Banco a escasos 1.000 m de la erupción. Los valores registrados son muy bajos, oscilando entre 2 y 9 Bq/m^3. Sin embargo, picos episódicos entre 270 y 650 Bq/m^3 se registraron en relación con los terremotos volcano-tectónicos durante la erupción, con una correlación clara con la emisión de CO_2. Análisis geoquímicos de lavas durante la erupción muestra valores de uranio (^{238}U) bajos oscilando entre 1 y 5 µg/g, así como un valor máximo de torio (^{232}Th) de 9.5 µg/g. Una vez la erupción concluyó, se desplazaron los sensores a los recién formados tubos lávicos. En verano los valores de radón aumentaron hasta 3 kBq/m^3, atribuidos más en relación con las condiciones climáticas de baja ventilación que con procesos post eruptivos.

Abstract

During the volcanic eruption at the Cumbre Vieja in La Palma, Canary Islands (2021), a radon (^{222}Rn) detector was placed inside the "Las Palomas" lava tube, which had been formed during the San Juan eruption (1949), close to 1 km of distance from the main vent. Additionally, a CO_2 logger was deployed to investigate the relationships between the inner fluxes of radon and CO_2. A geostructural connection between the 1949 and 2021 eruptions is suggested, possibly linked by a pre-existing fault, as evidenced by the alignment of volcanic vents trending NW-SE. In October 2021, the loggers were relocated to the upper part of the lava tube, specifically within the San Juan volcanic vent (Llano del Banco hollow dyke). Preliminary results indicate daily average radon values ranging between 2 and 9 Bq/m^3. However, sporadic peaks reaching approximately 270 and 650 Bq/m^3 were recorded, correlating with volcano-tectonic earthquakes and variations in volcanic intensity. Geochemical analysis of emitted lavas reveals a uranium (^{238}U) concentration of about 1 to 5 µg/g and a thorium (^{232}Th) concentration of 9.5 µg/g. Following the conclusion of the eruption in early 2022, both loggers were transferred to a newly formed lava tube. Summer radon values increased up to 3 kBq/m^3, attributed to climatic conditions and poor ventilation rather than post-volcanic activity. *Research partially funded by the MICIN Project PID2020-113407RBI00 and the Microlava project (PROYEXCEL_00185) funded by the Andalusia Regional Government.*

Estudio preliminar de la mineralogía y geoquímica de s-estalactitas de azufre post-eruptivas en el Volcán de Tajogaite (La Palma).

Preliminary mineralogy and geochemistry of post-eruptive s-stalactites of molten sulfur flows in Tajogaite volcano (La Palma).

R. Pérez-López[1], F.J. González[1], B. Ordóñez[2], B. Rincon-Tomás[1], E. Bellido[1], B. del Moral[2] y E. Santofimia[1],

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. r.perez@igme.es; fj.gonzalez@igme.es ; b.rincon@igme.es; e.santofimia@igme.es

2 Laboratorios Generales. Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/La Calera nº 1, Tres Cantos, 28760. España. b.ordonez@igme.es ; e.bellido@igme.es; b.delmoral@igme.es

Resumen: Las fumarolas activas localizadas en la parte superior del anillo del cráter oriental del volcán Tajogaite, Cumbre Vieja (La Palma, 2021), presentan temperaturas superiores a 300 ºC, así como emisión gaseosa continua de SO_2 (25,1 g/g), ClH (24,9 g/g) y S_2H (12,4 g/g). Posteriormente a un episodio severo de lluvias en 2023, se detectó la formación de estalactitas de azufre sobre una pared de 40 m^2, tapizándose la misma con estalactitas de tamaño centimétrico (s-estalactitas). Estudios preliminares de microscopia electrónica de barrido SEM asistida con microanálisis EDS, así como fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (DRX) muestran mineralizaciones de sulfato de magnesio, sulfato de magnesio con aluminio (hexahedrita, voltaita, alunita, kieserita) y presencia de cloro y hierro, así como elementos traza de Na, P, Ca y Ti. Además, se han observado pequeñas partículas de cloruro de hierro (probablemente hidromolysita $FeCl_3$). Finalmente, proponemos un posible modelo genético de formación de dichas s-estalactitas.

Palabras clave: fumarola, estalactita, azufre nativo, sulfatos de magnesio y aluminio, SEM.

Abstract: *Active fumaroles within the Tajogaite easternmost volcanic crater formed during the Cumbre Vieja eruption in La Palma in 2021, exhibit temperatures greater than 300 ºC. These fumaroles consistently emit sulfur dioxide (SO_2) with a maximum concentration of 25.1 µg/g, hydrogen chloride (ClH) 24.9 and hydrogen sulfide (S_2H) with a maximum concentration of 12.4 µg/g. Following a heavy rainfall event, a sulfur s-stalactite formation was observed on a 40 square meter crater wall, featuring centimeter-sized s-stalactites. We conducted preliminary studies using scanning electron microscopy (SEM) with EDX, fluorescence and X-ray diffraction (XRF, DRX), revealing the mineralization of magnesium sulfates, sulfates with magnesium and aluminium (hexahydrite, voltaite, alunite, kieserite) with the presence of chloride and iron, and with traces of Na, P, Ca and Ti. Additionally, small particles of iron chloride (probably hydromolysite $FeCl_3$) were identified in the samples. A genetic model for s-stalactites is proposed.*

Key words: *fumarole, stalactite, native sulfur, magnesium and aluminium sulfates, SEM.*

LA ERUPCIÓN DE CUMBRE VIEJA, 2021

El 19 de septiembre del 2021 se produjo una erupción estromboliana de tipo fisural en Cumbre Vieja (La Palma), que generó un edificio volcánico monogenético de 200 m de altura (Tajogaite), y un campo de lava de 1.200 Ha de superficie (Civico et al., 2022). Durante 86 días se produjeron erupciones de cenizas y lapillis intercaladas con episodios de emisión de lavas y apertura de centros de emisión distales alineados a lo largo de fisuras NW-SE y WNW-ESE. Tanto durante la erupción, como después de su cese en diciembre del mismo año, se formaron diferentes fumarolas a lo largo de los campos de lava, en el anillo superior del cráter principal y en los cráteres secundarios (Martínez-Martínez et al., 2023; Campeny et al., 2023). Ambos autores distinguen tres tipos diferentes de fumarolas, según la temperatura (T) y su posición geográfica, presentando diferentes mineralizaciones: i) fumarolas con T > 300-530±10 ºC donde el HCl juega un papel importante en las mineralizaciones, ii) fumarolas con T en el rango 170±10 y 350±10 ºC con formación de salamoniac (sal amoniacal, NH_4Cl) y mascagnita $(NH_4)_2SO$, y iii) fumarolas con T < 200±10 ºC, donde predominan las mineralizaciones de sulfatos de Mg, Na y Ca.

En este estudio preliminar se ha analizado una formación de estalactitas asociadas a un flujo de azufre pos-eruptivo a partir de un muestreo de campo de estas formaciones minerales efímeras, y que pueden contribuir al conocimiento de los fenómenos post-eruptivos en Canarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de estudiar la geoquímica y la mineralogía de las estalactitas de azufre nativo que se han formado posteriormente a la erupción de Cumbre Vieja (2021), durante un episodio puntual de flujo dominado por azufre fundido, hemos aplicado técnicas de microscopia óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS), y difracción de rayos X (DRX). Dichos estudios se han realizado en el Instituto Geológico y Minero de España-CSIC y se complementarán con análisis de fluorescencia de rayos X. En las campañas de campo se han estudiado los gases emitidos con detectores electroquímicos y la temperatura de las emisiones.

Para los estudios ópticos se ha utilizado un estéreo-microscopio modelo LEICA M125C. El microscopio electrónico de barrido SEM, modelo JEOL JSM-6010 PLUS/LA, ha permitido hacer una caracterización morfológica y microanalítica de las muestras mediante imágenes electrónicas y microanálisis de rayos X por dispersión de energía (EDS). Las condiciones de operación principales utilizadas han sido: (a) estudio en bajo vacío a 15 kV de voltaje de aceleración, (b) imágenes con una magnificación entre 30x y 1600x utilizando un detector de electrones retro-dispersados (BES), y (c) análisis puntual EDS. Para el estudio SEM, se ha utilizado la estalactita de la izquierda de la figura 1, estudiando su sección perpendicular y la superficie exterior.



FIGURA 1. *Detalle de varias de las s-estalactitas recolectadas en el cráter secundario oriental del volcán de Tajogaite. El ejemplar de la izquierda se analizó en el SEM, ver figuras 2 y 3.*

La DRX se ha realizado en un equipo XPERT PRO MPDde PANalytical, monocromador de grafito, rendija automática y detector X'Celerator, con software de captación de datos X'Pert. Para determinar la concentración de gases emitidos en la fumarola, se ha utilizado un medidor de gases *Industrial Scientific* modelo IBRID MX6 configurado para medir SO_2, CO, S_2H, ClH, O_2 y LEL (lower explosion limit). Para medir la temperatura se ha usado un termopar de tipo K (hasta 1800 ºC).

RESULTADOS PRELIMINARES

Las estalactitas presentaban vivos colores como, por ejemplo, amarillo, verde, rojo y blanco, tapizando una pared vertical del cráter con emisiones difusas de gases y temperatura en superficie de 60-80 ºC (medidas *in situ*).

Las condiciones ambientales en la fumarola donde se ha formado las estalactitas son temperaturas superiores a 300 ºC, y tiene emisiones de SO_2 (25,1 g/g), HCl (24,9 g/g) y S_2H (12,4 g/g) que fueron medidas de forma puntual el día de muestreo.

La sección transversal de la s-estalactita (estalactita de azufre) 1 muestra una estructura concéntrica en tres capas diferenciadas (Fig. 2). Cada capa está formada por minerales que bajo el esteromicroscopio tienen aspecto de pulverulento a cristalino. Se ha realizado también un análisis con EDS transversal desde la parte exterior hacia el centro de la estalactita (capa 3, Fig. 2), comprobando que la composición de la capa exterior de la s-estalactita es mayoritariamente de sulfato de Mg. Las capas interiores de la s-estalactita están enriquecidas en aluminio, hierro y cloro.

La DRX la permitido identificar de forma preliminar hexahidrita, voltaita, alunógeno, tamarugita, moganita, kieserita. Una estalactita de color rojizo contiene piroxeno, plagioclasa y nefelina claramente relacionados con el sustrato volcánico.

La figura 3 muestra los resultados del diagrama ternario Al-Mg-Fe del análisis EDS de la estalactita 1 (ver Figs. 1 y 2). Las mineralizaciones están dominadas por la presencia de sulfatos de Mg y Al, con menor abundancia de Fe y Cl, así como elementos traza de P, Na, Ti y Ca. En el diagrama ternario se observa una clara concentración de tres especies diferentes, en función del contenido relativo de Al y Mg, así como presencia o no de Fe (Fig. 3). Se han identificado sulfatos de Mg, sulfatos de Al y compuestos sulfatados mixtos de Mg y Al (Fig. 4). La relación relativa de Mg y Al podría permitir discriminar las diferentes mineralizaciones, que aparecen con diferente hábito cristalino.

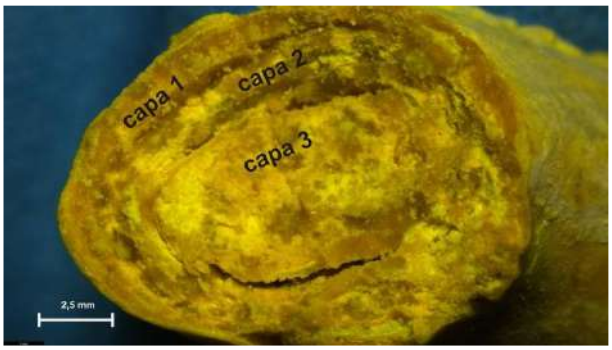


FIGURA 2. *Detalle de la sección de la s-estalactita 1 (ver Fig.1) mostrando 3 capas diferenciadas donde dominan los sulfatos de Mg y Al. Imagen tomada con estero-microscopio LEICA M-125-C.*

Conforme al análisis SEM, el sulfato de Mg recubre mayoritariamente el exterior de la estalactita, mientras que los sulfatos con Mg y Al (+/- Cl, Fe) aparecen intercalados en el interior de las tres capas. Los hábitos cristalinos del sulfato de Mg con Al (+/- Cl, Fe) aparecen con diferentes morfologías: (1) láminas conformando rosetas concéntricas, (2) en pequeñas esferas de

superficie lisa (Fe>Al), (3) láminas con superficie irregular (Fe>Al pero con más Cl que las lisas), y (4) láminas sin orden aparente. Además, el sulfato de Mg aparece como una fina pátina que recubre en ocasiones las rosetas laminares de sulfatos mixtos de Mg y Al.

FORMACION DE S-ESTALACTITAS DE AZUFRE Y SULFATOS

En general, el azufre nativo en condiciones normales se funde a una temperatura a partir de 113 ºC (https://www.mindat.org/min-3826.html). Esto implica que las fumarolas activas en la zona del cráter del volcán Tajogaite con temperaturas por encima de este valor, podría fundir este mineral y derivados del mismo como, por ejemplo, sulfatos hidratados.

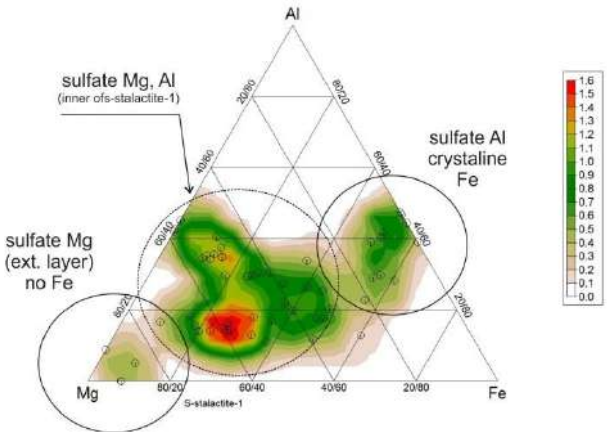


FIGURA 3. *Diagrama ternario de valores elementales Al-Mg-Fe del análisis EDS con el SEM de la sección de la s-estalactita 1. Se han agrupado las principales familias químicas en consonancia con lo observado en el análisis EDS del transepto de la sección de la s-estalactita. Aparecen tres grupos principales según el contenido en Al, Mg y Fe.*

Durante los últimos días de noviembre del año 2023 (el 31 de ese mes se registraron precipitaciones de 45,6 l/m^2 en la estación AEMET de Tazacorte). La isla de La Palma sufrió un periodo de lluvia intensa que dejó un valor de precipitación máxima de 100 l/m^2 en 24 h. Los valores acumulados hasta la fecha de recogida de las muestras fue de 73,1 l/m^2 (AEMET), con un valor máximo histórico en la zona de 185 l/m^2 en 24 h (febrero 2004, AEMET). Posterior a este evento de lluvia, se observó la aparición de un tapiz de estalactitas de azufre de diferentes colores y tamaños, con una longitud máxima de 25 cm, y diámetros que variaban entre 0,5 y 1,5 cm (Fig. 5). El H_2S es soluble en agua, el cual asociado a la temperatura de la fumarola debió de producir un fenómeno de flujo de azufre fundido y fluidos sulfatados sobre el lateral de la pared del cráter, debido a la baja viscosidad del azufre. Además, este flujo se produjo en varios pulsos con diferentes etapas de recubrimiento de la pared de s-estalactitas y probable evolución mineral con precipitación de de sulfatos de neoformación y otras fases potencialmente meta-estables.

La identificación en SEM de granos aislados de cloruro de hierro (probable hidromolysita, $FeCl_3$), con un tamaño de hasta 50 micras. Este haluro es compatible con la presencia de elevadas concentraciones de HCl ligadas a las emisiones gaseosas. En este sentido, se midieron durante la recogida de las s-estalactitas valores de concentración gaseosa de HCl de 24,9 □g/g. Por otro lado, teniendo en cuenta que la molysita funde a 280 ºC, y sabiendo que la temperatura que se midió en la fumarola fue superior a 300 ºC, podría explicar la presencia de dicho mineral. Pese a su carácter delicuescente, este mineral se ha identificado en depósitos de fumarolas activas y antiguas, así como en incendios asociados a la actividad antrópica en minas de carbón (https://www.mindat.org/min-2749.html).

Es interesante destacar que no se ha detectado la presencia de yeso, que suele aparecer como producto de alteración de sulfuros volcánicos o como mineral primario fumaroliano a menos de 220ºC.

Finalmente, resaltar a modo de conclusión preliminar que, la formación de estalactitas con azufre nativo y diversos sulfatos es un proceso efímero, con poca viabilidad para su preservación futura, debido a la meta-estabilidad de los minerales y lo variable de las condiciones ambientales en la zona. Es importante destacar que este proceso de precipitación mineral hidrotermal constituye un buen ejemplo del estado actual del volcán Tajogaite, en su dinámica posteruptiva. La temperatura medida en estas fumarolas del cráter, la geoquímica de las emisiones gaseosas observadas y la mineralogía descrita, indican el dinamismo del fenómeno mineralogenético estudiado, después de más de dos años de terminada la erupción del volcán Tajogaite.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CSIC PRO_LAPALMA (CSIC-LA PALMA-08), Gobierno de las Islas Canarias-M. Transición Ecológica y Reto Demográfico (227G0165-GEOPALMA), así como parcialmente por el proyecto PID2020-113407RBI00. El equipo Estereomicroscopio Leica ha sido financiado por el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia de la Unión Europea MINECRITICAL (Ref: C17.I7).

REFERENCIAS

Campeny, M., Menéndez, I., Ibáñez-Insa, J. et al. (2023): The ephemeral fumarolic mineralization of the 2021 Tajogaite volcanic eruption (La Palma, Canary Islands, Spain). *Sci Rep.* 13, 6336

Civico, R., Ricci, T., Scarlato, P. Taddeucci, J., Andronico, D., Del Bello, E., D'Auria, L., Hernández, P.A. y Pérez, N.M. (2022): High-resolution Digital Surface Model of the 2021 eruption deposit of Cumbre Vieja volcano, La Palma, Spain. *Sci. Data* 9, 435.

Martínez-Martínez, J., Mediato, J.F., Mata, M.P. et al., (2023): Early fumarolic minerals from the Tajogaite

volcanic eruption (La Palma, 2021). *J. Volcanol. Geotherm. Res*. 435, 107771.

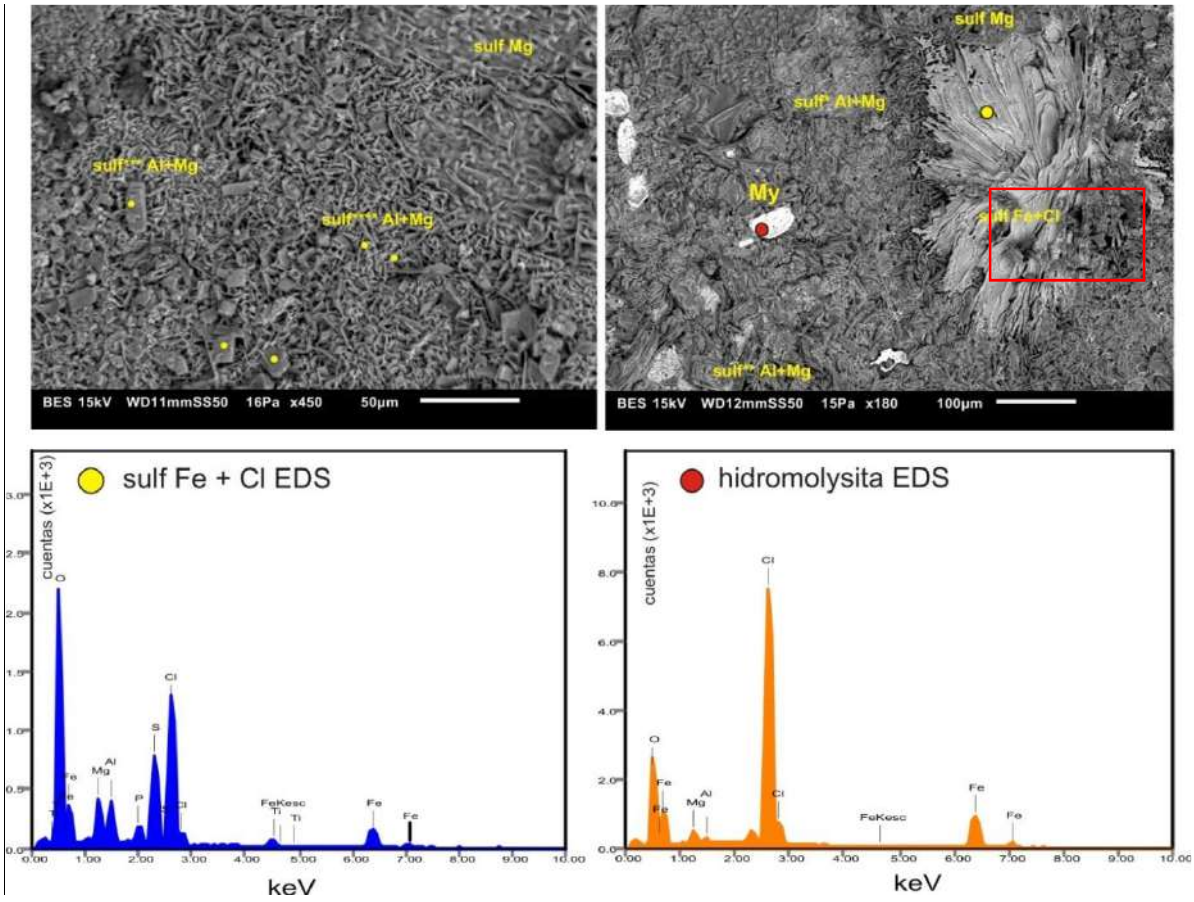


FIGURA 4. Arriba: *Imágenes SEM de sulfatos de Al y Mg obtenidas de la capa exterior de la s-estalactita 1. Izquierda: los sulfatos de Al y Mg aparecen con diferentes hábitos (indicados según el número de *, **, ***, ****). Derecha: imagen de la posible hidromolysita (My). El sulfato de Fe y Cl presenta trazas de Mg y Al. Abajo: diagramas del análisis EDS del sulfato de Cl y Fe (izquierda, punto amarillo) y de la hidromolysita (derecha, punto rojo).*



FIGURA 5. *Vista de la formación de s-estalactitas en la pared sur del cráter secundario oriental del volcán Tajogaite, asociado al derrame de las fumarolas activas de la parte superior. Derecha: detalle de las s-estalactitas.*

Evolución morfométrica del cono monogenético de Tajogaite durante la erupción de La Palma (2021).

Morphometric evolution of Tajogaite monogenetic edifice during La Palma eruption (2021).

R. Pérez-López[1], P.G. Silva[2], D. Sanz-Mangas[3], P. Ezquerro[1], G. Bru[1], M.A. Rodríguez-Pascua[1], J. Elez[4], J.L. Giner-Robles[5] e I. Galindo[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC), C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. r.perez@igme.es
2 Departamento Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, 05003 Ávila. España. pgsilva@usal.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC), C/Alonso Alvarado, 43, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, España. d.sanz@igme.es; ines.galindo@csic.es
4 Departamento Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, España. jelez@usal.es
5 Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid, C/ Francisco Tomás y Valiente, 7, Fuencarral-El Pardo, 28049 Madrid, España. jorge.giner@uam.es

Palabras clave: monogenético, volcán, geomorfología, Tajogaite, evolución**.**

Resumen

Durante la erupción de Cumbre Vieja en la isla de La Palma (2021), se formó un cono monogenético con varios centros emisores, conformando el edificio volcánico llamado Tajogaite. Los volcanes monogenéticos se estudian desde un punto geomorfológico atendiendo a tres parámetros: diámetro basal (W_{co}), el diámetro del cráter (W_{cr}) y su altura (h). En este trabajo, se propone un nuevo índice morfométrico mediante un diagrama triangular W_{co}, W_{cr}, y h. En las fases iniciales el cono alcanza el diámetro basal para luego crecer más rápido en altura, con valores que favorecen los colapsos de flanco. En este caso, la morfología predominante observada tiene forma elongada y abierta hacia el NO de naturaleza fisural. Se han comparado estos valores con los valores medios de conos monogenéticos en el resto de la isla y del Cinturón Volcánico Trans Mexicano Michoacán-Guanajuato. El desarrollo geomorfológico de volcanes monogenéticos durante la erupción permite estudiar la peligrosidad de un colapso del edificio.

Abstract

A monogenetic cinder cone, so-called Tajogaite, was built during the Cumbre Vieja eruption in La Palma (Canary Islands, 2021). Geomorphological studies performed in monogenetic edifices analyse three morphometric parameters: the basal cone diameter (W_{co}), the crater diameter (W_{cr}) and the height of the cone (h). In this work we have introduced a new analysis based on a triangular diagram of these three parameters. In the initial phases the cone reaches the final basal diameter and then grows quickly in altitude, favouring flank instability processes. The elongated shape morphology is dominant during the eruption opening to the NW, due its fissure nature. The values obtained have been compared with all other monogenetic edifices in the island, and with the volcanic monogenetic field of Michoacán Guanajuato (Mexico). The geomorphological evolution of the monogenetic edifice during the eruption allows the estimation of potential volcano collapse.

Agradecimientos

Proyectos MICIN PID2020-113407RBI00, PID2021-123510OB-I00.

Evolución de las emisiones de SO_2 en la erupción de La Palma (2021), una visión desde la teledetección por satélite (Sentinel 5-P).

Evolution of SO_2 emissions in the La Palma eruption (2021), a view from satellite remote sensing (Sentinel 5-P).

T. Pozo Mángas[1], J. Elez[1], Y. Sánchez-Sanchez[1], R. Pérez-López[2], M.A. Rodríguez-Pascua[2] y J.L. Giner-Robles[3]

1 Departamento Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, España. jelez@usal.es; tomaspm@usal.es; yolanda.ss@usal.es.
2 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. r.perez@igme.es; ma.rodriguez@igme.es.
3 Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, Tres Cantos, Madrid. España. jorge.giner@uam.es

Palabras clave: SO_2 atmosférico, desgasificación, niveles base de SO_2, precursores, riesgos geológicos.

Resumen

Este trabajo ofrece el seguimiento y estudio de las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) durante la erupción del volcán monogenético Tajogaite, en La Palma, Islas Canarias, España, en 2021 (Pérez López et al., 2024) mediante el análisis de imágenes multitemporales del satélite Sentinel 5-P (Missions-Sentinel Online, 2022). Se han definido los niveles de referencia previos a la erupción y se han obtenido los umbrales de emisión de SO_2 en un entorno SIG. Se han estudiado las principales etapas evolutivas del proceso magmático: 1) normalidad 2) reactivación, asociada a los primeros enjambres sísmicos en la zona de erupción, 3) pre-erupción, días previos con actividad sísmica creciente pero sin erupción, 4) etapa eruptiva, y 5) etapa de desgasificación post-erupción. La comparación de la evolución del SO_2 emitido con las características de sismicidad, reactivación y los sucesivos pulsos eruptivos y su intensidad de la erupción monogenética, con un índice de explosividad modesto (VEI=3), revela una clara correlación entre las principales etapas eruptivas y los datos de emisiones de SO_2 obtenidos. Sin embargo, un análisis detallado de las etapas pre-eruptivas no permite establecer una buena correlación de los datos de SO_2 obtenidos como marcadores precursores de la erupción.

Abstract

This work offers the monitoring and study of the sulphur dioxide (SO_2) emissions during the eruption of the monogenetic Tajogaite volcano, in La Palma, Canary Islands, Spain, in 2021 (Pérez López et al., 2024), using multitemporal Sentinel 5-P satellite images (Missions-Sentinel Online, 2022). Pre-eruption baseline levels have been defined and SO_2 emission thresholds have been obtained in a GIS environment. The main evolutionary stages of the magmatic process have been studied: 1) normality, 2) unrest, associated with the first seismic swarms in the eruption area, 3) pre-eruption, previous days with increasing seismic activity but no eruption, 4) eruptive stage and 5) post-eruption degassing stage. Comparison of the evolution of emitted SO_2 with seismicity features, uplift and the successive eruptive pulses and their intensity of the monogenetic eruption, with a modest explosivity index (VEI=3), reveals a clear correlation between the main eruptive stages and obtained SO_2 emissions data. However, a detailed analysis of the pre-eruptive stages does not allow establishing a good correlation of the obtained SO_2 data as precursor markers of the eruption.

Referencias

Pérez López R., Silva P.G., Sanz-Mangas D., Ezquerro P., Bru G., Rodríguez-Pascua M.A., Elez J., Giner-Robles J.L. y Galindo I. (2024): *Evolución morfométrica del cono monogenético de Tajogaite durante la erupción de La Palma* (2021). Este trabajo es resultado del proyecto de investigación I+D+i PID2021-123510OB-I00 (QTECIBERA- USAL) funded by the MICIN AEI/10.13039/501100011033/.

Deformación dúctil-frágil superficial de la Falla de Mazo durante la erupción del Tajogaite 2021 (La Palma, Islas Canarias, España)

Surface brittle-ductile deformation of the Mazo Fault during the Tajogaite 2021 eruption (La Palma, Canary Islands, Spain)

M.A. Rodríguez-Pascua[1], R. Pérez-López[1], J.F. Mediato[1], J. Martínez-Martínez[1], M.A. Perucha[1], N. Sánchez[2], Y. Sánchez-Sánchez[3], J. López-Gutiérrez[1], I. Galindo[2], J. Elez[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. ma.rodriguez@igme.es; r.perez@igme.es; jf.mediato@igme.es; javier.martinez@igme.es; ma.perucha@igme.es; j.lopezgu@igme.es.
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Unidad Territorial de Canarias. C/Alonso Alvarado 43, 2A, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, España. n.sanchez@igme.es; i.galindo@igme.es.
3 Departamento Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, España. yolanda.ss@usal.es; jelez@usal.es.

Palabras clave: erupción, deformación superficial, pliegues, Tajogaite, La Palma**.**

Resumen

El 25 noviembre de 2021 comenzaron a abrirse los primeros centros distales de emisión de lavas en la Falla de Mazo (FMZ: ENE-OSO). En el borde S de Montaña Cogote se empezaron a abrir fracturas efusivas en *echelon* asociadas al movimiento de desgarre diestro de la FMZ. Algunas de estas fallas transtensivas fueron zonas de ascenso de magma. La combinación de esta actividad transtensiva y los esfuerzos generados por el ascenso del magma produjeron estructuras de cabalgamiento, pliegues y extensión en los elementos constructivos del cementerio de Las Manchas. Unas de las estructuras más interesantes fueron cabalgamientos (*pop-up*) de escala métrica que afectaron al adoquinado y a la capa de cenizas suprayacente (de más de 50 cm de espesor). Se desarrollaron pliegues con doble vergencia de dirección E-O con cabalgamientos asociados, que indicarían una dirección de acortamiento N-S. Estas estructuras, de gran interés científico y estético, fueron escaneadas en 3D mediante un dron y se realizó un *peel* para conservar uno de los pliegues con doble vergencia. Este patrimonio geológico efímero ya no existe, pero su documentación fotográfica, fotogramétrica 3D y la extracción del *peel* permitirán al menos su conservación virtual y material en el IGME.

Abstract

On November 25, 2021, the first distal lava vents started to open on the Mazo Fault (FMZ: ENE-WSW). On the S edge of Montaña Cogote, effusive echelon fractures associated with the right-handed strike-slip movement of the FMZ started to open. Some of these transtensional faults were zones of magma uplift. The combination of this transtensional activity and the stresses generated by the magma uplift produced some thrusting, folding and extensional structures in the building elements of Las Manchas cemetery. Some of the most interesting structures were metric-scale pop-up thrusts affecting the cobbles and the overlying ash layer (over 50 cm). Double-vergence E-W folds and the associated thrusts, were developed, indicating a N-S shortening direction. These structures, having a great scientific interest and beauty, were 3D scanned by drone photogrammetric flights. A peel was also made to preserve one of those double-vergence folds. This ephemeral geological heritage no longer exists, but its photographic and 3D photogrammetric documentation, and the extraction of a peel will allow, at least, the virtual and the material preservation at the IGME facilities.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos: CSIC (CSIC-LA PALMA-12), Gobierno de Canarias-Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (227G0165-GEOPALMA) y por el proyecto de investigación I+D+i PID2021-123510OB-I00 (USAL) del MICIN AEI/10.13039/501100011033.

Las fallas activas responsables de la erupción del Tajogaite 2021 (La Palma, Islas Canarias, España)

Active faults responsible for the Tajogaite 2021 eruption (La Palma, Canary Islands, Spain)

M.Á. Rodríguez-Pascua[1], R. Perez-Lopez[1], M.Á. Perucha[1], N. Sánchez[2], J. López-Gutierrez[1], J.F. Mediato[1], D. Sanz-Mangas[2], G. Lozano[1], I. Galindo[2], J.C. García-Davalillo[1], C. Lorenzo[1], M. Béjar[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. ma.rodriguez@igme.es; r.perez@igme.es; ma.perucha@igme.es; j.lopezgu@igme.es; jf.mediato@igme.es; g.lozano@igme.es; jc.garcia@igme.es; c.lorenzo@igme.es; m.bejar@igme.es.
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Unidad Territorial de Canarias. C/ Alonso Alvarado 43, 2A, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, España. n.sanchez@igme.es; d.sanz@igme.es; i.galindo@igme.es.

Palabras clave: falla activa, Falla de Tazacorte, Falla de Mazo, Tajogaite, La Palma**.**

Resumen

Durante la erupción fisural de estilo estromboliano de La Palma de 2021, se identificaron dos fallas que controlaban la distribución espacial de los hipocentros sísmicos y los centros de emisión de lavas. Una de ellas tiene una dirección NO-SE (Falla de Tazacorte: TZF) y la otra ENE-OSO (Falla de Mazo: MZF). Trabajos previos de análisis estructural de fallas en La Palma (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2024) indicaban que la zona de erupción era compatible con un elipsoide de deformación tectónica extensional que activaba desgarres transtensivos en la confluencia de la TZF y la MZF. Estas fracturas se activaron durante la erupción del volcán Tajogaite de 2021, determinando la distribución espacial de los centros de emisión con dirección NO-SE y OSO-ENE. Ambas fallas fueron cartografiadas durante la erupción volcánica a partir de trabajo de campo e imágenes aéreas de drones (vuelos fotogramétricos). Hemos recogido más de 300 datos de fracturas asociadas a las alineaciones de los centros de emisión y al movimiento de *creep* posterior a la erupción, afectando principalmente a viviendas e infraestructuras.

Abstract

During the 2021 La Palma strombolian and fissure eruption, two faults were identified that controlled the spatial distribution of earthquake hypocentres and effusive eruptive vents. One of them has a NW-SE trending (Tazacorte Fault: TZF) and the other, an ENE-WSW trend (Mazo Fault: MZF). Previous works on fault structural analysis in La Palma indicated that the eruption zone was compatible with an extensional tectonic strain ellipsoid which activated normal-strike-slip directional faults at the confluence of TZF and MZF. These fractures were activated during the 2021 Tajogaite eruption, determining the NW-SE and WSW-ENE spatial distribution of vents. Both faults were mapped in real time during the volcanic eruption from fieldwork and remote sensing imagery (photogrammetric aerial drone images). We have collected more than 300 fracture data associated with the effusive vents and post-eruption seismic creep, mostly affecting houses and infrastructures.

Referencias

Rodríguez-Pascua, M.A., Perez-Lopez, R., Perucha, M.A., Sánchez, N., López-Gutierrez, J., Mediato, J.F., Sanz-Mangas, D., Lozano, G., Galindo, I., García-Davalillo, J.C., Lorenzo, C. y Béjar, M. (2024). Applied Sciences 14(7), 2745. https://doi.org/10.3390/app14072745

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CSIC (CSIC-LA PAL-MA-12) y Gobierno de Canarias-Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (227G0165-GEOPALMA).

Movimiento de *creep* de las fallas activas de La Palma y su afección a las construcciones (Islas Canarias, España)

La Palma active faults creep movement and their effect on constructions (Canary Islands, Spain)

M.A. Rodríguez-Pascua[1], M.A. Perucha[1], N. Sánchez[2], J. López-Gutiérrez[1], R. Pérez-López[1], I. Galindo[2], M.T. Pedrosa-González[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. ma.rodriguez@igme.es; ma.perucha@igme.es; j.lopezgu@igme.es; r.perez@igme.es; mt.pedrosa@igme.es.
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Unidad Territorial de Canarias. C/ Alonso Alvarado 43, 2A, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, España. n.sanchez@igme.es; i.galindo@igme.es.

Palabras clave: falla activa, movimiento de creep, erupción Tajogaite, La Palma, Islas Canarias**.**

Resumen

La erupción del Tajogaite (2021) estuvo condicionada por dos fallas de desgarre: Tazacorte (FTZ, de dirección NO-SE) y Mazo (FMZ, de dirección ENE-OSO). El reflejo superficial de estas fallas generó el desarrollo de fallas en *echelon*. Dado que la zona afectada estaba densamente habitada, la mayoría de estas fracturas afectan a viviendas e infraestructuras. Algunas de las casas afectadas por la FTZ resultaron dañadas 9 meses después de la erupción. Sorprendentemente, en estas casas ya se habían realizado reparaciones en las mismas fracturas desde los años 80', lo que aporta información sobre movimiento de creep anterior a la erupción. Durante la erupción, la sismicidad poco profunda se relacionó espacialmente con ambas fallas, aunque en la actualidad la ausencia de sismicidad indica que se mueven por *creep*. La cartografía y monitorización de estas fallas es relevante dado que han estado actuando desde los años 80', por lo que su cartografía debería ser incluida en la planificación del uso del suelo. Además, ambas fallas podrían actuar como fuentes sismogénicas desencadenantes de terremotos volcánicos con potenciales intensidades macrosísmicas elevadas. Actualmente estamos monitorizando estas fracturas con un fisurómetro de precisión Novatest FIPSG100. Los resultados obtenidos ofrecen velocidades máximas de desplazamiento tanto en la TZF como en la MZF de 2,80 mm/año y velocidades mínimas de 0,24 mm/año.

Abstract

The Tajogaite eruption (2021) was conditioned by two strike-slip faults: Tazacorte (TZF: NW-SE) and Mazo (MZF: ENE-WSW). The surface expression of these faults generated the development of echelon faults. Since the affected area was densely inhabited, most of these fractures affect houses and infrastructures. Some of the houses affected by the TZF were damaged 9 months after the eruption. Surprisingly, these houses already had repairs made to the same fractures since the 80s, giving information of previous fault creep moving. During the eruption, shallow seismicity was spatially related to both faults. However, the lack of seismicity after the eruption indicates that the faults went back to creep aseismic behaviour. The mapping and monitoring of these faults (TZF and MZF) is relevant bearing in mind that they have been acting since the 80s, so the mapping of these faults should be included in the land use planning. Furthermore, both faults could act as seismogenic sources triggering volcanic earthquakes with potential high macroseismic intensities. We are currently monitoring these fractures with a Novatest FIPSG100 precision fissurometer. The results obtained offer maximum displacement speeds in both the TZF and the MZF of 2.80 mm/year and minimum speeds of 0.24 mm/year.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CSIC (CSIC-LA PAL-MA-12) y Gobierno de Canarias-Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (227G0165-GEOPALMA).

Las coladas de lava de los centros eruptivos periféricos de la erupción de 2021 de La Palma (Islas Canarias): vulcanología y petrología.

Lava flows from the peripheral eruptive centers of the 2021 La Palma eruption (Canary Islands: volcanology and petrology.

M. Ruiz de Galarreta[1], A. Márquez[1], M.J. Huertas[1], M. Diez[2], E. Ancochea[1], J.J. Coello-Bravo[3], R. Herrera[4] y T. Ubide[5].

1 Dpto. Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. 28040 matiasruizdegarraleta@hotmail.com, amarqu13@ucm.es, huertas@ucm.es, anco@ucm.es
2 School of Mathematics, University of Bristol (UK). mikel.diez@bristol.ac.uk
3 Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello, 38400 Puerto de la Cruz, Santa Cruz de Tenerife. juancoellobravo@gmail.com
4 Área de Geología, ESCET, Univ. Rey Juan Carlos, Grupo de Investigación Tecvolrisk, 28933 Móstoles, Madrid. raquel.herrera@urjc.es
5 The University of Queensland, School of the Environment, Brisbane, Australia. t.ubide@uq.edu.au

Palabras clave: viscosidad de coladas, centros periféricos, erupción de La Palma 2021.

Resumen

La erupción de 2021 en La Palma generó un extenso campo de coladas de lava emitidas mayoritariamente desde centros eruptivos asociados al cono principal, o a través de tubos dentro del campo. La principal excepción son las coladas emitidas por una serie de centros eruptivos que se abrieron fuera del campo, en su flanco sur, los días 25 de noviembre y 4 de diciembre (días 67 y 76 de la erupción). Esas coladas se caracterizaron por una gran fluidez y velocidad. Se ha realizado una caracterización detallada de las coladas de ambos episodios, a través de datos de campo, imágenes de drones y muestras de roca. Los dos episodios vinieron precedidos por la emisión, desde el lado sur del cono, de sendas coladas de lava aa'. A continuación, en unas horas, se abrieron lejos del cono (a 1000-1600 m el 25/11 y 2300-3000 m el 4/12) unas bocas eruptivas con actividad puramente efusiva de corta duración. Las coladas emitidas (aa' y pahoehoe) alcanzaron longitudes de ~50 a ~2500 m con una gran fluidez, cubriendo áreas ~600 a ~260.000 m^2 con espesores muy pequeños (~30 cm a ≤ 2m). Para intentar determinar el origen de la baja viscosidad de estas lavas se ha realizado su estudio petrológico. Se trata de basanitas porfídicas piroxénico-olivínicas muy vesiculares. Tanto en su mineralogía como en su geoquímica las lavas de cada episodio tienen características diferentes, pero similares a las emitidas contemporáneamente desde el cono principal. La baja viscosidad de las coladas de los centros periféricos parece, por tanto, estar relacionada con otros factores distintos a su composición.

Abstract

The 2021 eruption at La Palma produced a wide field of lava flows, erupted mainly from centers associated to the main cone, or emerging from lava tubes. Main exceptions are the lava flows erupted from several vents emerging southward of the lava flow field on November 25th and December 4th (days 67 and 76 of the eruption). These lava flows were very fluid and fast. A detailed characterization of these flows has been made using field data, drone flights and rock samples. Both episodes were preluded by the emission, from the south side of the main cone, of aa' lava flows. Afterwards, in a few hours' interval, several short-live eruptive vents emerged far from the main cone (distances 1000-1600 m on Nov. 25th and 2300-3000 m on Dec. 4th). The emitted lava flows (aa' and pahoehoe) were ~50 to ~2500 m long and very fluid, covering areas ~600 to ~260,000 m^2 with thickness of just ~30 cm to ≤ 2m. To determine the origin of the low viscosity of these lava flows we have examined their petrology. They are porphyritic pyroxene-olivine basanites with high vesicle content. Mineralogically and geochemically the lava flows of each episode are different, but they are alike the lavas emitted from the main cone. The low viscosity of the peripheral lava flows seems related to other causes besides their chemistry.

Evolución de los deltas de lava durante la actividad volcánica de 2021 en La Palma (Islas Canarias).

Evolution of lava deltas during the 2021 volcanic activity in La Palma (Canary Islands).

L. Sáez-Gabarrón[1], I. Galindo[1], D. Sanz-Mangas[1], J. Vegas[2], J.C. García-Davalillo[2], M. Hernández[2], R. Pérez-López[2], C. Camuñas[2], C. Lorenzo Carnicero[2], M.A. Rodríguez-Pascua[2], M.A. Perucha[2], J. López Gutiérrez[2], G. Lozano[2], N. Sánchez[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Unidad Territorial de Las Palmas de Gran Canaria. l.saez@igme.es, ines.galindo@csic.es, d.sanz@igme.es, n.sanchez@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Madrid. g.lozano@igme.es, j.vegas@igme.es, jc.garcia@igme.es, m.hernandez@igme.es, r.perez@igme.es, c.camunas@igme.es, c.lorenzo@igme.es, ma.rodriguez@igme.es, ma.perucha@igme.es, j.lopezgu@igme.es

Palabras clave: delta de lava, evolución, peligrosidad, fases de crecimiento, La Palma.

Resumen

Durante la erupción del volcán de Tajogaite, en la isla de La Palma (2021), se llevó a cabo el seguimiento diario de los dos deltas lávicos a partir de las observaciones de campo y las imágenes tomadas por los drones. El objetivo era identificar el área afectada, estudiar su génesis y evolución, y analizar los peligros asociados a la entrada de la lava en el mar. El primer delta formado tuvo diferentes fases de crecimiento y estuvo activo en superficie, casi hasta el final de la erupción, cubriendo un área de aproximadamente 83 hectáreas. Este delta se emplazó parcialmente sobre el sector norte de un delta lávico previo formado durante la erupción del volcán San Juan. El segundo delta comenzó a formarse a los 64 días de erupción, aproximadamente a 1,3 km hacia el norte del primero y se mantuvo activo durante 4 días, hasta cubrir una superficie de unas 5 hectáreas. La lava alcanzó la costa tras saltar acantilados de unos 85 m de altura, en el primer caso, y de unos 50 m en el segundo, con playas de cantos poco desarrolladas en su base. Cabe destacar que, en algunos casos, aunque no se observaba el crecimiento en superficie del delta lávico, si se pudieron identificar pequeños montículos de lava separados del frente del delta, que indicaban que este seguía recibiendo aporte y creciendo bajo la superficie del mar. La explosividad asociada a la interacción agua-lava generó en algunos momentos la formación de columnas de gases que sobrepasaban decenas de metros la altura del acantilado y que, en presencia de vientos fuertes, transportaban hyaloclastitas de tamaño milimétrico a distancias de varios cientos de metros tierra adentro.

Abstract

During the Tajogaite volcano eruption on La Palma island (2021), daily monitoring of the lava deltas was conducted based on field observations and drone imagery. The goal was to identify the affected area, to study its genesis and evolution and, to analyse the hazards associated with lava entering the sea. The first delta formed underwent various growth phases and remained active almost until the end of the eruption, covering approximately 83 hectares. This delta was partially developed over the northern sector of a previous lava delta formed during the San Juan volcano eruption. The second delta began forming 64 days into the eruption, roughly 1.3 km north of the first, and remained active for 4 days until it covered a surface of 5 hectares. The lava reached the coast after jumping cliffs approximately 85 m high in the first delta and 50 m high in the second, with poorly developed pebble beaches at the base. It should be noted that, in some cases, although the surface growth of the lava delta was not observed, small mounds of lava separated from the front of the delta could be identified, indicating that it continued to receive input and grow under the surface of the sea. Explosivity associated with the water-lava interaction occasionally generated gas columns that exceeded tens of meters in height above the cliff, and in the presence of strong winds, transported millimetre-sized hyaloclastites several hundred meters inland.

Composición modal de las lavas de la erupción del Volcán de Tajogaite (La Palma, 2021).

Mineral assemblage of lavas from the 2021 Tajogaite eruption at La Palma Island.

D. Sanz-Mangas[1], E. Ancochea[2], M.J. Huertas[2], R. Herrera[3], A. Márquez[2], J.J. Coello-Bravo[4] y T. Ubide[5]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). 35003 Las Palmas de Gran Canaria. david.sanz.mangas@ucm.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. 28040 Madrid. anco@ucm.es, huertas@ucm.es, amarqu13@ucm.es
3 Área de Geología, ESCET, Univ. Rey Juan Carlos, Grupo de Investigación Tecvolrisk, 28933 Móstoles, Madrid. raquel.herrera@urjc.es
4 Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello, 38400 Puerto de la Cruz, Santa Cruz de Tenerife juancoellobravo@gmail.com
5 The University of Queensland, School of the Environment, Brisbane, Australia. t.ubide@uq.edu.au

Resumen: En la erupción de La Palma 2021 se emitieron dos tipos litológicos: tefritas piroxénico anfibólicas y basanitas piroxénico olivínicas. Todas son rocas porfídicas y vesiculares bastante homogéneas, pero con diferencias significativas. Las tefritas tienen del 13 al 22% de fenocristales y las basanitas del 22% al 26%. Los fenocristales son mayoritariamente de clinopiroxeno (media: tefritas 11%, basanitas 16%). En las tefritas el segundo fenocristal en abundancia es el anfíbol (media 3,5%), los óxidos Fe-Ti un 1,7%, el olivino un 1,2% y la plagioclasa un 0,4%. En las basanitas no hay prácticamente anfíbol y de media olivino 6,8%, óxidos Fe-Ti 0,5% y plagioclasa 1,1%. La proporción media modal de los fenocristales, sin vesículas ni matriz, es en tefritas $Px_{61}Anf_{19}Ol_{7,6}Pl_{2,3}Ox_{11}$ y en basanitas $Px_{65}Anf_{0,1}Ol_{28}Pl_{4,4}Ox_{2.}$ Las principales variaciones a lo largo de la erupción fueron la desaparición del anfíbol a los pocos días de empezar ésta y el paralelo aumento del olivino que se conservó luego más o menos constante la mayor parte de la erupción, disminuyendo ligeramente los últimos días. El clinopiroxeno fue más escaso los primeros días y luego se mantuvo constante, aumentando ligeramente al final. Los cambios mineralógicos coinciden con variaciones en la química de los magmas.

Palabras clave: La Palma, erupción 2021, Tajogaite, composición mineralógica, análisis modal.

Abstract: *Two main lithological types were emitted in La Palma 2021 eruption: amphibole-pyroxene-bearing tephrites and olivine-pyroxene-bearing basanites. All of them are porphyritic, rich in vesicles, quite homogeneous, with minor differences. The volume fraction of phenocrysts varies essentially from 13 vol% to 22% in tephrites (>0.1mm phenocrysts), to 22% to 26% in basanites. Clinopyroxene phenocrysts are the most abundant with an average of 11% in tephrites, 16% in basanites. In tephrites, amphibole is the second most abundant phenocryst with an average of 3.5%, Fe-Ti oxides 1.7%, olivine 1.2%, plagioclase 0.4%. In basanites there is no amphibole (<1%) and olivine is, on average, 6.8%, Fe-Ti oxides 0.5% and plagioclase 1.1%. The modal proportion of phenocrysts without vesicles or matrix microcrysts is, on average,* $Px_{61}Anf_{19}Ol_{7,6}Pl_{2,3}Ox_{11}$ *in tephrites and* $Px_{65}Anf_{0,1}Ol_{28}Pl_{4,4}Ox_{2}$ *in basanites. The main variation observed over time included the disappearance of amphibole a few days after the start of the eruption, accompanied by an increase in olivine, which remained relatively constant, with a slight decrease in the last few days Clinopyroxene was less abundant in the initial days but then remained constant, increasing slightly towards the end. The mineralogical variations throughout the eruption are aligned with variations in the geochemistry of the magmas.*

Key words: *La Palma Island, 2021 Tajogaite eruption, mineral composition, modal proportion.*

INTRODUCCIÓN

La monitorización petrológica sin-eruptiva es una herramienta que permite una visión directa de las características y posibles cambios del magma emitido durante una erupción. El análisis petrográfico en lámina delgada de muestras de coladas de lava es uno de los primeros pasos que se proponen en las cadenas de trabajo de monitorización petrológica sin-eruptiva (Re et al., 2021). Sin embargo, los resultados de este tipo de análisis no se publican habitualmente en los trabajos sobre la evolución magmática de las erupciones, que se centran principalmente en resultados de análisis más complejos, como química mineral o de roca total.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar la cuantificación del contenido de los componentes principales de los diferentes tipos de rocas y analizar las variaciones más significativas a lo largo de la erupción del Tajogaite de La Palma en 2021. Varios autores han aportado datos sobre la composición modal de las rocas de esta erupción (p.e.: Day et al., 2022; Gisbert et al., 2023 o Sandoval-Velasquez et al., 2023), pero siempre de forma parcial y a partir de un conjunto reducido de muestras.

Nuestro equipo muestreó sistemáticamente las rocas emitidas por el volcán. El muestreo no fue homogéneo, pues mientras en los primeros días el acceso a las coladas

era relativamente sencillo, se fue complicando durante la erupción y hubo momentos en los que las lavas circulaban en tubos o en la parte central del campo de lavas y el muestreo de éstas era imposible.

Tras su estudio petrográfico se seleccionaron para su análisis modal las muestras más representativas. Se realizaron 41 análisis modales, mediante contaje de puntos en lámina delgada, con unos 1100 puntos por lámina, número estadísticamente significativo para rocas de este tamaño de grano. En total se han analizado muestras de 34 coladas (9 tefritas y 25 basanitas) y de 7 rocas piroclásticas. Los resultados obtenidos se expresan en porcentaje en volumen.

RESULTADOS

En la erupción del Tajogaite (La Palma) se emitieron lavas de composición relativamente similar, esencialmente dos tipos principales: tefritas piroxénico–anfibólicas durante los primeros días de la erupción y basanitas piroxénico-olivínicas el resto de los días (p.e. Ubide et al., 2023).

Todas las rocas de la erupción son rocas porfídicas y vesiculares. La vesicularidad varía no sólo entre coladas y piroclastos, sino también entre zonas más brechoides o más masivas de una misma colada. Para que los resultados pudieran ser comparables se muestrearon siempre las partes más masivas de las coladas. En el análisis modal se han distinguido vesículas, fenocristales (>0,1mm) y matriz (<0,1mm). Dentro de los fenocristales se han separado, los mayores de 1mm, de los menores, o microfenocristales (de 0,1mm a 1mm). Los fenocristales y los microfenocristales se han separado además por su mineralogía.

Textura. El porcentaje medio de los diferentes componentes es similar en los dos principales tipos rocosos lávicos (Figs. 1a y 1b): vesículas 13,4% en tefritas y 17% en basanitas; matriz 71,2% y 63,1% respectivamente, y total de fenocristales 15,4% y 19,9%. El contenido medio de fenocristales mayores de 1mm es prácticamente idéntico (5,1% y 5,4%), pero hay menos microfenocristales en las tefritas con respecto a las basanitas (10,3% frente 14,5%, respectivamente).

La variación en el contenido de vesículas en las lavas (Figs. 1c y 1d), es relativamente grande: cuartiles Q1 y Q3 de 6% y 23% en ambos tipos litológicos (índice intercuartílico IQR = Q3-Q1 de 16).

Porfidismo. Si no se considera el contenido en vesículas (Fig. 2), se aprecia de nuevo valores medios similares en los componentes (Figs. 2a y 2b). Las variaciones dentro de cada grupo son escasas, especialmente en las basanitas. La tefrita media está compuesta por un 82,2% de matriz y un 17,8% de fenocristales totales (grado de porfidismo de 17,8, con un IQR de 7) y la basanita media por un 76,0% de matriz y un grado de porfidismo de 24,0% (IQR de 3), un 30% más que en la tefrita.

Mineralogía. La principal diferencia entre los dos tipos composicionales considerados radica en la naturaleza de los fenocristales (Fig.3 y Tabla I).

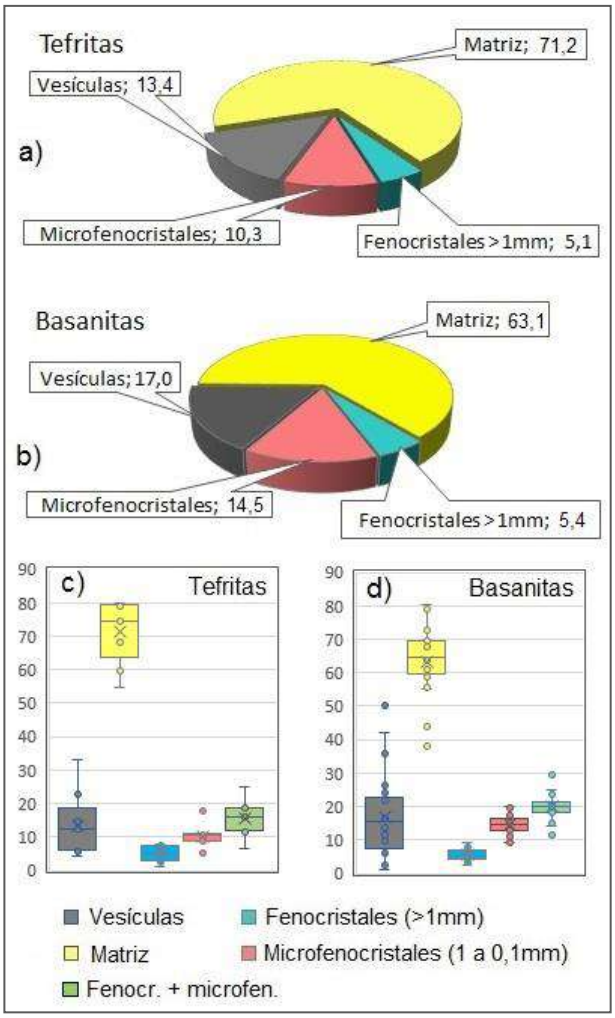


FIGURA 1. *Composición modal general de las rocas considerando las vesículas. a) contenido medio (% vol.) de los diferentes componentes en las tefritas. b) contenido medio (% vol.) en las basanitas. c) variación de los componentes en las tefritas. d) variación en las basanitas.*

Considerando los fenocristales y los microfenocristales juntos, la composición media de la tefrita es $Matriz_{82}Px_{11}Anf_{3,5}Ol_{1,2}Pl_{0,4}Ox_{1,7}$ y la de la basanita $Matriz_{76}Px_{15,7}Anf_{0}Ol_{6,8}Pl_{1,1}Ox_{0,5}$ (Tabla I). Sin la matriz, la composición media de las tefritas es: $Px_{61}Anf_{19}Ol_{7,6}Pl_{2,3}Ox_{11}$ y la de las basanitas $Px_{65}Anf_{0,1}Ol_{28}Pl_{4,4}Ox_{2}$ (Tabla I).

		Px	Anf	Ol	Pl	Ox	Matriz
Sin vesículas	Tefritas	11	3,5	1,2	0,4	1,7	82,2
	Basanitas	15,7	0	6,8	1,1	0,5	76,0
Sin vesículas y sin matriz	Tefritas	61,4	18,7	7,6	2,3	10	
	Basanitas	65,3	0,1	28,1	4,4	2,1	

TABLA I. Contenido (% vol.) sin vesículas de los distintos fenocristales, (fenocristales + microfenocristales, con y sin matriz).

El clinopiroxeno es el fenocristal más abundante en ambos tipos de rocas, pero más en las basanitas (media sin matriz: 61,4% en tefritas y 65,3% en basanitas) (Fig.

3a y 3b). La cantidad de fenocristales de piroxeno (Fig. 3c y 3d) varía esencialmente entre el 53% (Q1) y el 66% (Q3) (IQR: 13) en las tefritas y entre el 61% y el 69% en las basanitas (IQR:8).

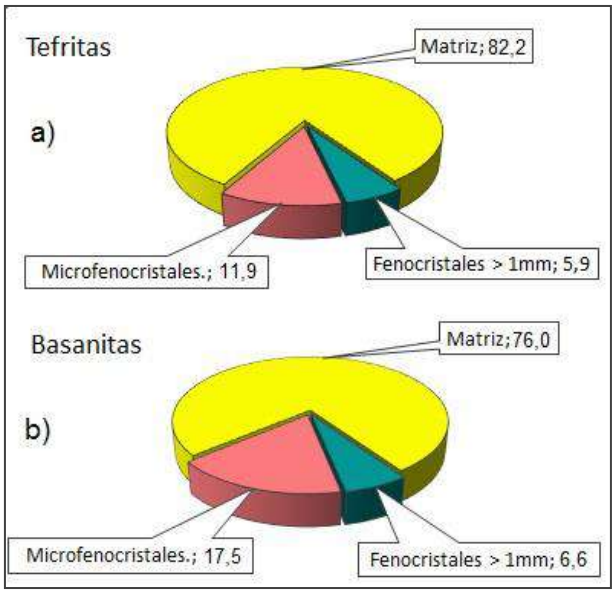


FIGURA 2. *Moda general de las rocas sin vesículas: a) media (% vol.) de las tefritas. b) media (% vol.) de las basanitas.*

El anfíbol es el segundo fenocristal más abundante en las tefritas (media: 18,7%) y prácticamente desaparece en las basanitas. Su proporción varía notablemente de unas tefritas a otras (Q1:10% a Q3: 30%, IQR: 20, Fig. 3c).

La desaparición del anfíbol coincide con el aumento del olivino que pasa de un contenido medio del 7,6% al 23,1%. Su proporción en las tefritas varía considerablemente del 2% (Q1) al 14% (Q3) (IQR: 12); en las basanitas varía menos, del 25% al 32% (IQR: 7) (Figs. 3c y 3d).

La plagioclasa aparece exclusivamente como microfenocristal y en proporciones escasas en los dos tipos rocosos (2,3% en tefritas, 4,4% en basanitas). Los cristales de más de 1mm aparecen esporádicamente y son antecristales (Ubide et al., 2023). Los fenocristales de los óxidos Fe-Ti son frecuentes en las tefritas (media 10%) y más escasos en las basanitas (media 2,1%), siendo variable el contenido en las tefritas (Q1: 5, Q3: 15; IQR: 10).

Lapilli. El número de análisis modales efectuado en lapilli basanítico es escaso, por lo que los resultados son menos representativos. Aun así, aparecen variaciones de los datos con respecto a las coladas, por lo que son de interés. La vesicularidad es muy superior en los lapilli, del orden del 50% de vesículas, frente al 16% de las coladas.

Si se excluye del cálculo el volumen de las vesículas, se aprecian cambios significativos en el grado de porfidismo. De 18-24% de fenocristales medios en las coladas, se desciende al 13% en los lapilli. Es decir, hay una pérdida de entre el 30% y el 50% de fenocristales. El descenso más acusado es en los óxidos Fe-Ti, que se reducen a la mitad.

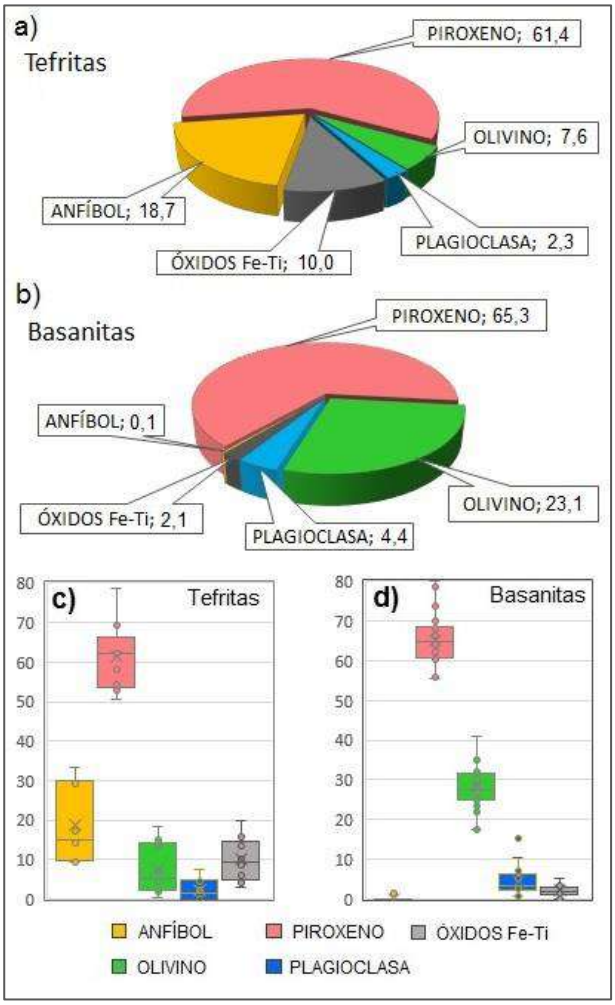


FIGURA 3. *Mineralogía de los fenocristales totales (fenocristales + microfenocristales): a) media en las tefritas. b) media en las basanitas. c) variación en las basanitas. d) variación en las tefritas.*

Variaciones temporales: Se ha analizado la variación temporal del contenido de los distintos componentes a lo largo de la erupción (Figs. 4 y 5).

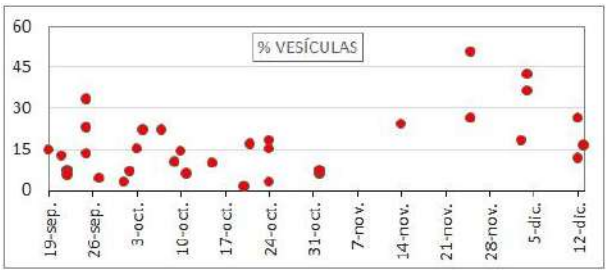


FIGURA 4. *Variación de la vesicularidad a lo largo de la erupción (% en volumen).*

Durante la primera mitad de la erupción (septiembre y octubre) la vesicularidad de las muestras se mantuvo esencialmente por debajo del 23% y aumentó en la segunda parte (noviembre y diciembre) (Fig. 4). En esa

segunda parte se emitieron de las bocas situadas al sur del campo de lavas, coladas pahoehoe con una vesicularidad superior al 30%.

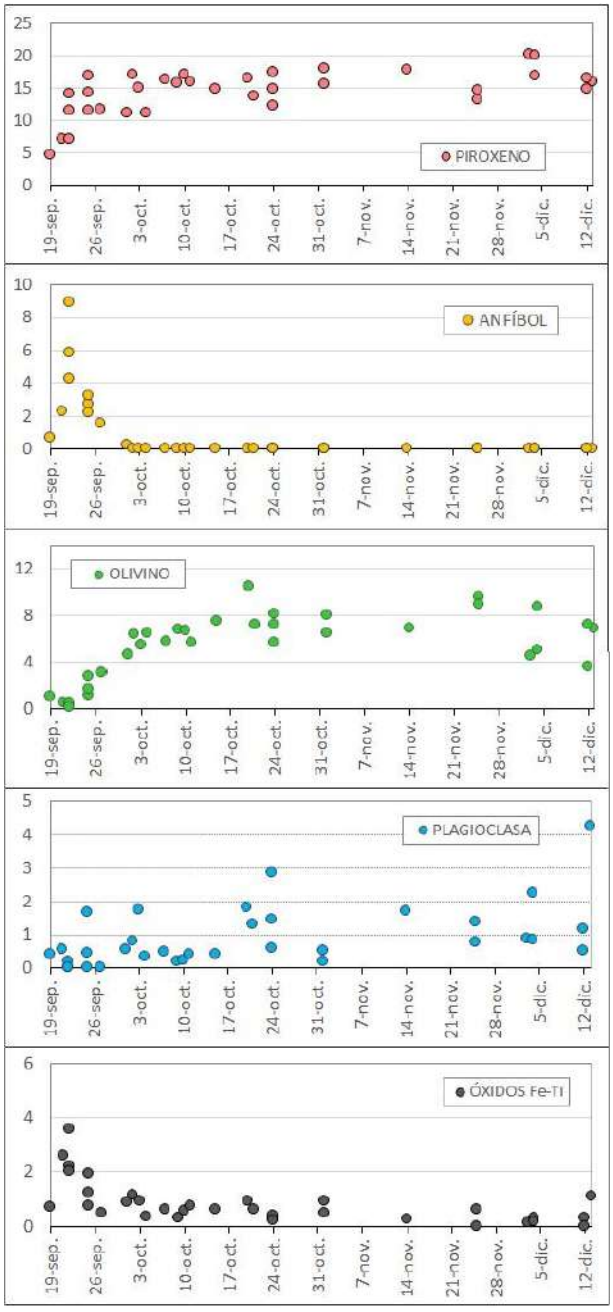


FIGURA 5. *Variación del contenido de los fenocristales totales durante la erupción (% vol. con matriz, sin vesículas).*

Los fenocristales de piroxeno fueron más escasos los primeros días de la erupción y se mantuvieron luego entre un 10% y un 20%, con un ligero aumento en los primeros días de diciembre (Fig. 5).

Los fenocristales de anfíbol fueron frecuentes durante el mes de septiembre y desaparecieron al final de ese mes. En el resto de la erupción solo aparecieron de forma esporádica. Los fenocristales de óxidos de Fe y Ti tuvieron una pauta similar a la del anfíbol, apareciendo en mayores porcentajes en el mes de septiembre.

El olivino aumentó paulatinamente en septiembre y luego se mantuvo entre el 5 y el 10% el resto de la erupción (Fig. 5). En el mes de diciembre su contenido disminuyó ligeramente, en correlación con el descenso en MgO en la roca que tuvo lugar esos días (Day et al., 2022; Ubide et al., 2023). Existen otras variaciones menores, aparentemente menos importantes, pero que deben ser analizadas con más detalle. Tal es el caso, por ejemplo, de los máximos que aparecen en el contenido de las plagioclasas (Ubide et al., 2023).

CONCLUSIONES

Los análisis modales realizados en las rocas de la erupción del Tajogaite permiten conocer con precisión la composición petrológica real de los diferentes tipos rocosos y sus variaciones a lo largo de la erupción.

Las variaciones encontradas han sido, en general, pequeñas pero significativas pues guardan relación con cambios en el sistema magmático y eruptivo a lo largo del tiempo, y ayudan a su mejor comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha contado con la ayuda de la Acción Especial de la UCM AENC1/21-29277, de la financiación del Grupo de Investigación Tecvolrisk URJC y de los proyectos: UCM-FEI22/03; PID2022-141259NB-I00 e IGME-CSIC 20223PAL00. Nuestro agradecimiento a J. Mangas Viñuela por su revisión.

REFERENCIAS

Day, J.M.D, Troll, V.R., Aulinas, M., Deegan, F.M., Geiger, H., Carracedo, J.C., Guillem, G. P. y Pérez-Torrado, F.J. (2022): Mantle source characteristics and magmatic processes during the 2021 La Palma eruption. *Earth and Planetary Science Letters,* 597: 117793.

Gisbert, G., Troll, V.R., Day, J.M., Geiger, H., Pérez-Torrado, Aulinas, M., Deegan, F.M., Albert, H. y Carracedo, J.C. (2023): Reported ultra-low lava viscosities from the 2021 La Palma eruption área potentially biased. *Nature Comunications*, 14-6453.

Re, G., Corsaro, A.R., D'Oriano C. y Pompilio M. (2021): Petrological monitoring of active volcanoes: A review of existing procedures to achieve best practices and operative protocols during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*: 443-107365.

Sandoval-Velasquez, A., Rizzo, A.L., Casetta, F., Ntaflos, T., Aiuppa, A., Alonso, M., Padrón, E., Pankhurst, M.J., Mundl-Petermeier, A., Zanon, V. y Pérez, N.M. (2023): The noble gas signature of the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*: 443 (2023) 107928.

Ubide, T., Márquez, A., Ancochea, E., Huertas, M.J., Herrera, R., Coello-Bravo, J.J., Sanz-Mangas, D., Mulder, J., MacDonald, A. y Galindo, I. (2023): Discrete magma injections drive the 2021 La Palma eruption. *Science Advances*. 9, 27.

Tubos volcánicos y estructuras geomorfológicas asociadas en el campo volcánico de la erupción de La Palma de 2021.

Lava tubes and associated geomorphological structures in 2021's eruption lava fields at La Palma (Canary Islands).

D. Sanz-Mangas[1], O. Fernández Lorenzo[2], I. Galindo[1], R. Pérez-López[3], J. Vegas[4], G. Lozano[3]; J.C. García-Davalillo[3], M. Hernández[4], C. Camuñas[4], C. Lorenzo[4], J. López-Gutiérrez[4], y N. Sánchez[1].

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Alonso Alvarado 43, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, España. d.sanz@igme.es; i.galindo@igme.es; n.sanchez@igme.es
4 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. j.vegas@igme.es; j.lopezgu@igme.es; m.hernandez@igme.es; c.camunas@igme.es; c.lorenzo@igme.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/La Calera 1,28760 Tres Cantos, Madrid, España. r.perez@igme.es; g.lozano@igme.es; jc.garcia@igme.es
2 Tebexcorade - Club de espeleología, descenso de barrancos y montaña de La Palma. Federación canaria de Espeleología, Santa Cruz de La Palma, España. octavio.fl@gmail.com

Palabras clave: tubo volcánico, coladas, jameo, Tajogaite, La Palma.

Resumen

En septiembre de 2021 tuvo lugar la última erupción del archipiélago canario en la isla de La Palma. El volcán se formó en el flanco oeste de la dorsal de Cumbre Vieja, a favor de una fisura eruptiva que expulsó enormes cantidades de lava cubriendo unas 1200 ha de superficie. Los flujos de lava observados durante la erupción llegaron a desarrollar complejos canales que en algunos casos formaron tubos volcánicos, en ocasiones de gran longitud y anchura. La intensa actividad eruptiva y el flujo de lava durante los 85 días de erupción favorecieron la aparición de diversas estructuras de complejidad geomorfológica variable, como shatter rings, jameos o drenajes y sumideros de tubos volcánicos. Los tubos formaron un complejo entramado tridimensional que transportaba lava de forma subterránea a altas temperaturas, desde el centro emisor principal hacia la costa, alcanzando los 6 km de distancia. El trabajo de exploración llevado a cabo sobre el campo de lava actual ha permitido la identificación de 75 jameos y cientos de estructuras asociadas que se han clasificado atendiendo a la relación que puedan tener con el sistema de tubos volcánicos en profundidad. El eje mayor de los jameos varía entre 0,4 - 12 m, siendo muy amplia la variedad de estas estructuras. El estudio del desarrollo de los tubos volcánicos encontrados permitirá entender mejor el comportamiento de los procesos de flujo de coladas de lavas en erupciones. Además, una evaluación del patrimonio geológico en la zona ha destacado alguno de estos elementos por su alto interés científico, lo que, unido a la fragilidad de sus estructuras, ha hecho necesario pedir su protección como Espacio Natural Protegido.

Abstract

On September 19th 2021 the last eruption of the Canary archipelago took place in La Palma island. The resulting lava field finally covered a surface over 12 km^2. Many lava flows observed developed lava channels that in some cases ended up forming lava tubes. Such activity formed different geomorphological surface structures such as skylights and lava-tube drainages. During late October and November lava tubes may have formed a 3D subterranean network that continuously transported lava at high temperatures up to 6 km away from the main eruptive vent, almost reaching the coast. The exploration field work carried out on the lava field has allowed us to identify over 75 skylight and related structures, that have been classified according to the expected characteristics regarding the access they could provide to an underlying lava tube. Length of the major axis of the skylights ranges from 0,4 to 12 m. Deep research on lava tubes development will help to better understand the behaviour of subsurface lava flow processes in eruptions. Finally, a geological heritage assessment has highlighted the scientific value and fragility of some of these elements, which has made to request the necessity of their protection as Protected Natural Area.

Análisis de las estructuras de inflación-deflación asociadas a tubos lávicos de la erupción del Volcán de Tajogaite (La Palma, 2021).

Inflation-deflation lava-tube related structures in Tajogaite volcano eruption La Palma 2021 (Canary Islands).

D. Sanz-Mangas[1]*, I. Galindo[1], O. Fernández Lorenzo[2], J. Vegas[3], R. Pérez-López[4], J.C. García-Davalillo[4], M. Hernández[3], C. Camuñas[3], J. López-Gutiérrez[3], Lorenzo. C[3], N. Sánchez[1].

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Alonso Alvarado 43, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, España. d.sanz@igme.es; i.galindo@igme.es; n.sanchez@igme.es
2 GE Tebexcorade. Club de espeleología, descenso de barrancos y montaña de La Palma. Federación Canaria de Espeleología, Santa Cruz de La Palma, Spain. octavio.fl@gmail.com
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España.j.vegas@igme.es; m.hernandez@igme.es; c.camunas@igme.es; j.lopezgu@igme.es; c.lorenzo@igme.es
4 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid, España. r.perez@igme.es; jc.garcia@igme.es

Palabras clave: shatter ring, tubo volcánico, pahoehoe, coladas.

Resumen

Los shatter rings son estructuras elípticas, caracterizadas por bordes anulares de fragmentos, bloques de la superficie lávica y una depresión central, estando definidas en volcanes como el Kīlauea, Mauna Loa, Fogo, Hallmundarhraun o Etna (Orr, 2011). Estas estructuras se relacionan con la génesis de tubos volcánicos y comprender su formación y evolución es clave para entender el emplazamiento de flujos subterráneos activos. El presente trabajo reporta el primer shatter ring o anillo de ruptura estudiado en Canarias formado durante la erupción de la isla de La Palma de 2021. El estudio de su evolución a través de dron, así como el trabajo de campo ha permitido analizar en detalle la relación entre el tubo volcánico y este shatter ring y estudiar su evolución. El incremento y disminución cíclicos de la presión de lava dentro del tubo, combinado con la forma en embudo de una sección del canal lávico, favorecieron los procesos que dieron lugar al levantamiento y fracturación parcial del techo del tubo y a su hundimiento posterior, formando una estructura con una morfología elipsoidal de 26 por 20 m. La presencia de shatter rings permite identificar tubos volcánicos tanto en campos volcánicos terrestres, como extraterrestres.

Abstract

Shatter rings are elliptical lava flow's morphological features characteristic of volcanoes like Kilauea, Mauna Loa, Fogo, Hallmundarhraun or Etna (Orr, 2011). These structures are associated with lava tubes and provide valuable information of subterranean lava flows for ongoing eruptions. The present work reports the first shatter ring studied in Canary Islands at La Palma island eruption of 2021 in Spain. The study of the evolution with drones in combination with fieldwork has allowed for the first time to witness the transformation of a lava tube into a shatter ring. The cyclical increasing and decreasing of the lava stream's pressure inside the tube, combined with funnel-shaped channelling downslope, induced the development of the massive structure as a lava tube breakout, forming a structure with an ellipsoidal morphology and dimensions of 26 by 20 m. Shatter rings are directly related to lava tubes, providing a valuable information about them both in terrestrial and extraterrestrial volcanic fields.

Referencias

Orr, T.R. (2011). *Bull of Volcanology* 73(3), 335-346.

Apertura de centros emisores fisurales secundarios en la erupción de La Palma en 2021

Opening of secondary fissure-type vents at 2021 Cumbre Vieja volcanic eruption

D. Sanz-Mangas[1], I. Galindo[1], R. Pérez-López[3], M.A. Rodríguez-Pascua[2], J. Vegas[2], M.A. Perucha[2], J.C. García-Davalillo[3], M. Hernández[2], C. Camuñas[2], C. Lorenzo[2], J. López-Gutiérrez[2], J. Mediato[2], R. Marrero[1] y N. Sánchez[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Alonso Alvarado 43, 35003, Las Palmas de Gran Canaria, España. d.sanz@igme.es, i.galindo@igme.es, r.marrero@igme.es, n.sanchez@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003, España. ma.rodriguez@igme.es, j.vegas@igme.es, ma.perucha@igme.es, m.hernandez@igme.es, c.camunas@igme.es, c.lorenzo@igme.es, j.lopezgu@igme.es, jf.mediato@igme.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ La Calera 1. Tres Cantos, Madrid, 28760, España. r.perez@igme.es, jc.garcia@igme.es

Palabras clave: Erupción fisural, centros emisores, dique de alimentación, volcano-tectónica, erupciones históricas.

Resumen

En la isla de La Palma, todas las erupciones históricas se han concentrado en una fisura principal y, en algunos casos, se han abierto otras fisuras eruptivas a una distancia de hasta 4 km de la principal. En el caso de la erupción del Volcán de Tajogaite en 2021, la actividad se concentró principalmente en una fisura eruptiva alineada NW-SE. Sin embargo, entre el 24 de noviembre y el 5 de diciembre se propagó un dique de alimentación secundario desde la zona sur de la fisura eruptiva principal hacia el SW en dos pulsos diferenciados, formando pequeñas fisuras eruptivas segmentadas de dirección NW-SE, N-S y E-W. Los centros de emisión más distales se abrieron a unos 3 km de distancia de la fisura eruptiva principal. La apertura de estos centros de emisión, así como la propagación de su dique de alimentación, no fue percibida por los sistemas de vigilancia durante la emergencia, posiblemente debido al escaso volumen de magma que emitieron, su alta desgasificación y el ruido sísmico asociado a la propia erupción. La dificultad para pronosticar la apertura de centros de emisión secundarios lejos de la actividad eruptiva principal hace necesario revisar cómo ha sido el comportamiento de esta erupción y otras históricas con el fin de buscar similitudes que puedan contribuir a este pronóstico. Este trabajo se realiza mediante el estudio de la relación de las características geológicas previas del terreno (propiedades mecánicas, estructurales y otras) que pueden favorecer la propagación de un dique hasta la superficie. Además, es fundamental agudizar la observación directa en un radio de 4 km para identificar anomalías (gases, fracturas, deformación u otras).

Abstract

On La Palma Island, historical eruptions have been mainly aligned along a main fissure-type vent, and in some cases, opening vents up to 4 km from the main fissure. In the case of the 2021 eruption of the Tajogaite Volcano, the activity was primarily concentrated along a NW-SE trend-fissure-type vent. However, between November 24th and December 5th, a secondary feeder dike propagated from the southern part of the main eruptive fissure towards the SW in two differentiated pulses, forming relatively short-fissure-type vents trending NW-SE, N-S, and E-W. The further distal vent openings occurred approximately 3 km away from the main eruptive fissure. The multi-vent opening, as well as the propagation of the new feeder dike, went unnoticed by surveillance systems. A review of the vent-opening behaviour of historical eruptions due the challenge in distal vent-opening forecast at distances far from the main fissure is imperative. In addition, comparison of 2021 eruption with historical eruptions may contribute to this issue, especially regarding the previous geological characteristics of the terrain (mechanical properties, structure, among others) that may favour the dike-propagation to the surface. Furthermore, the intensification of direct observation is essential within a 4km.radius to identify anomalies (fractures, gases, deformation, or others).

Cartografía geológica del campo de lavas del Volcán de Tajogaite (2021), La Palma

Geological mapping of the lava-flow field of Tajogaite volcano (2021), La Palma (Canary Islands, Spain)

D. Sanz-Mangas[1], G. Lozano[2], I. Galindo[1], J. Vegas[2], R. Pérez-López[3], J. López-Gutiérrez[2], J.C. García-Davalillo[3], M. Hernández[2], C. Camuñas[2], C. Lorenzo[2], M.A. Rodríguez-Pascua[2], M.A. Perucha[2], L. Sáez-Gabarrón[1] y N. Sánchez[1].

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Alonso Alvarado 43, 35003, Las Palmas de Gran Canaria, España. d.sanz@igme.es ; i.galindo@igme.es ; l.saez@igme.es ; n.sanchez@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. g.lozano@igme.es ; j.vegas@igme.es ; j.lopezgu@igme.es ; ma.rodriguez@igme.es ; ma.perucha@igme.es ; m.hernandez@igme.es ; c.camunas@igme.es ; c.lorenzo@igme.es ;
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ La Calera 1. Tres Cantos, Madrid, 28760, España. r.perez@igme.es ; jc.garcia@igme.es

Palabras clave: cartografía geológica, coladas, Cumbre Vieja, Tajogaite, La Palma

Resumen

La dorsal de Cumbre Vieja en la isla de La Palma es uno de los edificios volcánicos más activos de Europa, contando con 8 erupciones históricas y con una antigüedad mayor de 123 ka (Ancochea *et al*., 1993; Carracedo *et al*., 2001). Tras 50 años de la erupción del Teneguía, en 1971, el magma se abrió paso a través del flanco oeste de esta dorsal formando el Volcán de Tajogaite, el 19 de septiembre de 2021. Durante la erupción, el magma ha cubierto una extensión de unos 12 km^2, siendo la erupción histórica en la isla que más volumen de lava ha emitido. Durante los 85 días que duró la erupción se realizaron vuelos fotogramétricos con drones, así como vídeos que permitieron hacer pronósticos de avance de las coladas de lava diarios y a demanda durante la emergencia. La cartografía de las coladas emplazadas, junto con las observaciones directas durante la erupción y el trabajo de campo posterior, ha permitido realizar el primer mapa geológico del campo de lavas de la erupción de 2021, en el que se pueden diferenciar hasta 13 fases de emisión. Esta cartografía es básica para futuras investigaciones sobre la erupción del Volcán de Tajogaite y facilitará los estudios petrológicos, geoquímicos, geomorfológicos y de patrimonio geológico, entre otros, así como las labores de recuperación de la isla de La Palma.

Abstract

The Cumbre Vieja volcanic edifice on the island of La Palma is one of the most active volcanoes in Europe, with 8 historical eruptions and an age greater than 123 ka (Ancochea et al., 1993; Carracedo et al., 2001). The volcano known as Tajogaite emerged in 2021 through the flank of a prehistoric crater. The volcano covered an area about 12 km^2. During the 85 days of the eruption, photogrammetric drone flights were conducted that aided in emergency response by providing daily forecasts of lava flow progression. Subsequently, the photo interpretation of the emplaced flows, combined with fieldwork, has allowed for the creation of the first geological map of the lava flow from the 2021 eruption. This work has revealed 13 phases of lava flows. This map will provide a better understanding of the lava flow field that emerged during the eruption to facilitate restoration and heritage protection tasks.

Referencias

Ancochea E, Hernán, F. Cendrero, A. Cantagrel, J.M., Fúster, J.M., Ibarrola, E. y Coello, J. (1994). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 60, 243-262.

Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., de la Nuez., J, y Pérez Torrado, F.J. (2001). *Estudios Geológicos* 57, 175-273.

Evolución submarina de los deltas de lava durante la erupción del año 2021 de la isla de La Palma.

Underwater lava deltas evolution during the 2021 eruption of La Palma Island.

J.T. Vázquez[1], M. Gómez-Ballesteros[2], O. Sánchez-Guillamón[1], J.A. Lozano-Rodríguez[3], R. Casillas[4], A. Brenes[5], M.J. Sánchez-García[5], M. García[6], D. Palomino[1], A. González-Vega[3], J.P. Martín-Díaz[3,4], C. Presas-Navarro[3], N. Sánchez[7], I. Galindo[7] y E. Fraile-Nuez[3]

1 Centro Oceanográfico de Málaga, Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, Puerto Pesquero s/n, 29640 Fuengirola, Málaga. juantomas.vazquez@ieo.csic.es, olga.sanchez@ieo.csic.es, desiree.palomino@ieo.csic.es
2 Servicios Centrales, Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, C/ Corazón de María, 8, 28002 Madrid. maria.gomez@ieo.csic.es
3 Centro Oceanográfico de Canarias, Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, C/ La Farola del Mar, 22, Dársena Pesquera, 38180, Santa Cruz de Tenerife. ja.lozano@ieo.csic.es, alba.gonzalez@ieo.csic.es, carmen.presas@ieo.csic.es, eugenio.fraile@ieo.csic.es
4 Universidad de La Laguna, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n, 38200 San Cristóbal de La Laguna. rcasilla@ull.edu.es, jmartidi@ull.edu.es
5 Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. alex.brenes.rueda@gmail.com, mariajose.sanchez@ulpgc.es
6 Centro Oceanográfico de Cádiz, Instituto Español de Oceanografía, IEO-CSIC, Muelle de Levante, 11006 Cádiz. marga.garcia@ieo.csic.es
7 Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Unidad Territorial de Canarias, C/ Alonso Alvarado, 43, 2ºA. 35003 Las Palmas de Gran Canaria. n.sanchez@igme.es, i.galindo@igme.es

Palabras clave: deltas de lava, geomorfología submarina, plataforma, talud, batimetría multihaz.

Resumen

Se han estudiado los cambios en la morfología submarina de la isla de La Palma a partir de datos batimétricos multihaz adquiridos antes, durante y después de la erupción volcánica del año 2021. Se formaron dos deltas de lava sobre la plataforma y el talud del suroeste de la isla. El delta norte se formó en la plataforma interna al sur del puerto de Tazacorte. El delta sur alcanzó el antiguo borde de la plataforma, se situó sobre un afloramiento rocoso, y se adosó a la parte norte del delta de lava de la erupción de 1949. Los flujos de lava submarinos se canalizaron en depresiones de la plataforma y barrancos submarinos labrados sobre el talud superior y el borde de la plataforma. Los cambios en la morfología se han localizado hasta una profundidad de 360 m y a 1,2 km de la línea de costa inicial. Las coladas de lava avanzaron por el fondo marino como lavas "aa" en la zona proximal y *mega-pillows* en la base del frente submarino. El seguimiento submarino de esta erupción ha permitido estudiar, en tiempo real, la llegada de las coladas de lava al mar y las modificaciones sobre la costa y el fondo marino.

Abstract

The changes in underwater morphology of La Palma island have been studied using multibeam bathymetric data acquired before, during and after the 2021 volcanic eruption. Two lava deltas were formed on the insular shelf and upper slope. The northern one was located on the inner shelf to the south of Tazacorte harbour. The southern one reached the former shelf edge, where it overlaid a rocky outcrop, and was attached to the northern side of the lava delta formed during the 1949 eruption. Submarine lava flows were channeled through depressions on the shelf and gullies carved on the upper slope and the shelf border. The changes in morphology have been located at least at a 360 m depth and 1.2 km from the initial coastline. The lava flows advanced along the seabed as "aa" flows in the proximal zone and mega-pillow flows at the base of the submarine front. The underwater monitoring of this eruption made it possible to study, in real time, the arrival of the lava flows to the sea and the modifications on the coast and the seabed.

Primera acción de geoturismo en el Volcán de Tajogaite. El sendero de Cabeza de Vaca, La Palma.

First geotourism action on the Tajogaite volcano. The Cabeza de Vaca trail, La Palma.

J. Vegas, I. Galindo y N. Sánchez

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). 28003 Madrid. j.vegas@igme.es, n.sanchez@igme.es, ines.galindo@csic.es

Palabras clave: geoturismo, capacidad de carga, sendero, volcán, La Palma.

Resumen

Tan sólo tres meses después de finalizada la erupción de La Palma (13 diciembre 2021) se habilitó y reconstruyó el sendero 'Cabeza de Vaca' que llega directo al nuevo volcán para así responder ordenadamente, con la máxima seguridad, a la alta demanda del turismo ante la temporada de Semana Santa 2022. Para ello se realizó un grupo de trabajo formado por el Cabildo de La Palma (Consejerías de Emergencias, Medio Ambiente y Turismo), el Ayuntamiento de El Paso, Revivir el Valle y el IGME-CSIC para desarrollar la primera acción en materia de geoturismo de esta erupción. Desde las administraciones locales se ejecutaron las obras de habilitación, señalización, vigilancia del sendero y gestión de los grupos de visitantes; y desde la ciencia se realizó el diseño del sendero, el cálculo de la capacidad de carga para minimizar la erosión; protocolo de actuación en caso de incidencia de gases; cursos teóricos y de campo para la capacitación de los guías y el personal de las empresas de turismo locales para la interpretación del patrimonio geológico de la erupción. De esta forma, se ha contribuido inmediatamente a la recuperación de las empresas locales de turismo de naturaleza que habían quedado muy afectadas durante la erupción, ofreciéndoles un producto turístico único, que es uno de los más demandados en la actualidad. Para la campaña de verano 2022, el sendero se re-diseñó con un circuito circular desde el Llano del Jable a partir de la capacidad de carga que puede soportar para minimizar aún más la erosión y mejorar el acceso de los grupos de visitantes hasta la zona próxima al cono principal. Esta ha sido una experiencia de éxito que se puede extrapolar a otras zonas del mundo afectadas por erupciones volcánicas.

Abstract

Only three months after the end of the eruption on La Palma (13 December 2021), the 'Cabeza de Vaca' trail that leads directly to the new volcano was enabled and reconstructed in order to respond in an orderly manner, with maximum safety, to the high demand of tourism before the Easter season in 2022. To this end, a working group was formed by the Cabildo de La Palma (Departments of Emergencies, Environment and Tourism), the El Paso Town Council, Revivir el Valle and the IGME-CSIC to develop the first geotourism action of this eruption. The local administrations carried out the fitting out, signposting, monitoring of the trail and management of visitor groups; and the scientific side carried out the design of the trail, the load capacity of visitors to minimise erosion, the protocol for action in case of of gas emissions, and theoretical and field courses to train guides and staff of local tourism companies in the interpretation of the geoheritage of the eruption. In this way, it has immediately contributed to the recovery of local nature tourism businesses that had been affected during the eruption, offering them a unique tourism product, which is one of the most sought-after today. For the summer 2022, the trail was re-designed with a circular circuit from Llano del Jable based on the carrying capacity it can withstand to further minimise erosion and improve access for visitor groups to the area near the main cone. This has been a successful experience that can be extrapolated to other areas of the world affected by volcanic eruptions.

Interacción entre fallas, fluidos e hidratos de gas en el Margen Pacífico de la Península Antártica
Interaction of faults, fluids and gas hydrates in the Pacific Margin of the Antarctic Peninsula

R. Arasanz[1], R. Urgeles[1], R. Bartolomé[1], L.F. Pérez[2], R. León[3]

1 Institut de Ciències del Mar (CSIC), Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona, Spain. raquel@icm.csic.es, urgeles@icm.csic.es, rafael@icm.csic.es
2 Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), Universitersbyen 81, 8000 Århus, Denmark. lfp@geus.dk
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Ríos Rosas, 23. 28003 – Madrid, Spain. r.leon@igme.es

Palabras clave: Península Antártica, Subducción, Discordancias, Fallas, Hidratos de gas

Resumen

El margen pacífico de la Península Antártica presenta una tectónica compleja, marcada por la subducción de la antigua placa Phoenix bajo la placa de las Shetland del Sur. A través del análisis tectónico y la estratigrafía sísmica del margen continental Pacífico de las Shetland del Sur se pretende comprender la interrelación entre la actividad de las fallas, los hidratos de gas y la migración de fluidos ricos en hidrocarburos. Para ello, se han utilizado datos de sísmica de reflexión multicanal para la identificación de fallas, BSR (reflector simulador del fondo; supuesta base de los hidratos de metano) y discordancias. En la zona de la fosa, se han identificado cuatro discontinuidades estratigráficas (a', a, b y c), que se han correlacionado con las descritas por otros autores en el Mar de Scotia. Los resultados preliminares de la interpretación de los perfiles muestran el fin de la subducción en el margen pacífico de la Península Antártica marcado por el reflector b. Por tanto, esta discontinuidad permite establecer un marco temporal de la actividad de las fallas a lo largo del talud superior. Además, se ha detectado una relación entre la densidad de ocurrencia de las fallas identificadas en el talud y la presencia de hidratos, identificados a través del BSR, lo que parece indicar que estas fallas funcionan como vías de migración preferente para los hidrocarburos. En el talud superior, alguna de las fallas presenta actividad post-subducción, y la eventual rotura del sello de hidrato con la potencial migración de hidrocarburos al fondo marino.

Abstract

The Pacific margin of the Antarctic Peninsula displays a complex tectonic setting. The trench formed by the subduction of the ancient Phoenix Plate beneath the South Shetland Plate is the main tectonic feature. This study implements tectonic and seismic stratigraphy analyses on the Pacific continental margin of the South Shetland Islands, to understand the relationship between fault activity, gas hydrates and the migration of hydrocarbon-rich fluids. Seismic unconformities, faults, and BSR (Bottom Simulating Reflector; supposed base of the gas hydrates) are identified in a broad dataset of multichannel reflection seismic profiles. In the trench area, four stratigraphic discontinuities named a', a, b, and c, have been identified and correlated with those described by other authors in the Scotia Sea. Among them, discontinuity/reflector b marks the end of the subduction along the Pacific margin of the Antarctic Peninsula, allowing to establish the temporal framework for the fault activity. In addition, our preliminary results show a spatial relationship between fault density and hydrate occurrence on the slope, potentially indicating hydrocarbon migration along the faults. On the upper slope, some of the faults show post-subduction activity, and potential breach of the hydrate seal with the eventual hydrocarbon migration to the seafloor.

3D modeling of gas hydrates distribution in South Hydrate Ridge (Cascadia accretionary prism, offshore Oregon) through geological time

Modelización 3D de la distribución de hidratos de gas en el South Hydrate Ridge (prisma de acreción de Cascadia, costa afuera de Oregón)

P. Cabello[1,2], M. Marin[2,3], T. Cassola[4], O. Falivene[5], M. Gil-Ortiz[2,6], L.M. Yeste[7], A. Agustí[8], R. Uranga[1,2], C. Berndt[9]

1 Dept. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. pcabello@ub.edu, ruranga@ub.edu
2 UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona
3 SLB, Abingdon Technology Center, OX14 4RU Milton, United Kingdom. mperez92@slb.com
4 SLB, The Hague Office, Parkstraat 83 (Netherlands). TCassola@slb.com
5 Shell International Exploration and Production, The Hague (Netherlands). Oriol.Falivene@shell.com
6 Dept. Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. marc.gilortiz@ub.edu
7 Sedimentary Reservoir Workgroup (SEDREGROUP). Dpto. Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada. lmyeste@ugr.es
8 Independent researcher
9 GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany. cberndt@geomar.de

Resumen: El South Hydrate Ridge (SHR) es una estructura anticlinal que forma parte del prisma de acreción de Cascadia, situado costa afuera de Oregón. El SHR ha sido objeto de múltiples estudios multidisciplinares y campañas oceanográficas enfocados en comprender el funcionamiento de los sistemas de hidratos de gas. En este trabajo presentamos un modelo dinámico 3D de esta estructura que muestra la distribución de hidratos de gas a lo largo del tiempo geológico, que parte de datos previos y de modelos 2D ya publicados. El modelo reproduce la compleja estructura del SHR y distingue un total de 7 unidades estratigráficas de edades desde el Plioceno hasta la actualidad, formadas principalmente por arcillas limosas y arcillas interestratificadas con arenas. El modelo predice una distribución heterogénea de la saturación de hidratos de gas en la actualidad, siendo los flancos de la cresta principal actual y algunos altos secundarios las zonas con mayor concentración en hidratos (hasta el 23% de la porosidad). Según el modelo, el inicio de formación de hidratos ocurrió principalmente entre 1.7 Ma y 1.6 Ma, y su acumulación se ha mantenido a lo largo de la evolución del *ridge*, alternando con momentos de disociación en determinadas zonas. Dicha distribución variable y la alternancia de momentos de formación y disociación responderían al crecimiento diferencial de las estructuras que forman el SHR, que controlarían tanto la disponibilidad de gas, que migraría ascendiendo por los estratos deformados, como la distribución de la zona de estabilidad de los hidratos.

Palabras clave: Hidratos de gas, zona de estabilidad de hidratos de gas, gas biogénico, South Hydrate Ridge, Prisma de acreción, Cascadia

Abstract: *South Hydrate Ridge (SHR) is an anticlinal structure that is part of the Cascadia accretionary prism, located offshore of Oregon. SHR has been the subject of multiple multidisciplinary studies and oceanographic campaigns focused on understanding the functioning of gas hydrate systems. Herein, we present a 3D dynamic model of SHR that simulates the distribution of gas hydrates over geological time. This model is based on the application on petroleum system modeling tools and builds upon previously published data and results from 2D models already published. The model reproduces the complex structure of SHR and distinguishes a total of 7 stratigraphic units (from the Pliocene to the Present), primarily composed of silty clays and clays interbedded with sands. The model predicts a heterogeneous distribution of gas hydrate saturation in SHR at present, with higher values observed on the flanks of the main ridge and on the crests of secondary highs (maximum values of up to 23% of porosity). According to the model, the initiation of hydrate formation occurred mainly between 1.7 Ma and 1.6 Ma, and its accumulation has persisted throughout the evolution of the ridge, alternating with dissociation in certain areas and moments. Such variable distribution and the alternation of formation and dissociation would respond to the differential growth of the structures forming the SHR. These structures control the availability of gas, which migrates upward through deformed strata, and would influence the distribution of the gas hydrate stability zone.*

Key words: *Gas hydrates, Gas hydrate stability zone, biogenic gas, South Hydrate Ridge, accretionary prism, Cascadia*

INTRODUCTION

Hydrate Ridge is a N-S-trending anticline, approximately 25 km long and 7 – 10 km wide, located 80 km offshore Oregon's coast, in the mid-to-lower continental slope, at water depths ranging between ~600 m and 1,500 m bsl. It is part of the Cascadia accretionary complex that formed by the subduction of the Juan de Fuca Plate beneath the North America Plate. The presence of gas hydrates in the Hydrate Ridge has been demonstrated (Tréhu et al., 2003) and the area has been subject of numerous multidisciplinary studies and oceanographic campaigns aiming for the understanding of gas hydrate accumulations (e.g., Tréhu et al., 2003; Bangs et al., 2011; Crutchley et al., 2015).

This study focuses on the southern part of the ridge, on South Hydrate Ridge (SHR), studied by the ODP Leg 204. This structurally complex area is characterized by several N-S trending anticlines that are cored by accreted and highly deformed units, late Pliocene-early Pleistocene in age (Tréhu et al., 2003). These anticlines separate slope basins filled with early Pleistocene to Holocene sediments. These deposits unconformably overlie the deeper accreted units and locally onlap the anticline structures, which grew coevally to the deposition of the Quaternary units (Chevallier et al., 2006) (Fig. 1).

Building up on data and previous research, our objective was to model the distribution of gas hydrates across South Hydrate Ridge by using a Petroleum Systems Modeling approach (Cabello et al., 2021). The research aims to achieve the following objectives: 1) to predict gas hydrate saturation through geological time in SHR; 2) to identify the onset of gas hydrate formation; and 3) to investigate the controls of gas hydrate distribution throughout the SHR.

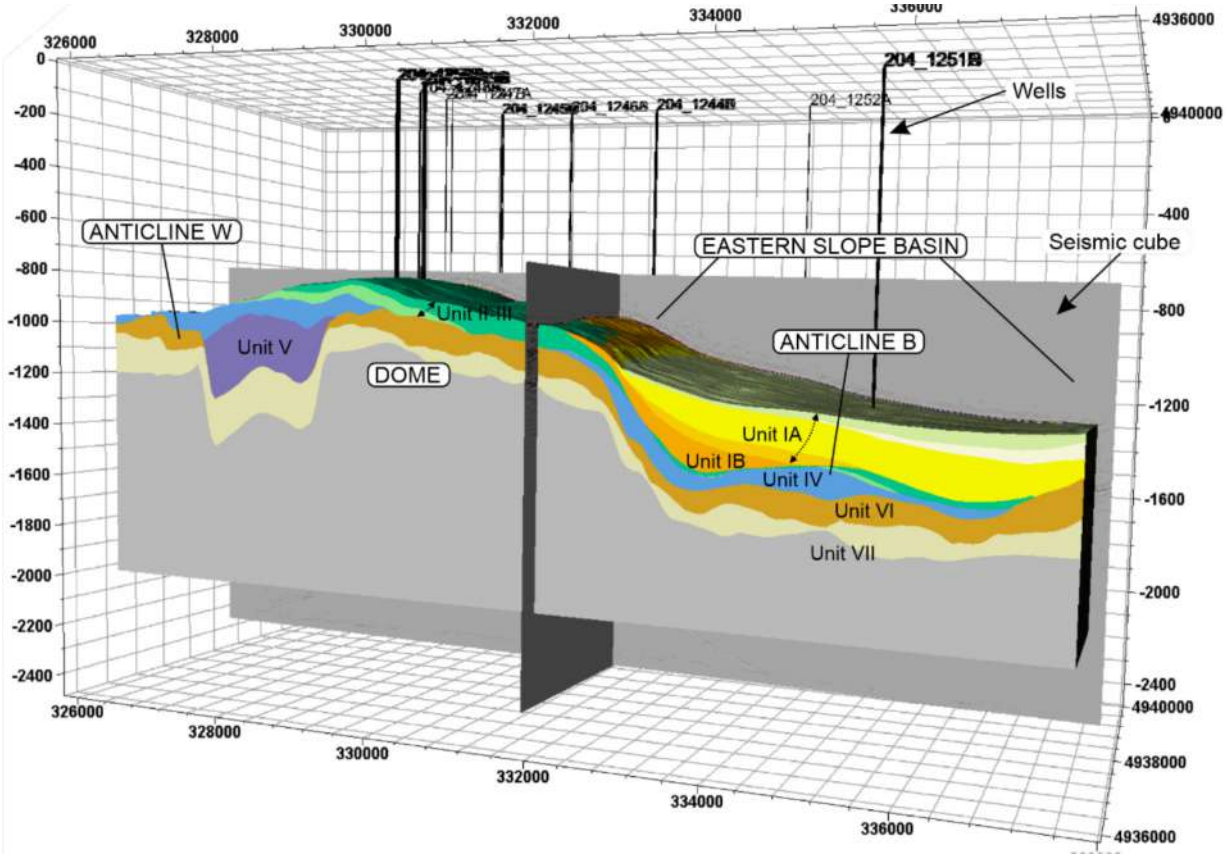


FIGURE 1. Three-dimensional model of South Hydrate Ridge showing the structure (except faults) and the stratigraphic units distinguished, with ages that range from the Pliocene to the Holocene. The model was built based on the interpretation of key horizons on a 3D seismic cube, following earlier interpretations by Chevallier et al. (2006). Coordinates are in UTM84, Zone 10N. Vertical exaggeration is 3x.

MODELING APPROACH

The model was built employing PetroMod™, a petroleum systems modeling software that allows creating pressure-temperature-driven dynamic models. The modeled area is 4 km by 12 km, and coincides with the extent of multichannel 3D seismic cube acquired in 2000 for the preparation of the ODP Leg 204 (Tréhu and Bangs, 2001). In this area, information from 9 drilling sites from the ODP Leg 204 was also available. Seismic data was used to interpret the structure of SHR (Fig. 1) using Petrel™ (SLB). The model distinguishes 7 depositional units, Unit I to Unit VII, from younger to older, equivalent to those interpreted by Chevallier et al. (2006). Stratigraphic unit ages range from present-day to 1.6 Ma. The main lithologies in these units correspond to stratified silty clays and clays with variable amounts of organic components (i.e. diatoms, foraminifera, nannofossils) and total organic carbon

(TOC), interbedded with fine- and coarse-grained sand (Tréhu et al., 2003). A facies classification derived from a sedimentological analysis of cores from the 9 sites, was used to assign mechanical, thermal, and geochemical properties to each stratigraphic unit. Mechanical and thermal properties are based on mixes of the three main lithologies described in cores (clay, silt and sand), while TOC and hydrogen index (HI) values are obtained from well data.

Minor amounts of thermogenic gas has been locally sampled both as free gas and in the gas hydrate structure (Tréhu et al., 2003), however, for simplicity only biogenic gas generation was considered in the modeling. The biogenic reaction considered for the gas generation was the Middelburg function (Middelburg, 1989), which describes the degradation of organic matter at low temperatures in marine sediments as function of the time elapsed since deposition and the TOC.

Thermal boundary conditions required by the models include paleobathymetric reconstructions, sediment-water interface temperatures (SWIT) calculations and basal heat flow throughout geological time. Paleowater depth variations were defined by creating paleobathymetric maps at discrete time steps, based on the structural reconstructions by Chevallier et al. (2006).

SWIT values through time were estimated by factoring in historical air temperatures and considering latitude and paleowater depth variations over geological time (Wygrala, 1989). Basal heat flow maps were built departing from heat flow measurements from the ODP Leg 204.

To simulate fluid migration, a combination of Darcy Flow method applied for impermeable cells and Invasion Percolation method for permeable cells was used. For simplicity, the model did not incorporate explicitly faults. Additionally, the anaerobic oxidation of methane was not included in the simulation, as this process is not supported by the software.

Finally, the model was calibrated to present-day measured constraints on temperature and pressure data from the available wells.

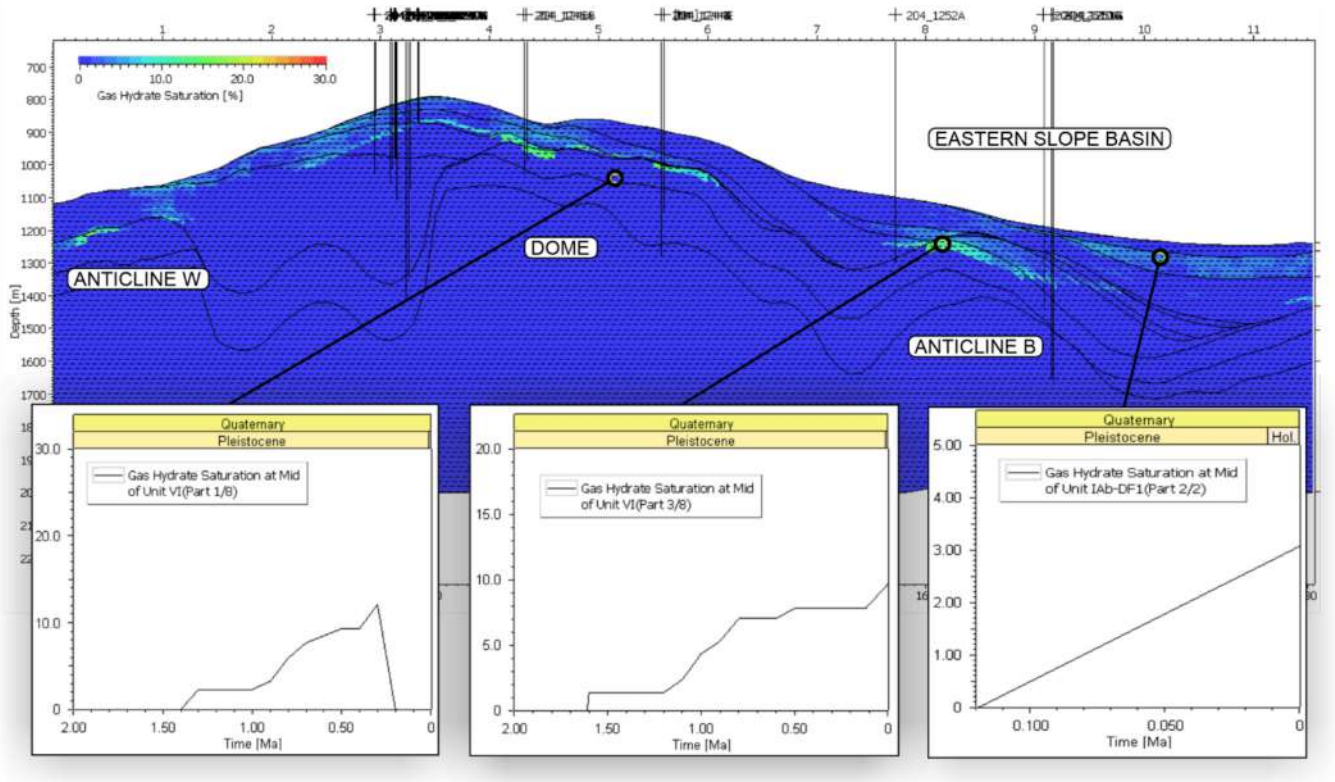


FIGURE 2. Vertical section of the 3D model showing the present-day saturation of gas hydrates. Vertical exaggeration is 3x. Below, time extractions at various locations in the section depict the formation and dissociation of gas hydrates throughout geological time.

RESULTS

The model predicts a highly heterogenous distribution of gas hydrates throughout the gas hydrate stability zone (GHSZ) at present day, consistent with Tréhu et al. (2004). The higher modelled gas hydrate saturations occur at the crests of the anticline structures involving the highly deformed accreted units (i.e. Anticline B and Anticline W in Fig. 2), and along both the eastern and western flanks of the main ridge just above the basal limit of the GHSZ (i.e. Dome). Maximum simulated saturations reach values of up to 23% of porosity, whereas mean predicted values are between 5% and 15% of porosity. The highest saturations of free gas are predicted just below the GHSZ in the flanks of the Dome structure in central and southern zones.

The heterogeneous distribution of gas hydrates and the location of its maximum saturations suggest that their presence and concentration are controlled by the

differential growth of the structures forming the SHR, which in turn governs gas migration pathways. In the 3D model, gas migration vectors follow routes parallel to the deformed bedding (either tilted or folded). The increased concentration of free gas beneath the GHSZ in the south-central zone is controlled by its location as the shallowest point of the ridge.

The model simulates the main onset of gas hydrate formation in SHR occurring between 1.7 and 1.6 Ma. Part of this gas hydrate dissociated through time as sediment temperature increased with burial, freeing the gas that might have been recycled to form other hydrates within their corresponding migration paths. From this initial stage, the formation of gas hydrate has persisted to the present day, alternating with dissociation in certain areas and moments. This has resulted in an irregular distribution of gas hydrate saturation across time and space (Fig. 2).

ACKNOWLEDGEMENTS

Grants RTI2018-097312-A-I00, PID2022-140850OB-C22 and PID2022-140850OB-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ and by "ERDF A way of making Europe". We thank SLB for the donation of the Petrel E&P and PetroMod® licenses. Support from the Generalitat de Catalunya (2021SGR00076) is also acknowledged.

REFERENCES

Bangs, N.L.B., Hornbach, M.J. and Berndt, C. (2011): The mechanics of intermittent methane venting at South Hydrate Ridge inferred from 4D seismic surveying. *Earth and Planetary Science Letters*, 310: 105-112.

Cabello, P., Berndt, C., Marin, M.A., Falivene, O. and Marzo, M. (2021): 3D Integrative gas hydrates geological modeling. Hydrate Ridge (Cascadia accretionary prism, Oregon). *Geotemas,* 18: 2792-2308.

Chevallier, J., Tréhu, A.M., Bangs, N.L., Johnson, J.E., and Meyer, H.J. (2006): Seismic sequence stratigraphy and tectonic evolution of southern Hydrate Ridge. In: Proc. ODP, Sci. Results, 204 (A.M. Tréhu, G. Bohrmann, M.E. Torres, and F.S. Colwell, eds.). College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1–29.

Crutchley, G.J., Berndt, C., Geiger, S., Klaeschen, D., Papenberg, C., Klaucke, I., Hornbach, M.J., Bangs, N.L.B. and Maier, C. (2015): Drivers of focused fluid flow and methane seepage at south Hydrate Ridge, offshore Oregon, USA. *Geology*, 41: 551-554.

Middelburg, J.J. (1989): A simple model for organic matter decomposition in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* 53: 1577-1581.

Tréhu, A.M. and Bangs, N. (2001): *3-D seismic imaging of an active margin hydrate system, Oregon continental margin, report of Cruise TTN112*. Oregon State Univ. Data Rpt., 182.

Tréhu, A.M., Bohrmann, G., Rack, F.R., Torres, M.E., Bangs, N.L., Barr, S.R., Borowski, W.S., Claypool, G.E., Collett, T.S., Delwiche, M.E., Dickens, G.R., Golberg, D.S., Gràcia, E., Guèrin, G., Holland, M., Johnson, J.E., Lee, Y.-J., Liu, C-.S., Long, P.E., Milkov, A.V., Riedel, M., Schultheiss, P., Su, X., Teichert, B., Tomaru, H., Vanneste, M., Watanabe, M. and Weinberger, J.L. (2003): *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports* Volume 204.

Tréhu, A.M., Long, P.E., M.E. Torres, Bohrmann, Rack, F.R., Collet, T.S., Goldberg, D.S., Milkov, A.V., Riedel, M., Schultheiss, P., Bangs, N.L., Barr, S.R., Borowski, W.S., Claypool, G.E., Delwiche, M.E., Dickens, G.R., Gracia, E., Guerin, G., Holland, M., Johnson, J.E., Lee, Y.-J., Liu, C.-S., Su, X., Teichert, B., Tomaru, H., Vannetes, M., Watanabe, M. and Weiberger, J.L. (2004): Three-dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: constraints from ODP Leg 204. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 845-862.

Wygrala, B.P. (1989): *Integrated study of an oil field in the Southern Po Basin Northern Italy*. Ph.D. Thesis, Univ. of Cologne, Germany.

Exploring the efficiency of anaerobic oxidation of methane as sink to hydrate-sourced methane

Explorando la eficiencia de la oxidación anaeróbica del metano como sumidero de metano procedente de hidratos

M. De La Fuente[1], S. Arndt[1], H. Marín-Moreno[2], T.A. Minshull[2] y J. Vaunat[3]

[1]BGeoSys, Department Geoscience, Environment & Society (DGES), Université Libre de Bruxelles,1050 Brussels, Belgium.
maria.de.la.fuente.ruiz@ulb.be
2School of Ocean and Earth Science, University of Southampton, European Way, Southampton SO14 3ZH, UK
3Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona, Spain

Palabras clave: Hydrates, Anaerobic Oxidation of methane, benthic sink, biofilter efficiency, modelling.

Resumen

Ocean warming threatens methane hydrate stability in continental margins, potentially causing methane release into marine sediments, the water column, and ultimately the atmosphere (Ruppel and Kessler, 2017). Over anticipated timescales of methane release from hydrates, microbial anaerobic oxidation of methane (AOM) in marine sediments may help mitigate benthic methane efflux. However, recent studies show variability in AOM efficiency, linked to multiphase methane transport and microbial growth dynamics (De La Fuente et al., 2022; Thurber et al., 2020). Using a novel 1D multiphase reaction-transport model, we explore AOM efficiency evolution and its impact on seafloor methane emissions due to climate-driven hydrate destabilization. We investigate effects of gaseous methane transport, including induced fracturing from pore fluid overpressure, and methanotrophic biomass dynamics on AOM efficiency. Initial findings suggest limited AOM sink capacity to mitigate methane emissions from hydrates in gassy sediments, with slow methanotrophic growth potentially allowing methane to escape into the ocean.

Abstract

El calentamiento del océano amenaza la estabilidad de los hidratos de metano en los márgenes continentales, potencialmente causando la liberación de metano en sedimentos marinos, la columna de agua y, en última instancia, la atmósfera (Ruppel y Kessler, 2017). En las escalas de tiempo previstas para la liberación de metano de los hidratos, la oxidación anaeróbica microbiana del metano (AOM) en los sedimentos marinos podría ayudar a mitigar el eflujo de metano bentónico. No obstante, estudios recientes muestran variabilidad en la eficiencia de AOM, relacionada con el transporte multifase del metano y la dinámica de crecimiento microbiano (De La Fuente et al., 2022; Thurber et al., 2020). Usando un nuevo modelo de transporte de reacción multifase 1D, exploramos la evolución de la eficiencia de AOM y su impacto en las emisiones de metano del lecho marino asociadas a la desestabilización de los hidratos impulsada por el clima. Investigamos los efectos del transporte gaseoso de metano, incluyendo la fracturación inducida por la sobrepresión del fluido de poro, y la dinámica de la biomasa metanotrófica en la eficiencia de AOM. Los hallazgos iniciales sugieren una capacidad limitada del sumidero de AOM para mitigar emisiones de metano procedentes de la disociación de hidratos en sedimentos gaseosos, donde un lento crecimiento podría permitir temporalmente un eflujo de metano significativo hacia el océano.

Referencias

Ruppel, C.D. & Kessler, J.D. (2017). *Rev. Geophys. 2017, 55, 126–168*.
De La Fuente, M., Arndt, S., Marín-Moreno, H., Minshull, T.A. (2022). *Energies, 15, 3307*
Thurber, A.R., Seabrook, S., Welsh, R.M. (2020). *Proc. R. Soc. B 2020, 287, 20201134*

Sensibilidad de las Variables Oceanográficas en la Estabilidad de los Hidratos de Gas Marinos. Caso de estudio en los Márgenes Continentales de Europa

Sensitivity of Oceanographic Variables on the Stability of Marine Gas Hydrates. A Case Study in the Continental Margins of Europe

R. León[1], L.F. Pérez[2], C. Guardiola-Albert[1] y E. Nuñez-Varela[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Ríos Rosas, 23. 28003 – Madrid, Spain. r.leon@igme.es; c.guardiola@igme.es; elena.nvarela@alumnos.upm.es
2 Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), Universitetsbyen 81, 8000 Århus, Denmark. lfp@geus.dk

Palabras clave: hydrates, European Continental Margins, seafloor temperature, salinity, geothermal gradient.

Resumen

Desde un punto de vista de la modelación estática, la zona teórica de la estabilidad de los hidratos de gas (GHSZ) en el medio marino está controlado por la temperatura del fondo, la profundidad, el gradiente geotérmico y la salinidad. Sin embargo, para la estimación global del GHSZ (Milkov, 2004; Wallmann et al., 2012), se establecen numerosas suposiciones o aceptaciones científicas sobre las variables oceanográficas clave, con el objetivo de simplificar los cálculos. Entre estas variables destaca la distribución de la temperatura del fondo con la profundidad, dada la sensibilidad que tiene en la estimación de la potencia de la GHSZ (León et al., 2009). Este trabajo muestra el impacto de la temperatura en estimación de la potencia del GHSZ, teniendo en cuenta las termoclinas en una zona compleja de distribución heterogénea de las masas de agua profunda, como son los márgenes continentales de Europa.

Por otro lado, también analiza la sensibilidad en la estimación de la potencia de la GHSZ de las variables oceanográficas (temperatura del fondo, profundidad y la salinidad), del impacto de los grandes eventos climáticos.

Abstract

Following static modeling, the theoretical marine gas hydrate stability zone (GHSZ) is determined by seafloor temperature, depth, geothermal gradient, and salinity. However, numerous assumptions are necessary to simplify the calculations on global estimations of GHSZ thickness (Milkov, 2004; Wallmann et al., 2012). The spatial variability of seafloor temperature is highly depending of the depth and the bottom water masses influencing the seafloor. Given the sensitivity of this variable in the GHSZ estimation (León et al., 2009), this study demonstrates the impact of the seafloor temperature on the estimations of GHSZ thickness, considering the thermoclines formed by the complex distribution of deep-water masses on the continental margins of Europe.

In addition, we analyze the sensitivity of oceanographic variables (seafloor temperature, depth, and salinity) and the impact of major climate events on the GHSZ thickness.

Referencias

León, R., Somoza, L., Giménez-Moreno, C.J., Dabrio, C.J., Ercilla, G., Praeg, D., Díaz-del-Río, V., Gómez-Delgado, M., 2009. A predictive numerical model for potential mapping of the gas hydrate stability zone in the Gulf of Cadiz. Mar. Pet. Geol. 26, 1564–1579. https://doi.org/10/czq8vq

Milkov, A.V., 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? Earth-Sci. Rev. 66, 183–197. https://doi.org/10/ddf7hs

Wallmann, K., Pinero, E., Burwicz, E., Haeckel, M., Hensen, C., Dale, A., Ruepke, L., 2012. The Global Inventory of Methane Hydrate in Marine Sediments: A Theoretical Approach. Energies 5, 2449–2498. https://doi.org/10/gnkdv8

Evidencias geofísicas de un campo de volcanes de fango identificado recientemente en el sur del mar de Alborán (Mediterráneo occidental)

Geophysical evidence of a recently identified mud volcano field in South Alboran Sea (Westernmost Mediterranean)

L. Martí[1,2], W. Menapace[2], G. Lastras[1], H. Perea[2] y los participantes en la campaña STRENGTH

1 GRC Geociències Marines. Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/ Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. lmartitr22@alumnes.ub.edu, glastras@ub.edu
2 BSCI, Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona. walter@icm.csic.es, hperea@icm.csic.es

Palabras clave: volcanes de fango, geofísica marina, cold seeps, mar de Alborán.

Resumen

Los volcanes de fango (VF) que han sido caracterizados previamente en el mar de Alborán están relacionados con los depósitos contorníticos de Ceuta. Durante el Leg 3 de la expedición STRENGTH, realizada a bordo del B/O Sarmiento de Gamboa en abril de 2023, se descubrió un nuevo campo de VF al oeste de Melilla, en el talud continental marroquí. Con el objetivo de estudiar este nuevo campo de VF se adquirieron datos de geofísica acústica usando la ecosonda batimétrica Atlas Hydrosweep DS-3 y el sonar de barrido lateral de arrastre DT-1 Edgetech de la UTM-CSIC. Estos datos han permitido caracterizar un total de 14 VF con una morfología cónica, la presencia de fosas a su alrededor, en algunos de ellos, y flujos de fango propagados desde la cumbre. Estos VF tienen hasta 30 m de altura y 300 m de diámetro. También se adquirieron perfiles sísmicos Sparker que muestran la secuencia sismo-estratigráfica hasta unos 300 m de profundidad. Se observa apantallamiento acústico relacionado con la presencia de gases bajo los volcanes y en sedimentos relacionados lateralmente, el cual parece indicar las rutas de los fluidos y sus canales de alimentación. Finalmente, la exploración visual con el ROV Liropus 2000 del IEO-CSIC muestra la presencia de corales, esponjas y otros organismos sésiles en los flancos de los VF. Estas imágenes también parecen indicar que estos VF no estarían activos actualmente. Además, se dispone de testigos para futuros estudios geoquímicos y geocronológicos.

Abstract

Mud volcanoes (MV) previously identified in Alboran's Sea have been related to Ceuta's contourite drift. A new MV field has been discovered on the Moroccan continental shelf, west of Melilla, during STRENGHT Leg 3 expedition aboard the R/V Sarmiento de Gamboa on April 2023. To study these MV, geophysical acoustic data was acquired using Atlas Hydrosweep DS-3 multibeam echosounder and DT-1 Edgetech towed side scan sonar. These data have allowed us to characterize a total of 14 VF with a conical morphology, the presence of pits around them, in some of them, and mud flows propagated from the summit. These MV are up to 30 m high and 300 m in diameter. Sparker seismic profiles were also acquired showing a seismo-stratigraphic sequence up to 300 m depth. Gas-related acoustic blanking was found beneath the volcanoes and in laterally adjacent sediments, which appears to indicate fluid pathways and their feeder channels. Finally, in the exploration with video images obtained with the IEO-CSIC ROV Liropus 2000, corals, sponges and other sessile organisms were observed on the flanks. These images also seem to indicate that these MV would not be currently active. In addition, cores are available for future geochemical and geochronological studies.

Actividad episódica y estructura interna del volcán de lodo Ginsburg reveladas a través de un enfoque multidisciplinario

Episodic activity and internal structure of Ginsburg mud volcano revealed through a multidisciplinary approach

W. Menapace[1], S. Xu[2], A. González-Lanchas[3], A. Asioli[4], R. Urgeles[1], H. Perea[1] *, A. Kopf[2]

1 Department of Marine Geosciences, Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC), 08003 Barcelona, Spain. walter@icm.csic.es; hperea@icm.csic.es; urgeles@icm.csic.es
2 Department of Marine Geotechnics, MARUM-University of Bremen, 28359 Bremen, Germany. sxu@marum.de; akopf@marum.de
3 Department of Earth Sciences, University of Oxford, OX1 3AN, United Kingdom. alba.gonzalez-lanchas@earth.ox.ac.uk
4 Istituto di Scienze Marine (Ismar-CNR), 40129 Bologna, Italy. alessandra.asioli@bo.ismar.cnr.it

Palabras clave: vulcanismo de lodo, fluidos fríos, paleo sismicidad, Golfo de Cádiz

Resumen

Los volcanes de lodo (VL) son estructuras de emisión de fluidos muy comunes (tanto en tierra como en mar) en zonas de convergencia tectónica. Sus erupciones son una clave para comprender la geología regional y las interacciones fluido-sedimento. Sin embargo, los desencadenantes precisos de su episodicidad siguen sin estar claros. Se plantea la hipótesis de que factores como la acumulación de presión de poros o la disociación de hidratos de gas, entre otros, pueden iniciar erupciones de VL, lo que resulta en diversos efectos con la erupción correspondiente canalizada a través de los conductos principales. Entre los posibles desencadenantes, los terremotos son los únicos para los que se ha establecido firmemente una relación directa de causa y efecto.

El Golfo de Cádiz (GdC) proporciona un escenario ideal para estudiar VL y paleoseismicidad debido a la presencia de un prisma de acreción con numerosas estructuras activas de emisión de fluidos (eg. >90 VL y pockmarks) y al menos tres importantes fallas transformantes. Además, numerosos terremotos de gran magnitud se han registrado en el pasado dejando su impronta en el registro sedimentológico. Tres campañas oceanográficas dirigidas por MARUM y el ICM-CSIC (INSIGHT, M149 y M167) se han realizado en el GdC para investigar la episodicidad y la naturaleza de su vulcanismo de lodo y su conexión con la tectónica y sísmicidad.

Este trabajo muestra los principales hallazgos encontrados en estas expediciones, con especial atención en el VL Ginsburg (uno de los más grandes y antiguos de la zona). Su compleja historia evolutiva se ha estudiado a través de diferentes métodos (MCS, datación por radiocarbono, XRF, análisis geomorfológico, geoquímica del agua de poros) para explicar las interacciones entre sus diferentes extrusiones. Los resultados arrojan nueva luz sobre la formación del edificio volcánico, especialmente sobre la relación de sus erupciones con terremotos pasados en el GdC.

Abstract

Mud volcanoes (MVs) are common in tectonically active regions on land and under the sea. Their eruptions are important for studying regional geology and fluid-sediment interactions, but the exact causes of these eruptions are still not fully understood. It is hypothesized that various events (e.g. pore pressure accumulation, gas hydrates dissociation) can initiate MV eruptions, resulting in diverse effects with the corresponding ejecta channeled through the main conduit(s). Among the potential triggers, earthquakes (EQs) are the only ones for which a direct cause-and-effect relationship has been firmly established.

The Gulf of Cadiz (GoC) provides an ideal setting for studying MVs and paleoseismology, featuring an accretionary wedge, active seabed fluid flow structures (eg. over 90 MVs, pockmark fields) and at least, three major transform faults. Besides, numerous large-magnitude EQs have been identified in the past, leaving their imprint in the sedimentological record. Three oceanographic cruises led by MARUM and the ICM-CSIC (INSIGHT, M149 y M167) sought to investigate the episodicity and nature of mud volcanism in the GoC, along with its connection to the tectonic and seismic history of the area.

This study presents the main discoveries from these expeditions, focusing particularly on the Ginsburg MV (one of the region's largest and oldest). Various methods were used to examine its complex evolutionary history, including MCS, radiocarbon dating, XRF, geomorphological analysis, and pore water geochemistry. These findings offer new insights into the formation of the volcanic structure, especially regarding the connection between mud eruptions and past earthquakes in the GoC.

Nuevas evidencias geológicas y bentónicas ligadas a la actividad de expulsión de fluidos del volcán de fango Anastasya en el campo somero de expulsión de fluidos del golfo de Cádiz

New geological and benthic characteristics linked to fluid flow activity in the Anatasya mud volcano in the shallow field of fluid expulsion of the Gulf of Cádiz

D. Palomino[1], A. Mateo-Ramírez[1], M. Gallardo-Núñez[1], I. Villar[2], M. García[2], J. Urra[1], O. Utrilla[1], C. Farias[2], A. Rodríguez-Rua[2], J.L. Rueda[1]

1 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Centro Oceanográfico de Málaga, Puerto Pesquero s/n, 29640 Fuengirola. desiree.palomino@ieo.csic.es; angel.mateo@ieo.csic.es; marina.gallardo@ieo.csic.es, javier.urra@ieo.csic.es; olga.utrilla@ieo.csic.es; jose.rueda@ieo.csic.es

2 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Centro Oceanográfico de Cádiz, Puerto Pesquero, Muelle de Levante s/n, 11006 Cádiz. izaskun.villar@ieo.csic.es; marga.garcia@ieo.csic.es; carlos.farias@ieo.csic.es; ana.rodriguez@ieo.csic.es;

Resumen: En este trabajo se presentan nuevos datos adquiridos en el volcán de fango Anastasya, situado en el campo somero de expulsión de fluidos del talud continental del Golfo de Cádiz, en el marco de la expedición INTEMARES_A4_CAD. Se ha analizado la morfología del fondo, las características sub-superficiales, el tipo de sedimento y las comunidades bentónicas en este volcán. Se han detectado valores muy elevados de reflectividad en la cima del volcán y se han cartografiado extensas coladas con diferentes lóbulos. Se han obtenido sedimentos de brecha fangosa y abundantes organismos quimiosimbióticos vivos localizados en la cima del cono volcánico asociados a una mayor actividad de emisión. Además, se han detectado plumas acústicas y emisiones en forma de burbujas de gases en la cima, y numerosos tapetes bacterianos. Todas las evidencias encontradas en el volcán de fango Anastasya demuestran una mayor actividad relacionada con la emisión de fluidos de la que se había presentado hasta la fecha.

Palabras clave: expulsión de fluidos, volcán de fango, Anastasya, quimiosíntesis, golfo de Cádiz.

Abstract: *In this work we present new acquired data from INTEMARES_A4_CAD expedition in the mud volcano Anastaya, located at the shallow field of fluid expulsion in the Gulf of Cádiz. The morphology of the seabed, the sub-surficial characteristics, the type of sediment and the benthic communities in this volcano have been analyzed. Very high values of backscatter in the summit of the mud volcano have been detected and large mud flows composed of different lobes have been mapped. Mud breccias and live chemosymbiotic organisms have been obtained from the summit of the volcanic cone and related to a high venting activity. Moreover, acoustic flares have also been detected together with abundant fluid bubbling and bacterial mats in the summit. All these venting evidences detected in the Anastasya mud volcano highlight a higher activity related to fluid emission than ever documented before in this cold seep hotspot for the Gulf of Cádiz.*

Key words: *seepage, mud volcano, Anastasya, chemosynthesis, Gulf of Cádiz*

INTRODUCCIÓN

Los volcanes de fango son estructuras muy comunes en el talud medio y superior del golfo de Cádiz, los cuales están formados por la migración vertical de sedimentos fangosos y fluidos que son expulsados por sucesivas emisiones (Milkov, 2000). Son una fuente de metano desde el sedimento a la columna de agua y, posteriormente la atmósfera, que proporciona unas condiciones propicias para diferentes comunidades de organismos quimiosimbióticos marinos (Rueda et al., 2012). Por otro lado, los procesos de expulsión de fluidos incrementan la complejidad sedimentaria creando diferentes tipos de sustrato, de ambientes biogeoquímicos, de hábitats y de especies asociadas (Palomino et al., 2016; Rueda et al., 2016).

Existen numerosas evidencias que ofrecen información sobre las características de las emisiones de fluidos y su grado de actividad como: a) la propia morfología del fondo marino estudiada a partir de los datos de batimetría y reflectividad, b) la detección de burbujas o plumas acústicas en la columna de agua utilizando técnicas acústicas y visualizacón en imágenes submarinas, c) la presencia de brecha fangosa y/o de carbonatos autigénicos derivados de las expulsiones de metano, ó d) la existencia de comunidades quimiosimbióticas obtenidas con dragas o imágenes submarinas, entre otras. Por ello, la manera más adecuada de abordar el estudio de las emisiones de fluidos es mediante una combinación de todas estas técnicas de observación y muestreo del medio marino (Palomino et al., 2023).

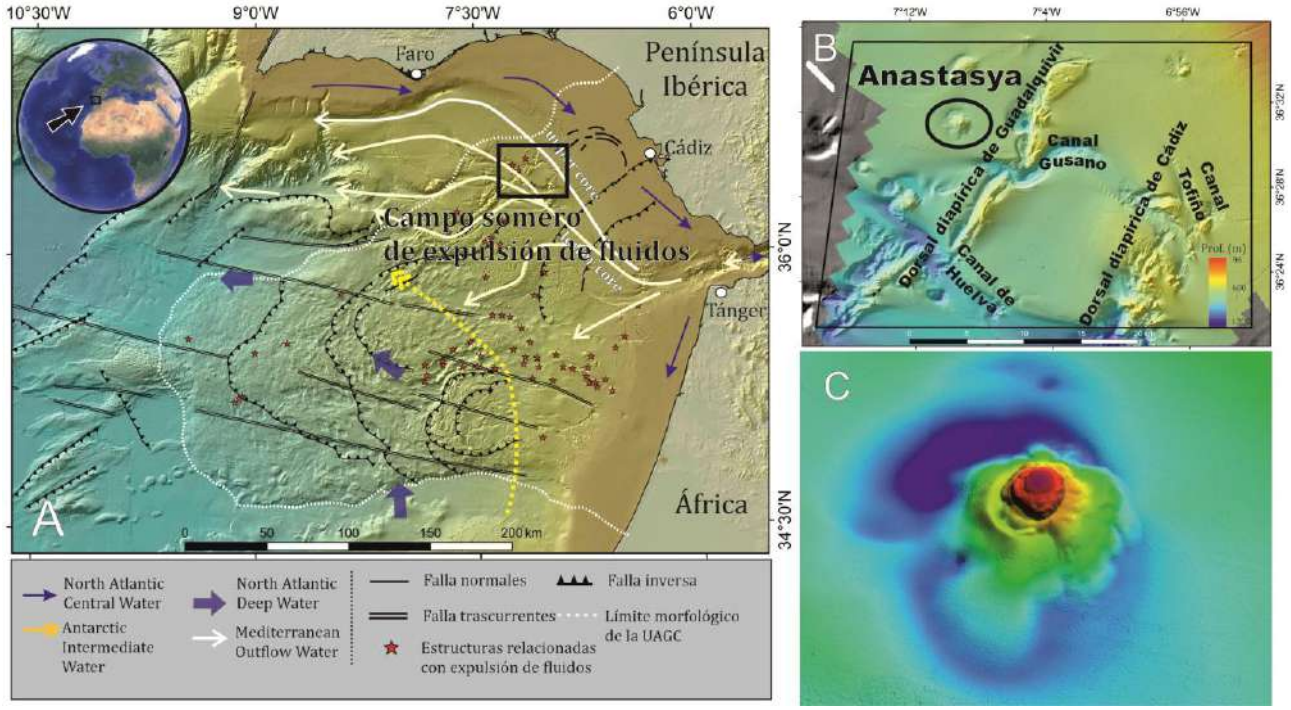


FIGURA 1. *Localización del volcán de fango Anastasya, A) Características tectónicas y oceanográficas del golfo de Cádiz y localización del campo somero de expulsión de fluidos (recuadro negro) B) Localización del volcán de fango Anastasya en el campo somero de expulsión de fluidos, C) Modelo 3D del volcán de fango Anastasya generado con datos de batimetría multihaz de muy alta resolución.*

El objetivo de este trabajo es el estudio de la morfología del fondo y las características sub-superficiales del volcán de fango Anastasya en el que se presentan nuevos datos y nuevas interpretaciones que ponen en evidencia la actividad relacionada con la expulsión de fluidos de este volcán de fango.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y OCEANOGRÁFICAS

El golfo de Cádiz se sitúa en un contexto actual compresivo, donde se desarrollan importantes fenómenos de diapirismo y vulcanismo de fango. Estos fenómenos están relacionados con el emplazamiento de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz (UAGC) durante el Oligoceno Tardío y el Tortoniense superior, y con el desarrollo de complejos extensionales gravitacionales y zonas transpresivas desde el Messiniense hasta el Cuaternario, que favorecieron el ascenso de los materiales más plásticos de la UAGC en forma de estructuras diapíricas íntimamente relacionadas con la formación de volcanes de fango (Fig. 1A).

El campo somero de expulsión de fluidos se localiza en el margen español del golfo de Cádiz entre 300 y 730 m de profundidad y se caracteriza por la presencia de dorsales diapíricas y canales contorníticos (Fig. 1). Los principales relieves se sitúan sobre depósitos contorníticos relictos que se encuentran afectados por procesos tectónicos y diapirismo que favorecen el desarrollo de estructuras asociadas a la expulsión de fluidos como son los volcanes de fango.

La circulación oceanográfica en el golfo de Cádiz está controlada por el intercambio de masas de agua a través del estrecho de Gibraltar con un flujo de agua Atlántica de entrada (AIW) hacia el mar de Alborán y un flujo de agua Mediterránea de salida (Mediterranean Outflow Water, MOW) hacia el océano Atlántico. La MOW barre el margen ibérico hacia el noroeste y se divide en dos núcleos principales (*upper core* y *lower core* en Fig. 1A). El área de estudio se encuentra bajo la influencia de la North Atlantic Central Water (NACW) y la rama del *upper core* de la MOW. Cerca del estrecho de Gibraltar, Sánchez and Relvas (2003) adoptaron 400 m como el nivel de referencia para la interfase entre la NACW y la MOW, aunque en el área de estudio ha sido situada entre 450-500 m (Fernández-Salas et al., 2012).

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos utilizados en este trabajo se obtuvieron durante la campaña INTEMARES_A4_CAD realizada en el golfo de Cádiz en abril de 2021 a bordo del B/O Ramón Margalef (IEO-CSIC) en el marco del proyecto LIFE IP INTEMARES. En ella se obtuvieron distintos tipos de datos y muestras. Los datos de batimetría y reflectividad se han procesado con CARIS HIPS & SIPS y han permitido realizar modelos digitales del terreno de muy alta resolución con una malla de 3x3 m. Además, se grabaron datos de la columna de agua que se han procesado con el módulo FMMidwater de QPS. Los datos de ecosonda paramétrica TOPAS-PS18 han sido interpretados con el programa IHS Kingdom. Las muestras de box-corer se han analizado para caracterizar la textura del sedimento y la composición faunística. Los videos e imágenes obtenidos con el Vehículo de Observación Remolcado (HORUS), han servido para detectar burbujas de fluidos, tapetes bacterianos y caracterizar las especies bentónicas y la biota asociada.

RESULTADOS

El volcán de fango Anastasya es un volcán morfológica-, sedimentológica- y faunística-mente complejo debido al efecto combinado de los procesos de expulsión de fluidos y a sus características geológicas y oceanográficas.

Se localiza a una profundidad de 567 m y la cima se sitúa a 457 m (Palomino et al., 2016). Presenta una forma cónica con un domo en la cima que queda rodeado por una depresión circular asociada a procesos de subsidencia. Los flancos se caracterizan por extensas coladas de fango que llegan hasta la base. Presentan diversos lóbulos, que se representan en los perfiles de ecosonda paramétrica como hipérbolas. En la base predominan las formas asociadas a las corrientes de fondo, tanto deposicionales (depósitos contorníticos) como erosivas (canales contorníticos) (Fig. 1C). Los valores de reflectividad más elevados (-8 dB) se localizan en la cima del volcán y en zonas concretas de los flancos del volcán.



FIGURA 2. *Sedimentos obtenidos con la draga box corer donde se observan las facies fangosas y arenosas con gran cantidad de materia orgánica, decápodos como Calliax lobata (izquierda) cuyas galerías están ampliamente recubiertas por tapetes bacterianos (derecha).*

Los sedimentos obtenidos en las box corer en las zonas de emisión se caracterizan por facies fangosas de color oscuro intercaladas en facies arenosas de color marrón más claro. Las facies fangosas presentaban una textura de *mousse* y desprendían un fuerte olor a sulfuro de hidrógeno y a altos contenidos en materia orgánica (Fig. 2).

El intervalo superior de la box corer (0-5 cm) estuvo dominado por el gasterópodo *Gibberula turgidula*, los poliquetos *Siboglinum* sp. (densidades hasta 264 indiv . m^{-2}) y *Aricidea* (*Acmira*) *assimilis*, el tanaidaceo *Fageapseudes* cf. *retusifrons* y el pennatuláceo *Vigularia miriabilis*. Especies quimiosimbiontes como el decápodo *Calliax lobata* (hasta 132 indiv . m^{-2}) y los bivalvos *Solemya elarraichensis* (hasta 154 indiv . m^{-2}) y *Lucinoma asapheus* (hasta 22 indiv . m^{-2}) fueron los taxones dominantes en los niveles intermedios (5-10 cm) y profundos (10-15cm) del corer. Entre estas especies, en particular *C. lobata* y *S. elarraichensis* mostraron un aumento significativo en su abundancia en las partes más profundas del sedimento (Fig. 2).

En las imágenes submarinas se han observado burbujas de gas que emanan desde el fondo marino (Fig. 3A) y tapetes bacterianos de diferentes tamaños y formas (densidades de hasta 3-4 tapetes . m^{-2}) que ponen en evidencia la actividad de este volcán. Además se han detectado altas densidades de pennatuláceos de gran porte (*Funiculina quadrangularis*), y numerosos individuos de pulpo cabezón (*Eledone cirrhosa*), junto a valvas de bivalvos quimiosimbióticos, los cuales seguramente se ven atraídos por la alta productividad de bivalvos de la cima de Anastasya.

Las plumas acústicas detectadas con el módulo de la columna de agua de la ecosonda multihaz, tienen unas dimensiones de 175 y 200 m de altura desde el fondo marino y entre 20 y 25 m de anchura respectivamente (Fig. 3B).

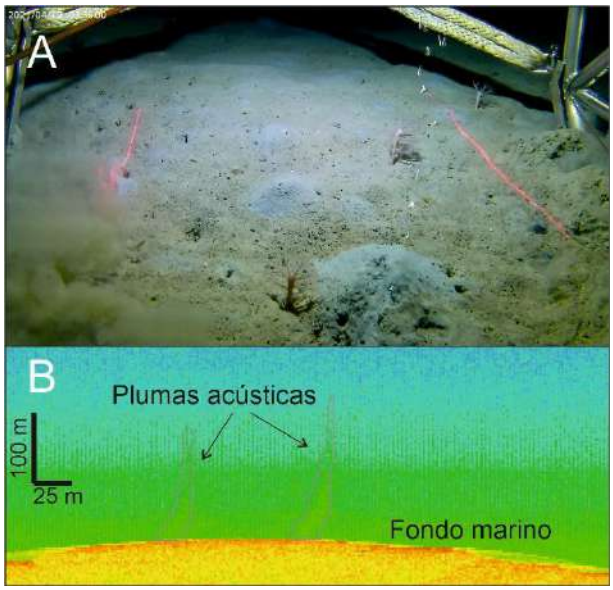


FIGURA 3. *Cima del volcán de fango Anastasya, A) Ejemplo de burbujas detectadas con cámaras de video de alta resolución y, B) Plumas acústicas detectadas con el módulo de columna de agua en la cima del volcán de fango Anastasya.*

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las características geomorfológicas y faunísticas de este volcán fueron parcialmente estudiadas por Palomino et al. (2016), donde ya se apuntaba que el volcán de fango Anastasya presentaba la mayor

actividad de todos los presentes en el campo somero de expulsión de fluidos. En este trabajo se presentan nuevos datos que reafirman esa alta actividad con emisiones activas presentes en la actualidad.

El crecimiento de los volcanes ocurre como resultado de la expulsión de fluidos y sedimentos desde la cima a través de los flancos. Los lóbulos observados se corresponden con diferentes episodios de extrusión que tiene lugar en diferentes fases (León et al., 2012). En las muestras de box corer no se observa una capa de sedimento hemipelágico sobre las facies fangosas, lo que concuerda con una actividad muy reciente o actual. Este tipo de sedimento puede ser el que provoca los valores tan elevados de reflectividad. Los datos acústicos de la columna de agua revelan la presencia de plumas acústicas que se localizan en la zona de burbujas de gas observadas en los videos submarinos. Por último, la abundante productividad de fauna quimiosimbiótica no hace más que reforzar el hecho de que Anastasya se encuentra en una etapa de alta actividad metanogénica. Esta productividad de organismos dependientes del metano incluso atrae a depredadores de los mismos (ej. pulpo cabezón (*E. cirrhosa*)) de interés comercial para la flota pesquera local.

Cabe resaltar la importancia de la utilización de diferentes técnicas de prospección y muestreo que den idea de los diferentes proxies (geomorfológico, reflectividad, detección de plumas acústicas, tipo de sedimento, presencia de fauna quimiosimbiótica) utilizados para el estudio de la actividad relacionada con expulsión de fluidos en los volcanes de fango. Las evidencias encontradas en el volcán de fango Anastasya demuestran una mayor actividad relacionada con la emisión de fluidos de la que se había presentado hasta la fecha.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda prestada por el capitán y tripulación del B/O Ramón Margalef, así como la de Francisco J. López de la empresa Thalassatech durante la campaña. Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto LIFE IP INTEMARES (Acción A4) “Gestión integrada, innovadora y participativa de la Red Natura 2000 en el medio marino español”. Este proyecto está coordinado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico. Recibe apoyo financiero del programa LIFE (LIFE15 IPE ES 012) de la Unión Europea.

REFERENCIAS

Fernández Salas, L.M., Sánchez Leal, R., Rueda, J.L., López González, N., Díaz del Río, V., López Rodríguez, F.J., Bruque, G., Vázquez, J.T. (2012): Interacción entre las masas de agua, los relieves submarinos y la distribución de especies bentónicas en el talud continental del Golfo de Cádiz. *Geo-Temas* 13, p. 198.

León, R., Somoza, L., Medialdea, T., Vázquez, J.T., González, F.J., López-González, N., Casas, D., Mata, M.P., Fernández-Puga, M.C., Jiménez-Moreno, C.J., Díaz-Del-Río, V. (2012): New discoveries of mud volcanoes on the Moroccan Atlantic continental margin (Gulf of Cadiz): morpho-structural characterization. *Geo-Marine Letters*, 32, 473–488.

Milkov, A.V. (2000): Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, 167, 29–42.

Palomino, D., López-González, N., Vázquez, J.T., Fernández-Salas, L.M., Rueda, J.L., Sánchez-Leal, R., Díaz del Río, V. (2016): Multidisciplinary study of mud volcanoes and diapirs and their relationship to seepages and bottom currents in the Gulf of Cádiz continental slope (northeastern sector). *Marine Geology*, 378, 196–212.

Palomino, D., Mateo-Ramírez, A., Vázquez, J.T., González-García, E., López-González, N., Fernández-Salas, L.M., Cepeda, C., Rueda, J.L. (2023): Fluid venting submarine structures in the middle slope of the Spanish continental margin of the Gulf of Cádiz: Geomorphology, internal structure, benthic features and control factors. *Marine Geology*, 462, 107083.

Rueda, J.L., González-García, E., Krutzky, C., López-Rodríguez, F.J., Bruque, G., López- González, N., Palomino, D., Sánchez, R., Vázquez, J.T., Fernández-Salas, L.M., Díaz-del-Río, V. (2016): From chemosynthesis-based communities to cold-water corals: vulnerable deep-sea habitats of the Gulf of Cádiz. *Marine Biodiversity*, 46 (2), 473–482.

Rueda, J.L., Urra, J., Gofas, S., López-González, N., Fernández-Salas, L.M., Díaz-del-Río, V. (2012): New records of recently described chemosymbiotic bivalves for mud volcanoes within the European waters (Gulf of Cádiz). *Mediterranean Marine Science*, 13 (2), 262–267.

Sánchez, R., Relvas, P. (2003). Spring-summer climatological circulation in the upper layer in the region of Cape St. Vincent, Southwest Portugal. *ICES Journal of Marine Sciences*. 60, 1232–1250.

Geomorfología y señales acústicas en el sistema hidrotermal del montículo Calent al sur de las islas Columbretes (Mar Mediterráneo occidental)

Geomorphology and acoustic signals in the hydrothermal system of the Calent mound in the south of Columbretes islands (Western Mediterranean Sea)

D. Palomino[1], J.T. Vázquez[1], I. Baena[2], E. Fraile-Nuez[3], I.P. Díez-García[4], N. R. de la Ballina[2], A. González-Vega[3], M.P. Mata[5], S. Mallol[2], J.P. Martín-Díaz[3] y D. Díaz[2]

1 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Centro Oceanográfico de Málaga, Puerto Pesquero s/n, 29640, Fuengirola. desiree.palomino@ieo.csic.es, juantomas.vazquez@ieo.csic.es. Instituto
2 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Centro Oceanográfico de Baleares, Moll de Ponent s/n, 07015, Palma. ignacio.baena@ieo.csic.es, nuria.rodriguez@ieo.csic.es, sandra.mallol@ieo.csic.es, david.diaz@ieo.csic.es
3 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Centro Oceanográfico de Canarias, Farola del Mar 22, 38180, Santa Cruz de Tenerife Eugenio.fraile@ieo.csic.es, alba.gonzalez@ieo.csic.es, juanpablo.martin@ieo.csic.es
4 Instituto Español de Oceanografía-CSIC, Servicios Centrales, C/ Corazón de María 8, 28002, Madrid. irene.diez@ieo.csic.es
5 Instituto Geológico y Minero de España-CSIC, C/ Rios Rosas 23, 28003, Madrid. pmata@igme.es

Resumen: Las islas Columbretes son un archipiélago volcánico localizado al sur de la plataforma continental del Ebro formado por cuatro islas principales, islotes con montículos y elevaciones submarinas. Durante 2020 y 2021 se llevaron a cabo dos campañas oceanográficas en las que se realizó un muestreo integral de la zona obteniéndose: a) batimetría y reflectividad que han permitido el estudio geomorfológico; b) datos acústicos de la columna de agua que han permitido la detección y caracterización de las plumas de salida de gases; c) sedimentos y rocas superficiales con las que se ha estudiado el tipo de sedimento y su composición; d) imágenes submarinas que han hecho posible observar las diferentes estructuras en la zona de surgencias. La actividad volcánica hidrotermal está aún presente en la zona y se han identificado depósitos geológicos, comunidades bentónicas asociadas a las surgencias y perturbaciones acústicas en la columna de agua asociadas a esta actividad hidrotermal. El entorno de las islas Columbretes es único en la península ibérica y uno de los pocos en el Mediterráneo en el que tiene lugar este fenómeno.

Palabras clave: Sistema hidrotermal, plumas acústicas, montículo Calent, Islas Columbretes.

Abstract: *Columbretes islands are a volcanic archipelago located in the southern sector of the Ebro continental shelf in the Western Mediterranean composed by four main islands and small submarine mounds and peaks. During 2020 and 2021 two oceanographic expeditions took place in the area where different datasets have been obtained: a) bathymetry and backscatter have enabled the geomorphological analysis; b) water column data to detect and characterize the acoustic flares; c) rocks and superficial sediments to study the type of sediment and its composition; d) submarine imagery that has allowed us to observe the different structures in the vent area. The hydrothermal volcanic activity is nowadays present in the zone and geological deposits and benthic characteristics species have been identified, as well as acoustic perturbations in the water column associated to this activity. The surroundings of Columbretes islands are unique in the Iberian Peninsula and one of the few in the Mediterranean where this phenomenon occur.*

Key words: *Hydrothermal system, acoustic vents, Calent mound, Columbretes islands.*

INTRODUCCIÓN

Las emisiones de dióxido de carbono en áreas volcánicas submarinas representan menos del 0,5% de las emisiones antropogénicas a la atmósfera, pero su efecto es sumamente importante en el medio marino, ya que pueden alterar la geoquímica local y contribuir a la acidificación oceánica (Williams et al., 1992). El incremento del dióxido de carbono ha contribuido a disminuir el pH del océano en las últimas décadas y la comunidad científica ha predicho que esta tendencia continuará en los próximos años. Las emisiones de dióxido de carbono disminuyen el pH de la columna de agua del mar, alterando el sistema del carbonato y contribuyendo a la acidificación oceánica que afecta tanto a la comunidad pelágica como a la bentónica y, por tanto, a todo el ecosistema.

Las surgencias de dióxido de carbono tienen lugar en diferentes contextos geológicos alrededor del mundo, pero están asociadas normalmente a la actividad volcánica (e.g. Price and Giovannelli 2017). Las islas Columbretes son un archipiélago volcánico localizado en el sector sur de la plataforma continental del Ebro, en el

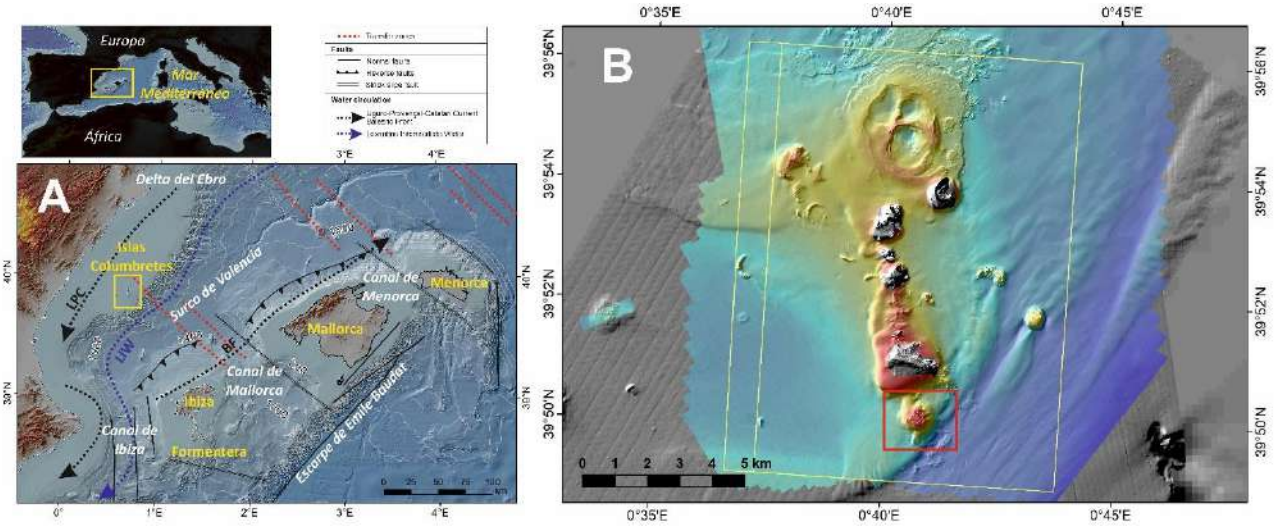


FIGURA 1. *Localización del área de estudio en el Mediterráneo occidental. A) Contexto geológico y oceanográfico del entorno de las islas Columbretes. B) Mapa de batimetría del espacio submarino de las islas Columbretes donde se muestran los límites del LIC del Entorno marino de las Islas Columbretes (rectángulo amarillo) y la zona de estudio en el monte submarino Calent (rectángulo rojo)*

Mediterráneo occidental, formadas por cuatro islas, islotes, pequeños montículos y elevaciones submarinas.

En el LIC del entorno de las islas Columbretes se estableció en 1990 siendo la segunda reserva marina del estado español. Después de 25 años de protección, se pueden encontrar hábitats y comunidades litorales con un elevado grado de conservación. La actividad hidrotermal sigue presente en la zona, y se han identificado depósitos geológicos y comunidades bentónicas asociadas a esta actividad, así como perturbaciones acústicas en la columna de agua. El entorno de las islas Columbretes es único en la península ibérica y uno de los pocos en el Mediterráneo en el que tiene lugar este fenómeno.

Estas emisiones y su efecto en el ecosistema fueron estudiadas por Linares et al. (2015) aunque su extensión y localización permanecían aún desconocidas. En este trabajo se presenta una caracterización de todas las zonas de surgencias de dióxido de carbono existentes en la zona que hacen que las islas Columbretes sean un laboratorio natural, sin influencia antrópica, que permite estudiar con mayor detalle el efecto de las emisiones de dióxido de carbono sobre el ecosistema marino.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y OCEANOGRÁFICAS

Las islas Columbretes se localizan sobre el margen continental del Ebro que, debido a los importantes aportes continentales, es la plataforma continental de mayor anchura de la península ibérica, de hasta 60 km. Este margen constituye el borde occidental del Surco del Golfo de Valencia cuya formación tuvo lugar durante la apertura extensional de las cuencas del Mediterráneo occidental (Roca et al., 1999; Etheve et al., 2018). Las fallas normales de dirección NE-SW a N-S formadas durante esta fase tectónica se han reactivado a lo largo del Pleistoceno (Ferran y Maldonado, 1990). Estas islas son de naturaleza volcánica, y el conjunto de islotes y afloramientos sobre el fondo marino son la expresión en superficie de un campo volcánico más amplio en el subsuelo del margen continental conocido como campo volcánico de Columbretes (Mauffret et al. 1978). El estudio de los afloramientos volcánicos de las islas (Ancoechea y Huertas, 2021) ha permitido reconocer dos periodos de actividad, el más antiguo de composición basanítica tuvo lugar en el límite Pleistoceno inferior-medio (0,7 a 0,8 Ma) mientras que el segundo, de composición fonolítica, tuvo lugar en el Pleistoceno superior (entre 0,2 y 0,3 Ma), si bien la morfología se presenta bien conservada de los volcanes submarinos podría indicar incluso una actividad más reciente (Muñoz et al., 2005).

La circulación oceánica en el noroeste del mar Mediterráneo en superficie se caracteriza por una intensa corriente ciclónica, la Corriente Norte o Corriente Liguro-Provençal (LPC en Fig. 1A) (Millot et al., 1999). Se forma en el golfo de Génova por la unión de la corriente occidental y oriental de Córcega que fluyen desde el Mar Tirreno a través del canal de Córcega. La circulación de la LPC está afectada además por una gran variabilidad estacional. Este giro ciclónico se encuentra por el sur con otra corriente que cruza la cuenca de oeste a este, denominado Frente Balear Norte (BF en Fig. 1A) que constituye una barrera entre las aguas superficiales del norte y el sur del Mediterráneo occidental.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se han analizado los datos que provienen de dos campañas oceanográficas realizadas en el entorno submarino de las islas Columbretes en 2020 y 2021 en el marco del Proyecto LIFE-IP-INTEMARES a bordo del B/O Ramón Margalef (IEO-CSIC). Durante estas campañas se obtuvieron diferentes conjuntos de datos: a) datos de batimetría y reflectividad adquiridos con una ecosonda multihaz Kongsberg EM710; b) datos acústicos de la columna de agua utilizando el módulo de la columna de agua que se ha utilizado para detectar y comparar las

plumas de salida de gases; c) perfiles de muy alta resolución obtenidos con una sonda paramétrica TOPAS PS18 y; d) diferentes rocas y sedimentos en las zonas de emisión obtenidas por los buceadores científicos en las zonas más someras y mediante draga shipek y draga de arrastre en las zonas más profundas del área de estudio.

Todos estos datos han permitido caracterizar la geomorfología del montículo Calent (al sur del archipiélago) y estudiar los procesos de expulsión de fluidos que hoy en día están activos en el área.

RESULTADOS

Calent es un montículo redondeado de 1,2 km de anchura y 40 m de altura que se localiza entre 37,5 y 80 m de profundidad. Se han cartografiado multitud de afloramientos de hasta 2 m de altura en la cima del montículo que muestran valores muy elevados de reflectividad (Fig. 2).

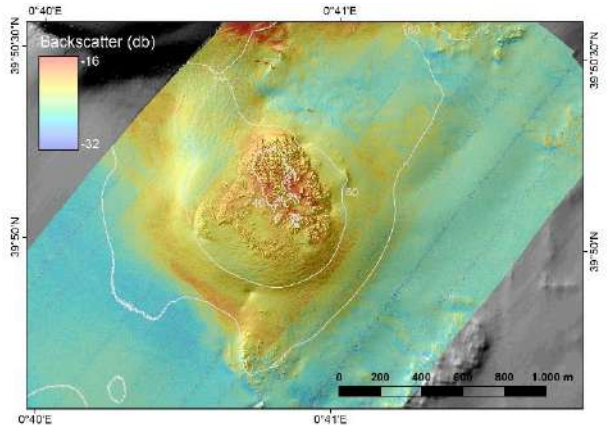


FIGURA 2. *Mapa de reflectividad en el montículo Calent donde se pueden observar los valores más elevados asociados a los montículos de la cima.*

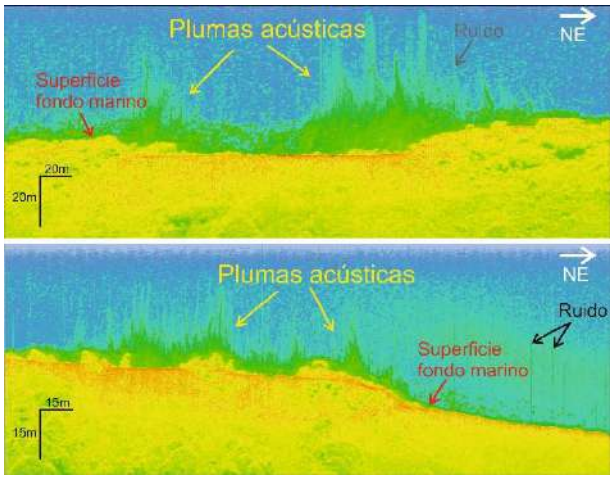


FIGURA 3. *Plumas acústicas detectadas mediante el módulo de adqusisicón de datos de la columna de agua de la ecosonda multihaz sobre el montículo Calent.*

Gracias al módulo de columna de agua se han podido extraer las anomalías detectadas asociadas a los escapes de gas y han sido discriminadas del ruido y otros artefactos (Fig. 3). En la campaña oceanográfica realizada en 2020 se detectaron acústicamente 13 plumas de salida de gases, 4 al norte del montículo, 6 al noreste de la cima del montículo y 3 al sur y sureste. En la campaña de 2021 se realizó una malla de muestreo más intensa y además de estas 13 plumas, se pudieron detectar 9 más, un total de 24 plumas, que se concentran en las mismas zonas. Estas anomalías presentan alturas que varían entre 20 y 40 m desde el fondo marino asociadas a emisiones de gas desde el fondo marino a la columna de agua. A pesar de la escasa profundidad, estas emisiones no eran visibles desde la superficie del mar. Además, las burbujas de gas fueron observadas y filmadas por buceadores científicos en las zonas de emisión hasta 40 m de profundidad (Fig. 4). En las filmaciones se observan diferentes zonas de emisión que no emiten burbujeo de manera continua, sino que actúan a pulsos intermitentes donde no todas están activas al mismo tiempo.



FIGURA 4. *Surgencias en forma de burbujas observadas en el montículo Calent.*

Los depósitos de costras son de grano fino y están compuestos por oxihidróxidos de hierro. Las muestras de sedimento obtenidas estaban compuestas por arenas gruesas biogénicas y gravas con un contenido en carbonato del 20% en la base y más del 40% en la cima del montículo. En ellas también se han muestreado especies de rodolitos (*Lithothamnion corallioides* y *Phymatolithon sp., Spongites fruticulosus*) de tamaño mediano, no asociados directamente a las surgencias.

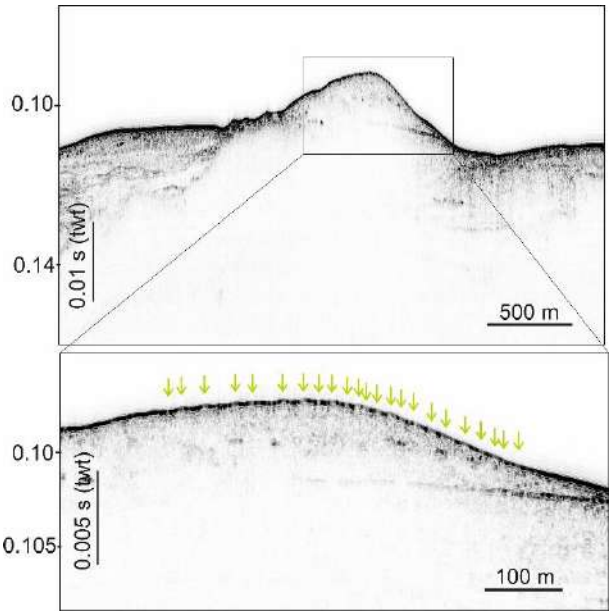


FIGURA 5. *Micro-pockmarks observados en la zona sureste del montículo Calent en un perfil de sonda paramétrica TOPAS.*

En los perfiles de muy alta resolución de la ecosonda paramétrica se han detectado multitud de pequeñas depresiones (micro-*pockmarks*) que presentan unas dimensiones de ~1m de diámetro. Se observan pequeñas interrupciones en la continuidad de los reflectores más superficiales (Fig. 5). Se localizan en la zona sureste del montículo y se identifican también en los datos de batimetría como pequeñas depresiones.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis y la puesta en común de los diferentes conjuntos de datos obtenidos ha permitido estudiar la geomorfología del montículo Calent, la detección acústica de plumas de salida de gases en la columna de agua, el tipo de sedimento, la fauna bentónica y las características sub-superficiales del área de estudio.

La naturaleza de los pequeños montículos presentes en la cima del montículo Calent está relacionada con el fenómeno de expulsión de fluidos y gases con depósitos hidrotermales asociados a las emisiones de fluidos y dióxido de carbono. En la localización acústica de las plumas de salida de gases se observa una lineación N-S, que coindice con la tendencia que siguen las islas e islotes que conforman el archipiélago, lo que podría estar relacionado con fallas que sigan esa dirección o zonas de mayor debilidad que favorecen el escape de gas.

Las características bentónicas y sedimentarias presentan diferencias muy marcadas con respecto a las zonas situadas fuera del montículo Calent. Los típicos fondos de rodolitos y coralígeno son reemplazados por grandes extensiones de especies de Laminariales que no son comunes a estas profundidades tan someras (Linares et al., 2015). El tipo de sedimento también cambia y fuera de la zona de emisiones se encuentran fondos formados por arenas gruesas, gravas y rodolitos; mientras que en la zona donde se localizan las mayores emisiones se observan costras y tapices microbianos como consecuencia del aumento local de dióxido de carbono asociados a la actividad hidrotermal.

Las microestructuras observadas en la zona sureste del montículo Calent no están relacionadas con las plumas de salida de gases detectadas ni con ningún tipo de anomalía del fondo o la columna de agua. Esto podría apuntar a la existencia de surgencias activas en un pasado reciente que ahora se presentan inactivas.

Los resultados observados indican que el montículo Calent es el área volcánica con mayor actividad hidrotermal relacionada con emisiones de dióxido de carbono que existe en el Mar Mediterráneo occidental español.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto LIFE IP INTEMARES “Gestión integrada, innovadora y participativa de la Red Natura 2000 en el medio marino español”, en concreto en la Acción A2, coordinado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico. Recibe apoyo financiero del programa LIFE (LIFE15 IPE ES 012) de la Unión Europea.

REFERENCIAS

Ancochea, E. and Huertas, M.J. (2021): Age of the volcanoes of the Columbretes Islands (Western Mediterranean) *J. Iber. Geol.*, 47:225–233.

Etheve, N., Mohn, G., Frizon de Lamotte, D., Roca, E., Tugend, J., & Gómez-Romeu, J. (2018): Extreme Mesozoic cristal thinning in the eastern Iberia margin: The example of the Columbrets Basin (Valencia Trough). *Tectonics*, 37, 636–662.

Farran, M. and Maldonado, A. (1990): The Ebro continental shelf: Quaternary seismic stratigraphy and growth patterns. *Mar. Geol.*, 95:289 312.

Linares, C., Vidal, M., Canals, M., Kersting, D.K., Amblas, D., Aspillaga, E., Cebrian, E., Delgado-Huertas, A., Díaz, D., Garrabou, J, Hereu, J., Navarro, L., Teixido, N., and Ballesteros, E. (2015): Persistent natural acidification drives major distribution shifts in marine benthic ecosystems. *Proc. R. Soc. B*, 282: 20150587.

Mauffret, A., Boillot, G., Auxiétre, J. L., and Dunad, J. P. (1978): Évolution structurale de la marge continentale au Nord-Ouest de la péninsule ibérique. *Bull. Soc. Geol. France*, *7*(4): 375–387.

Muñoz, A., Lastras, G., Ballesteros, M., Canals, M., Acosta, J., and Uchupi, E. (2005): Sea floor morphology of the Ebro Shelf in the region of the Columbretes Islands, Western Mediterranean. *Geomorphology*, *72:* 1–18.

Millot, C. (1999): Circulation in the Western Mediterranean sea. *J Mar Syst*, 20(1/4):423–442.

Price, R.E. and Giovannelli, D. (2017): A review of the geochemistry and microbiology of marine shallow-water hydrothermal vents. *Ref Module Earth Syst Environ Sci*.

Roca, E., & Guimerà, J. (1992). The Neogene structure of the eastern Iberian margin: Structural constraints on the cristal evolution of the Valencia trough (western Mediterranean). Tectonophysics, 203(1-4): 203–218.

Williams, S. N., Schaefer, S. J., Calvache v., M. L. & Lopez, D. (1992): Global carbon dioxide emission to the atmosphere by volcanoes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 1765–1770 (1992).

Primeras evidencias de escape de fluidos en la plataforma continental del golfo de Cádiz

First evidence of fluid seepage on the continental shelf in the Gulf of Cádiz

M. Sayago[1]., R. Jiménez-Romero[1], S. Román[1], A. Rodriguez-Rúa[1,] I. Muñoz[1], C. Farias[1], E. González[2], J. Gil [1] y L.M. Fernández-Salas[1]

1 Instituto Español de Oceanografía-CSIC. Centro Oceanográfico de Cádiz. Puerto Pesquero, Muelle de Levante s/n. 11006. Cádiz.
2 Instituto Español de Oceanografía-CSIC. Centro Oceanográfico de Málaga. Puerto Pesquero s/n 29640 .Fuengirola (Málaga)

Resumen: En la plataforma continental del golfo de Cádiz, se ha encontrado evidencia de un escape fluido en forma de burbujas, a una profundidad de 50 m aproximadamente sobre un alto morfológico denominado *Minas Tirith*. Los datos obtenidos para la realización de este estudio, principalmente basados en la interpretación de datos acústicos (TOPAS y EM710), indican la posibilidad de que el origen de este fluido sea gas proveniente del sedimento que se esté liberando a la columna de agua a través de fallas presentes en el subsuelo. El estudio biológico de las especies encontradas en la superficie del fondo alrededor de la zona de escape, principalmente un tapete bacteriano (probablemente del género *Beggiatoa*) así como esponjas (*Axinellla verrucosa*), ascidias (*Synoicum blochmanni*) y octocorales (*Eunicella cavolini*, *Eunicella labiata* y *Alcyonium palmatum*), indica que puede tratarse de un escape sulfuroso o de metano.

Palabras clave: escapes activos, bacterias extremófilas, plataforma continental, golfo de Cádiz

Abstract: *Evidence of a fluid escape in the form of bubbles has been found on the continental shelf of the Gulf of Cádiz, at about 50 m depth on a morphological elevation called Minas Tirith. The data obtained to carry out this study, mainly based on the interpretation of acoustic data (TOPAS and EM710), indicate the possibility that the origin of this fluid is gas from the sediment that is being released into the water column through faults present in the subsoil. The biological study of the species found on the bottom around the escape area, mainly a bacterial mat (probably of the genus Beggiatoa) as well as sponges (Axinellla verrucosa), ascidians (Synoicum blochmanni) and octocorals (Eunicella cavolini, Eunicella labiata and Alcyonium palmatum), indicates that it may be a sulfur or methane escape.*

Key words: *active seepages, extremophilic bacteria, continental shelf, Gulf of Cádiz*

INTRODUCCIÓN

En los sedimentos marinos se encuentran gases como el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etano o metano, siendo éste último el más abundante. La migración de gas en forma de burbujas es un mecanismo complejo que depende de factores como la profundidad, la concentración de gas, la temperatura y el movimiento del flujo ascendente, entre otros (Cartelle, 2018).

En el golfo de Cádiz se han identificado morfologías asociadas a las emanaciones de gas, como diapiros, volcanes de fango, chimeneas, *pockmarks*, costras y enlosados carbonatados (Díaz del Río *et al*., 2014).

La expulsión de gases, principalmente metano, hacia la superficie del fondo marino favorece ecosistemas exclusivos en estos entornos como los formados por organismos quimiosimbiontes que aprovechan el metano y otros ecosistemas, que sin ser exclusivos, aprovechan la generación bacteriana de Carbonato Autigénico Derivado del Metano (MDAC) para fijarse al sustrato (como las agregaciones de octocorales y demoesponjas), todo lo cual promueve una alta biodiversidad (Díaz del Río *et al*., 2014). Estos ecosistemas, por su vulnerabilidad, están incluidos en el Hábitat 1180, de la Directiva Hábitats (92/42/CEE).

La presencia de gas en los fondos sedimentarios del golfo de Cádiz está ampliamente documentada, principalmente en el talud continental (Somoza *et al*, 2021). En la plataforma continental, frente a la desembocadura del río Guadalquivir, Fernández-Puga *et al*, 2009 identificaron un campo de gas somero mediante el estudio de perfiles sísmicos de alta resolución. Sin embargo, hasta ahora no se ha documentado la presencia de plumas o escapes de fluidos activos en la columna de agua proveniente del subsuelo.

Este trabajo presenta las primeras evidencias de escapes activos en forma de burbujas en la plataforma continental del golfo de Cádiz.

METODOLOGÍA

Los datos utilizados en este estudio provienen de la campaña oceanográfica *CIRCASUR2023*, a bordo del *B/O Ramón Margalef*, en el marco del proyecto ESMARES (*Estrategias Marinas de España*) para la protección del medio marino.

En este estudio se adoptó un enfoque multidisciplinar analizando dos transectos de vídeo del ROV *Liropus* 2000 (~4.5 h en total). Además, se tomaron datos con ecosonda multihaz EM710 para cartografía batimétrica y de reflectividad (~1 km^2, resolución espacial de 1 m). También, se obtuvieron datos acústicos de la columna de agua a lo largo de ~4 km utilizando el modo *Water Column* de la misma ecosonda. Estos se complementaron con 6,5 km de perfiles del subsuelo marino de muy alta resolución de la ecosonda paramétrica TOPAS-PS18.

Para caracterizar la columna de agua sobre la zona de estudio, se tomaron datos físico-químicos (temperatura, salinidad, y oxígeno disuelto) en dos estaciones situadas sobre la zona de emisiones, utilizando el CTD *Seabird* 911 PLUS a profundidades de 55 m y 50 m. Estas mediciones se realizaron mediante el método Yo-Yo en ambas estaciones y, además, se llevó a cabo un Tow-Yo entre ellas.

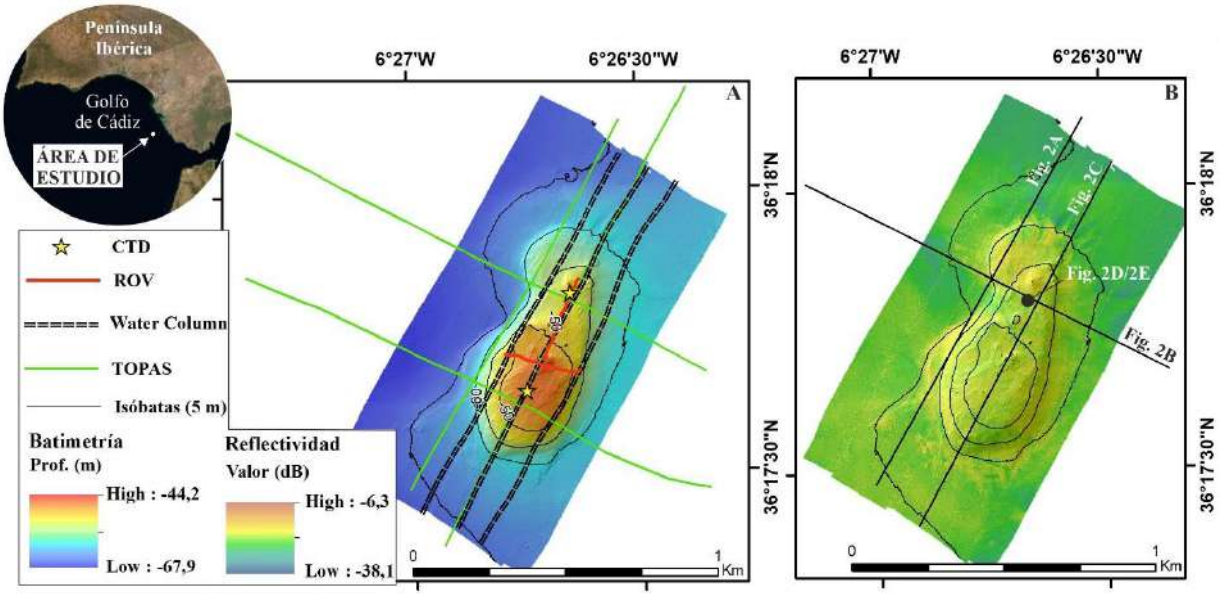


FIGURA 1. *Localización del área de estudio en el alto morfológico "Minas Tirith". A) Batimetría y posicionamiento de todos los datos utilizados en la realización de este trabajo; B) Reflectividad y localización de las imágenes mostradas en la figura 2.*

RESULTADOS

El área de estudio se localiza en la plataforma continental del golfo de Cádiz, a ~25 km de la costa, sobre un alto morfológico bautizado *Minas Tirith* (~800 m de largo, ~350 m de ancho), con profundidades entre 40 y 70 m (Fig. 1). Sus alrededores son fondos aplacerados, principalmente compuestos por sedimento fino, mayormente arena fangosa.

El análisis de los perfiles del subsuelo (TOPAS), muestra un relieve positivo con una superficie basal erosiva y un reflector de muy alta amplitud. La superficie basal muestra variaciones de altura a ambos lados del montículo, estando totalmente apantallada en la parte noreste y parcialmente en la suroeste. Sobre la superficie erosiva, hay una unidad semitransparente en ambos lados del montículo, y en el sector nororiental, el montículo se fosiliza con un espesor irregular (Fig. 2A y 2B).

En el sector norte del montículo, el ecograma de la columna de agua (Fig. 2C) muestra señales indicativas de plumas de fluidos procedentes del lecho marino. Los valores de temperatura y salinidad en las inmediaciones de estas anomalías acústicas alcanzan 23,5ºC y 36,25, respectivamente, en la superficie del mar y de 14,7ºC y 35,85 en el fondo marino. La concentración de oxígeno disuelto presenta concentraciones de 4,82 ml/L en superficie y 4,11 ml/L en el fondo.

Coincidente a los puntos de emisión interpretados en los ecogramas de la columna de agua, se han observado en las imágenes submarinas dos puntos de escape de fluidos en forma de burbujas (Fig. 2D y 2E). Estas zonas de emisión se localizan al pie de unos pequeños resaltes del fondo marino que forman un escarpe lineal.

El lecho marino del montículo está compuesto por restos de corales y conchas, interrumpidos por afloramientos rocosos. Las imágenes submarinas revelan principalmente hábitats de roca circalitoral no concrecionada dominada por invertebrados con *Dendrophyllia ramea*, *Eunicella cavolini* ó *Parazoanthus axinellae* incluidos en la lista patrón de los habitas marinos presentes en España (Templado *et al*., 2012). En la zona de surgencia, se observan invertebrados sésiles como los cnidarios *E. cavolini*, *Eunicella labiata y Alcyonium palmatum*, la esponja *Axinella verrucosa* en su mayor parte colonizada por el zoanthario *P. axinellae*) y la ascidia colonial *Synoicum blochmanni* (Fig. 2F). Además, se observan algunos

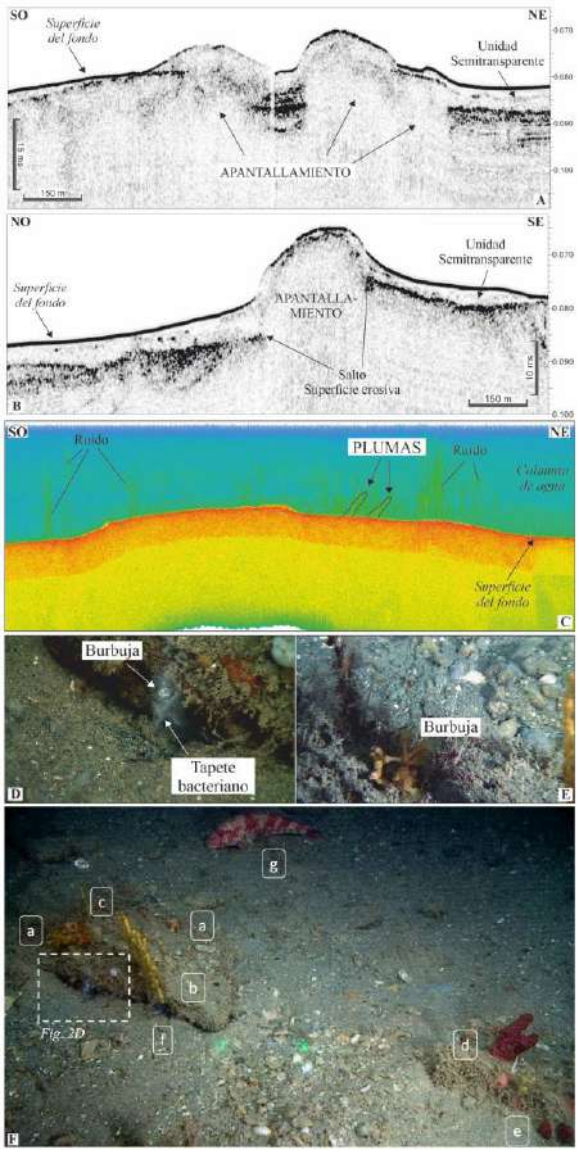


FIGURA 2. (*Ver figura 1 para localización.*) *A) y B) Perfiles verticales del subsuelo adquiridos con sonda paramétrica TOPAS donde se puede observar tanto la zona con apantallamiento de la señal acústica debajo del alto morfológico donde se ha visualizado las emanaciones como el salto vertical de la superficie erosiva (falla); C) Ecograma de la columna de agua (Water Column) adquirido con EM710 donde se pueden visualizar dos posibles plumas correspondientes a las emisiones provenientes del subsuelo; D) y E) Imágenes tomadas con ROV Liropus de la zona de emisiones, donde se observa tanto las burbujas ascendentes como (A) el tapete bacteriano presente en torno a la zona de escape; F) Imagen de la zona de emisión con identificación de la fauna observada: a. Axinella verrucosa colonizada por Parazoanthus axinellae; b. Eunicella cavolini; c. Eunicella labiata; d. Alcyonium palmatum; e. Synoicum blochmanni; f. Aiptasia mutabilis; g. Mullus surmuletus.*

peces como el salmonete (*Mullus surmuletus*) o el góbido *Gobius gasteveni* junto con el actiniario *Aiptasia mutabilis* (Fig. 2F). Lo más destacable es un suave penacho de filamentos asociado a la zona de escape, que por su apariencia podría corresponder a un tapete bacteriano del género *Beggiatoa* (Fig. 2D).

DISCUSIÓN

Los estudios basados en perfiles del subsuelo marino indican que la ruta de migración de fluidos hacia la columna de agua, se ve influenciada por los depósitos presentes en la zona. La presencia de una unidad transparente en superficie compuesta por sedimentos arcillosos poco permeables, dificulta el escape de fluidos. Así, el fluido toma las fracturas como vía de escape y explica su salida en las zonas de escarpes. La diferencia de altura de la unidad basal confirma la existencia de fallas (Fig. 2B). El propio alto morfológico *Minas Tirith* podría estar relacionado con un afloramiento diapírico aislado, similar a otros descritos en el talud del golfo de Cádiz, como *Cristóbal Colón, Magallanes* y *Juan Sebastián Elcano* (Díaz del Río *et al*., 2014) lo que favorece la existencia de fallas.

Las mediciones físico-químicas realizadas en la columna de agua no muestran anomalías significativas, en concordancia con otros estudios de medición de expulsión de fluidos en los volcanes de fango en el golfo de Cádiz (Sierra *et al*., 2020). Sin embargo, la confirmación de la existencia de salidas de burbujas mediante el registro acústico de la columna de agua y las imágenes submarinas podría explicarse por el hecho de que las expulsiones de fluidos son localizadas y de tamaño reducido, lo que requeriría una mayor precisión y proximidad de los equipos de medición al punto de muestreo.

La presencia de bacterias del género *Beggiatoa* en las cercanías de emisiones de burbujas es relevante, ya que indican la quimiosíntesis del metano y/o azufre (Canet y Prol, 2010). Tapetes de bacterias filamentosas similares se han descrito asociadas al volcán de fango *Anastasya*, (Diaz del Río *et al*., 2014) y en la cima del volcán de fango *Mercator* (Somoza *et al*., 2021) en el talud continental del golfo de Cádiz.

La presencia de *E. cavolini* y *E. labiata*, y de *A. palmatum*, va en concordancia con Somoza *et al*. (2021), que describió agregaciones de gorgonias y corales blandos colonizando MDAC en los alrededores de zonas de emisiones de metano en el NE Atlántico. Si el fluido expulsando es principalmente metano, su origen podría ser biogénico acumulándose en contextos arcillosos (Judd y Hovland, 2007). La removilización del sedimento asociado a la liberación de burbujas puede liberar nutrientes, favoreciendo la actividad biológica (Leifer y Patro, 2002).

Otra hipótesis respaldada por la presencia de bacterias del género *Beggiatoa*, es que las burbujas contienen fluidos ricos en azufre, lo cual es relevante considerando la presencia del manantial de Fuente Amarga en la cercana localidad de Chiclana de la Frontera (Cádiz), donde se han cartografiado manantiales sulfurosos alineados en dirección NE-SO (San José Arango, 1991).

CONCLUSIONES

El hallazgo y confirmación de emisiones de fluidos en la plataforma continental del golfo de Cádiz es significativo por varias razones: a) representa la primera observación directa de salidas de fluidos desde el fondo marino en la plataforma continental; b) contribuye al

avance del conocimiento geológico de la zona; c) tiene implicaciones ecológicas, ya que la expulsión de fluidos juega un papel crucial en la estructuración de los ecosistemas marinos, y d) proporciona una mejor comprensión de la distribución y el comportamiento de las emisiones de fluidos en la plataforma continental del golfo de Cádiz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la tripulación y técnicos a bordo del *B/O Ramón Margalef* su colaboración en el buen desarrollo de la campaña y también a la Dra. D. Palomino su apoyo en la visualización de los datos de la columna de agua.

REFERENCIAS

Canet, C. y Prol, R.M. (2010): Infiltración y Escape de Fluidos Sedimentarios en el Fondo Marino: Estructuras y Procesos de Mineralización. *Macla* 12: 04-09.

Cartelle Álvarez, V. (2018): Estratigrafía, ambientes de sedimentación, gas somero y análisis sísmico-secuencial del registro sedimentario de las rías de Arousa y Ferrol. Tesis Doctoral, Univ. de Vigo, 340 p.

Díaz del Río, V., Bruque, G., Salas, L.F., Rueda, J.L., González, E., López, N., Palomino, D., López, F.J., Farias, C., Sánchez, R., Vázquez, J.T., Rittierott, C.C., Fernández, A., Marina, P., Luque, V., Oporto, T., Sánchez, O., García, M., Urra, J., Bárcenas, P., Jiménez, M.P., Sagarminaga, R. y Arcos, J.M. (2014): Volcanes de fango del golfo de Cádiz, Proyecto LIFE+ INDEMARES. Ed. *Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid (España)*,130 p.

Fernández Puga, M.C., Vázquez, J.T., Mata, M.P., Somoza, L. y León, R. (2009). Caracterización de un campo de gas somero en la plataforma continental del Golfo de Cádiz. En: *6º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico*, MIA09: 89-92.

Judd, A., y Hovland, M. (2007): Seabed Fluid Flow. Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 408 p.

Leifer, I. y Patro, R.K. (2002): The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study. *Continental Shelf Research*, 22(16):2409-2428.

San José Arango, M.C. (1991). *Estudio hidrológico del Balneario de Fuente Amarga de Chiclana (Cádiz)*. Tesis Doctoral, Univ. de Sevilla, 400 p.

Sierra, A., Jiménez-López, D., Ortega T., Fernández-Puga, M.C., Delgado-Huertas, A. y Forja, J. (2020). Methane dynamics in the coastal – Continental shelf transition zone of the Gulf of Cadiz. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236: 106653.

Somoza, L., Rueda, J.L., Sánchez-Guillamón, O., Medialdea, T., Rincón-Tomás, B., González, F.J., Palomino, D., Madureira, P., López-Pamo, E. y Fernández-Salas, L.M. (2021): The Interactive Role of Hydrocarbon Seeps, Hydrothermal Vents and Intermediate Antarctic/Mediterranean Water Masses on the Distribution of Some Vulnerable Deep-Sea Habitats in Mid Latitude NE Atlantic Ocean. *Oceans*, 2: 351-385.

Templado, J., Ballesteros, E., Galparsoro, I., Borja, A., Serrano, A. Martín, L. y Brito A. (2012): Inventario Español de Hábitas y Especies Marinos. Ed. *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid (España)*, 229 p.

Hidratos de gas al norte de las Islas Shetland del Sur: ¿en estado transitorio o de equilibrio?

Gas hydrates off north the South Shetland Islands: transient or equilibrium state?

R. Urgeles[1], R. León[2], R. Arasanz[1], L.F. Pérez[3], R. Bartolomé[1], J. García-Crespo[2], M.C. Fernández-Puga[4], T. Ortega[4], M. Giustiniani[5], U. Tinivella[5]

[1] Institut de Ciències del Mar (CSIC), Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona, Spain, urgeles@icm.csic.es
[2] Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Ríos Rosas, 23. 28003 – Madrid, Spain
[3] Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), Universitetsbyen 81, 8000 Århus, Denmark
[4] Universidad de Cádiz, Campus Universitario de Puerto Real, 11519 Puerto Real, Spain
[5] Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Borgo Grotta Gigante n. 42/c, 34010 Sgonico (Trieste), Italy

Palabras clave: Hidratos de gas, BSR, presión intersticial, gradiente geotérmico, península antártica.

Resumen

La estabilidad de los hidratos de gas (HG) es sensible al cambio climático (*eg*. cambios del nivel del mar y temperatura), y puede retroalimentarlo. La presencia de HG en el margen pacífico de la Península Antártica (PPA) se infiere en los perfiles sísmicos por el reflector simulador de fondo (BSR) que indica el contacto entre los HG y gas libre en el sedimento. Este estudio investiga las variaciones en la profundidad del BSR a través datos sísmicos, batimétricos, oceanográficos y de flujo de calor que pudieran indicar procesos de inestabilidad en los sistemas de HG. En el PPA, el BSR se extiende entre las islas Elephant y King George entre los 500 y 4000 m de profundidad y es 200-400 m más profundo de lo esperado con el gradiente geotérmico promedio (100 ± 30 ºC/km) proveniente de los escasos registros de la base de datos global de flujo de calor. Debido a que en los primeros metros del subsuelo la medición del gradiente geotérmico es poco precisa (*eg*. cambios de porosidad y temperatura del fondo, procesos de disociación, etc) se ha inferido la temperatura y la presión a partir de la profundidad del BSR para diferentes composiciones de gas. Los resultados indican que cualquier sobrepresión potencial resultante de una sedimentación rápida o esfuerzos tectónicos no puede explicar la profundidad del BSR, ya que no pueden equilibrarse las condiciones térmicas a tales profundidades. Por otro lado, el gradiente geotérmico medio calculado en condiciones hidrostáticas, 34 ± 6,5 ºC/km (100% CH_4), podría ser un escenario plausible dados los modelos de flujo de calor disponibles para la PPA. Sin embargo, cerca de la fosa y asociados a facies sísmicas caóticas, se han determinado gradientes geotérmicos más altos que podría indicar un flujo de fluidos más vigoroso y concentrado en esta zona, así como alrededor de fallas y estructuras antiformes.

Abstract

Gas hydrates (GHs) stability is highly sensitive to climate-induced perturbations (e.g., changes in sea level and temperature) and may provide feedback to global climate change. The occurrence of GHs in the Pacific margin of the Antarctic Peninsula (PAP) is manifested as a negative polarity Bottom Simulating Reflector (BSR) in seismic reflection data. The BSR indicates the contact between the top GH-bearing sediment and the bottom free gas-rich sediment. This study uses legacy seismic, bathymetric, oceanographic and heat flow data to investigate trends and spatial variations in BSR depth that could point to transient processes in the GH system. In the PAP, a BSR level is widespread between Elephant and King George Is. between 500 and 4000 m water depth and is 200-400 m deeper than expected given the average geothermal gradient (100 ± 30 ºC/km) taken from the scarce data available in the Global heat flow database. Due to difficulties in precise geothermal gradient determination in the first few meters of the subsurface (eg. porosity and bottom temperature changes, hydrate dissociation processes, etc), temperature and pressure have been inferred from the BSR burial depth for different gas compositions. Results indicate that any potential overpressure resulting from rapid sedimentation or tectonic stresses cannot account for the observed depth of the BSR, as it cannot balance the thermal conditions at such depths. On the contrary, the geothermal gradient calculated under hydrostatic conditions, 34 ± 6,5 ºC/km (100% CH_4), is considered a plausible scenario given available heat flux models for the PAP. Finally, we identify higher geothermal gradients near the trench where seismic chaotic facies occur. This could indicate a more vigorous and focused fluid flow systems near the trench as well as around antiformal structures and faults.

Flujo de fluidos y *lateral spreading*, modelo acoplado morfo-geotécnico.

Fluid flow and lateral spreading, coupled morpho-geotechnical model.

M. Yenes[1], J. Nespereira[1], D. Casas[2]

[1] Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, España.

[2] Institut de Ciències del Mar ICM-CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta 31-49. 08003 Barcelona, España.

Palabras clave: Margen de Palomares, geotecnia CPTu, presión intersticial, licuefacción, pockmark.

Resumen

El alto de Águilas, de origen metamórfico, es uno de los altos estructurales que configuran el margen continental de Palomares, situado en el SO del mar Mediterráneo. Su techo, situado a más de 1.000 metros de profundidad, se caracteriza por una superficie suave formada por sedimentos contorníticos. En estos sedimentos se observan características morfosedimentarias como pockmarks e inestabilidades definidas por cicatrices y depósitos en forma de crestas subparalelas.

La combinación de datos batimétricos de muy alta resolución (2 metros) y pruebas geotécnicas in situ (CPTu), permite definir un modelo para las inestabilidades observadas. En este modelo el flujo de fluidos tiene un papel fundamental tanto en el desencadenamiento como en la dinámica posterior del movimiento en masa. Los datos geotécnicos definen un intervalo entre 10 y 15 m bajo el fondo marino que habría desarrollado sobrepresión intersticial debido al efecto acumulado de terremotos en la zona. Una vez que la sobrepresión excede la resistencia del sedimento, se desarrolla un proceso de licuefacción (*cyclic softening*) desencadenando *lateral spreads*. Sincrónicamente, la sobrepresión produce un flujo vertical de fluidos concentrado en las zonas de debilidad de la columna sedimentaria, generadas por los esfuerzos de tensión producidas por la pendiente y los movimientos del sedimento. El flujo vertical de fluidos produce drenaje y, consecuentemente, la disipación del exceso de presión intersticial, de modo que aumentan las tensiones efectivas y la resistencia del sedimento, pausándose así su movimiento, al menos temporalmente. Un mínimo de dos ciclos de sobrepresión-drenaje explican la configuración anidada de las cicatrices y la asociación espacial entre los pockmarks y las cicatrices observadas.

Abstract

The Aguilas high, metamorphic in origin, is one of the structural highs shaping the Palomares continental margin, located in the SW Mediterranean Sea. Its top located down to 1000 meters water depth, is characterized by a smooth surface shaped by contourites. Those contourites are affected by morphosedimentary features such as a pockmarks field, and instability features like scars and deposits defined by subparallel sedimentary ridges.

The merging and combination of very high-resolution bathymetric data (2 meters resolution) and in-situ CPTu geotechnical tests, allowed to define a model for the instabilities observed on the summit of the high where fluid flow has a very important role regarding the evolution (triggering and stopping) of mass movements. Geotechnical data defined an interval at depths between 10 and 15 m below seafloor which would have developed excess pore pressure due to the accumulation of the effect of earthquakes in the area. Once the overpressure exceeds the sediment strength, lateral spreads driven by liquefaction (cyclic softening) was triggered. Synchronically, overpressure produced vertical fluid flow following weaker parts of the sedimentary column produced by tensional strain. Drainage produces excess pore pressure dissipation and the increase of effective stress. Therefore, it results in a partially strengthen of the initially overpressured sediment and the stop of the instability. At least two cycles of overpressure-drainage explain the nested configuration of scars and the spatial association between pockmarks and scars observed.

Señales Distintivas del Antropoceno en Sedimentos Costeros de la Ría de Muros (Noroeste de la Península Ibérica).

Distinctive Signals of the Anthropocene in Coastal Sediments of the Ría of Muros (NW Iberian Peninsula)

M.A. Álvarez-Vázquez[1], R. Prego[2]

1 Área de Xeografía Física, Grupo GEAAT, Departamento de Historia Arte e Xeografía, Universidade de Vigo, 32004 Ourense. mianalva@uvigo.gal
2 Instituto de Investigaciones Marinas (IIM-CSIC), 36208 Vigo. prego@iim.csic.es

Palabras clave: Elementos traza, elementos industriales, estratigrafía, Historia Ambiental.

Resumen

El análisis de los contenidos de elementos traza (Cu, Pb y W) en un testigo de sedimento recuperado de la región central de la ría de Muros e Noia ha revelado un posible impacto humano que se remonta a la edad media. Sin embargo, la composición del segmento más superficial (profundidad de 0-40 cm) diferencia claramente las capas industrial y preindustrial. El tramo industrial, que se inicia a mediados del siglo XIX, parece estar principalmente vinculado a la minería. La Casiterita (Sn) y la Wolframita (W) fueron objeto de una explotación intensiva desde la década de 1890 hasta la de 1990, primera mina de W en España y una de las primeras en Europa. En este contexto, la composición del sedimento probablemente refleja la intensificación de la producción de W, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial. El breve período en el que el W se utilizó ampliamente como endurecedor en el acero sirve como un buen marcador de la Gran Aceleración, caracterizada por diversos impactos individuales que se convierten en un fenómeno global hacia mediados del siglo XX. La resolución del muestreo del testigo (una muestra cada 10 cm) no permite una exploración detallada del Antropoceno, justificando un nuevo muestreo para lograr una mejor resolución temporal.

Abstract

The analysis of trace element contents (Cu, Pb, and W) of the sediments from a core recovered in the central region of the Ria de Muros e Noia has revealed a potential human impact dating back to the Middle Ages. However, the composition of the uppermost segment (0-40 cm depth) clearly divides the industrial and preindustrial layers. The industrial portion, starting in the mid-19th century, seems to be primarily linked to mining. Cassiterite (Sn) and wolframite (W) were intensively exploited from the 1890s to the 1990s, at the first W-mine in Spain and one of the earliest in Europe. In this context, the sediment composition likely reflects the intensification of W production, especially during World War II. The brief period in which W was widely used as a hardener in steel serves as a good marker of the Great Acceleration, characterized by various individual impacts becoming a global phenomenon by the mid-20th century. The resolution of the core (one sample each 10 cm) does not allow a detailed exploration of the Anthropocene, justifying a new sampling to improve the temporal resolution.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto MEMUNO (PID2021-122238OB-I00). Los autores expresan su agradecimiento al Dr. G. Francés quién cedió las muestras del testigo y a A. Rodríguez-Jiménez que realizó los primeros análisis de los datos. M.A. Álvarez-Vázquez es contratado postdoctoral de la Xunta de Galicia (#ED481D-2023/006).

Aportaciones al debate sobre el Antropoceno desde lo rural: Impacto de la agricultura en Las Tablas de Daimiel

Contributions to the debate on the Anthropocene from a rural perspective: Impact of agriculture in Las Tablas de Daimiel

A. Celis [1], R. Mediavilla[2], J.I. Santisteban[3]

1 Departamento de Filosofía y Lógica y Filosofía de la Ciencia, Fac. Filosofía, Universidad de Sevilla. pozuelo@us.es
2 Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC). r.mediavillla@igme.es
3 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Fac. CC. Geológicas, UCM, Madrid. j.i.santisteban@geo.ucm..es

Palabras clave: Antropoceno, Tablas de Daimiel, Great Acceleration, Península Ibérica, agricultura

Resumen

La investigación sobre el Antropoceno se ha centrado en la Península Ibérica, fundamentalmente, en áreas donde el impacto de la actividad industrial ha sido muy importante (Cearreta, 2016). Sin embargo, son más escasos los trabajos que examinen el papel que ha tenido la actividad agrícola. La antigüedad de esta actividad, presente desde la Prehistoria, obliga, además de observar sincronías entre unos lugares y otros, a mantener un enfoque diacrónico que permita conocer la evolución de la agricultura desde hace miles de años. Por ello, es clave encontrar áreas de estudio idóneas donde se pueda acometer metodologías que permitan combinar registro sedimentario e histórico para escalas temporales de larga duración.

Uno de estos enclaves es el humedal del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel que ha sido poblado desde la Edad del Bronce hasta la actualidad y donde se han ido acumulando sedimentos que posibilitan el estudio tanto de los cambios de origen climático como los producidos por la acción humana. A partir del estudio de las modificaciones que la agricultura ha realizado sobre el humedal, se propone una periodización y se realiza una comparación con las etapas propuestas para el Antropoceno (Steffen *et al.*, 2007). De este modo, se aportan nuevos datos al debate sobre el comienzo de esta era desde una zona diferente a las industriales y situada en un área menos conocida hasta ahora.

Abstract

Research on the Anthropocene has primarily focused on the Iberian Peninsula, particularly in areas where the impact of industrial activity has been significant (Cearreta, 2016). However, there are fewer studies examining the role of agricultural activity. The antiquity of this activity, present since prehistory, necessitates not only observing synchronicities between different locations but also maintaining a diachronic approach that allows understanding the evolution of agriculture over thousands of years. Therefore, it is crucial to find suitable study areas where methodologies combining sedimentary and historical records can be applied for long-term temporal scales.

One of these enclaves is the wetland of Las Tablas de Daimiel National Park, which has been inhabited since the Bronze Age until the present day and where sediments have accumulated, enabling the study of both climate-induced changes and those caused by human action. By studying the modifications that agriculture has made to the wetland, a periodization is proposed and compared with the stages proposed for the Anthropocene (Steffen et al., 2007). Thus, new data are contributed to the debate on the beginning of this era from a different area than the industrial ones and located in a less known area until now.

Agradecimientos

Actividad realizada en el marco de los proyectos ERC-CoG DEEPMED-101002330 y CGL2011-30302-C02-01

Referencias

Cearreta, A. (2016). *Cuaternario y geomorfología*, 30(3-4), 5-8.
Steffen, W.; Crutzen, P. J. & McNeill, J. R. (2007). *Ambio,* 36(8), 614-621.

Actuaciones desarrolladas en el Proyecto LIFE IP Duero para la recuperación de la MASb de Medina del Campo

Actions carried out in the LIFE IP Duero Project to recovery the groundwater body of Medina del Campo

A. De la Hera-Portillo[1], R. Mediavilla[1], J. Heredia-Díaz[2], L. Moreno-Merino[1], H. Aguilera[1], M. Llorente-Isidro[1], C. Marcos[3], M. Gómez-Gamero[3], M.A. Sánchez[3], F.M. Rubio Sánchez-Aguililla[1], M. Rodrigo[1], A. García[1], B. Benjumea[1], A. González[1], J.M. Llorente[1], A. Romero[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.delahera@csic.es; a.romero@igme.es; l.moreno@csic.es; h.aguilera@igme.es; r.mediavillla@igme.es; m.llorente@igme.es;
2 negrojghd@gmail.com
3 Confederación Hidrográfica del Duero. cmp@chduero.es;

Palabras clave: LIFE-IP Duero, acuíferos, humedales, degradación, recuperación hídrica.

Resumen

El ser humano requiere para su desarrollo utilizar los recursos naturales. Sin embargo, la sobreexplotación de esos recursos, y especialmente del agua, está afectando a distintos ecosistemas hasta el punto de poner en riesgo su supervivencia. Desde la Unión Europea se está promoviendo el desarrollo de medidas encaminadas a mitigar los efectos de la actividad humana y en este marco, se sitúa el proyecto LIFE IP Duero que comenzó su andadura en el año 2018 y su extensión se prolonga hasta el año 2026. En estos 8 años se plantea desarrollar una serie de actuaciones dirigidas a la recuperación del estado de la masa de agua subterránea de Medina del Campo. El IGME-CSIC está participando en tres de ellas: (1) Conservación de humedales, mediante el análisis del sedimento de las cubetas de humedales relevantes y el análisis de estrategias de gestión mediante balances hídricos; (2) la recarga artificial del acuífero, precedida de trabajos geofísicos para la caracterización del subsuelo en la zona de Langa, subcuenca del río Zapardiel; (3) el estudio de la contaminación por nitratos como principal contaminante responsable del mal estado químico de la MASb. Este estudio se está desarrollando dos zonas piloto ubicadas en la subcuenca del río Zapardiel. En este trabajo se presentan los detalles de estas actuaciones a fecha de hoy y los resultados esperados.

Abstract

Human beings require the use of natural resources for their development. However, the overexploitation of these resources, and especially water, is affecting various ecosystems to the point of jeopardizing their survival. The European Union is promoting the development of measures to mitigate the effects of human activity, and within this framework, the LIFE IP Duero Project was initiated in 2018 and is set to continue until 2026. Over these 8 years, a series of actions are planned to restore the condition of the Medina del Campo groundwater body. The IGME-CSIC is involved in three main aspects: (1) Wetland conservation, involving the analysis of sediment in relevant wetland basins and the examination of management strategies through water balance assessments; (2) artificial recharge of the aquifer, preceded by geophysical work for subsurface characterization in the Langa area, a sub-basin of the Zapardiel River; (3) study of nitrate pollution as the primary contaminant responsible for the poor chemical status of the groundwater body. This study is being conducted in two pilot areas located in the Zapardiel River sub-basin. This work presents the details of these actions as of today and the expected results.

Referencias

LIFE-IP Duero. LIFE16 IPE/ES/000019 LIFE-IP RBMP-DUERO. *Water IP: Implementation of the river Duero basin management plan in the Central-South part of the River Duero Basin*. https://www.lifeduero.eu/

Historia de un colapso ecológico: las huellas isotópicas de la evolución reciente del Mar Menor (Murcia, SE España).

History of an ecological collapse: the isotope signatures of the recent evolution of the Mar Menor (Murcia, SE Spain).

M. Galofré[1], A. Delgado[1], A. Moreno[2], J. Pey[2] y B. L. Valero Garcés[2]

1 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (CSIC-UGR), Av. de las Palmeras, 4, 18100 Armilla. marcel.galofre@csic.es, antonio.delgado@csic.es
2 Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), 50059, Zaragoza. blas@ipe.csic.es, jorge.pey@ipe.csic.es, amoreno@ipe.cisc.es

Palabras clave: Mediterráneo, albufera, isótopos estables, eutrofización, Antropoceno.

Resumen

El Mar Menor es una de las numerosas lagunas litorales que se encuentran en el Mediterráneo. Este ecosistema ha estado expuesto a múltiples cambios rápidos a lo largo de su historia, siendo aquellos vinculados a la actividad humana (minería, cambios de usos del suelo y de su salinidad, agricultura intensiva, explosión urbana, etc.) los más persistentes. En las décadas más recientes, el Mar Menor ha experimentado pulsos de mortalidad de peces, cambios en la vegetación subacuática predominante y procesos de eutrofización, derivados de la entrada incontrolada de nutrientes al vaso lagunar. A finales del año 2015, el ecosistema, incapaz de absorber más nutrientes, colapsó, inaugurando un nuevo escenario.

El estudio de los sedimentos permite aportar información cualitativa y cuantitativa de como los ciclos biogeoquímicos han sido afectados. En este trabajo, combinamos el análisis sedimentológico de varios sondeos cortos con indicadores geoquímicos elementales e isotópicos para reconstruir la historia deposicional, la evolución de los ciclos geoquímicos del S y del N, y la variabilidad de las tasas de acumulación de carbono orgánico durante los últimos milenios hasta la actualidad. Los indicadores isotópicos de la materia orgánica y del azufre total permiten trazar con precisión la evolución de diferentes procesos que han modelado el sistema durante las fases previas con escasa influencia antrópica, las últimas décadas y el colapso ecológico.

Abstract

The Mar Menor is one of the many coastal lagoons found in the Mediterranean. This ecosystem has been exposed to multiple rapid changes throughout its history, mainly due to human activity (mining, land use and cover changes, irrigation infrastructure, urban expansion and intensification of agriculture in the surrounding). In the most recent decades, the Mar Menor has experienced episodes of fish mortality, changes in the predominant aquatic vegetation, fish and bivalves related to eutrophication processes, derived from the uncontrolled input of nutrients from the watershed to the lagoon. At the end of 2015, the ecosystem, unable to absorb more nutrients, collapsed, inaugurating a new scenario.

The study of the sediments provides qualitative and quantitative information on the biogeochemical cycles and how they have been affected. This allows for a more rigorous understanding of the magnitude of each process. In this work, we combine the sedimentological study of several short sediment cores with elemental and isotopic geochemical indicators to reconstruct the depositional history, the evolution of S and N geochemical cycles, as well as the variability of organic carbon accumulation rates during the last millennia to the present. The isotopic indicators of organic matter and total sulfur allow us to accurately trace the evolution of different processes that have shaped the system during the previous phases with little anthropogenic influence, the last decades, and the ecological collapse.

Análisis de los microplásticos de gran tamaño (>1 mm) en sedimentos recientes del estuario del Nalón (Asturias, N España)

Assessment of large microplastics (>1 mm) in recent sediments from the Nalón estuary (Asturias, N Spain)

J. Gardoki[1], F. Bessa[2], A. Cearreta[1], A. García-Artola[1], J. Gómez-Arozamena[3] y V. Villasante-Marcos[4]

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, 48940 Leioa. jon.gardoqui@ehu.eus, alejandro.cearreta@ehu.eus, ane.garcia@ehu.eus
2 Centre for Functional Ecology – Science for People & the Planet (CFE), Associate Laboratory TERRA, Department of Life Sciences, 3000-456 Coimbra. afbessa@uc.pt
3 Dpto. de Ciencias Médicas y Quirúrgicas, Facultad de Medicina, Universidad de Cantabria, 39011 Santander. jose.gomez@unican.es
4 Laboratorio de Magnetismo de Materiales y Magnetismo Ambiental, Instituto Geográfico Nacional, 28014 Madrid. vvillasante@mitma.es

Palabras clave: microplásticos, sedimentos, marisma, estuario, Antropoceno.

Resumen

Los microplásticos son contaminantes emergentes cuya presencia está cada vez más extendida en los estuarios del margen noratlántico ibérico. Sin embargo, pocos estudios se han centrado en la distribución de estos contaminantes antropogénicos en su registro sedimentario reciente. En este trabajo, se ha analizado el contenido de microplásticos de gran tamaño (>1 mm) en un sondeo de llanura intermareal y un sondeo de marisma (ambos de 50 cm de longitud) perforados en la zona media del estuario del Nalón. Tras una digestión alcalina de los sedimentos, se caracterizaron las partículas sospechosas de ser microplásticos. El contenido en ambos sondeos está fundamentalmente dominado por fibras de diversos colores y longitudes (55-85%), con una mayor abundancia de microplásticos en la llanura intermareal (media de 92 partículas/kg de sedimento seco), en comparación con la marisma (40 partículas/kg de sedimento seco). La información cronoestratigráfica y ambiental aportada por estos microplásticos contribuye a la reconstrucción del registro sedimentario antropoceno en este estuario.

Abstract

Microplastics are recognized as emerging contaminants whose presence is increasingly widespread in estuaries of the northern Atlantic Iberian margin. However, there is a limited body of research works addressing the distribution of these anthropogenic pollutants in their recent sedimentary record. In this study, the content of large microplastics (>1 mm) from sediment cores of an intertidal flat and a salt marsh (both 50 cm long) has been analyzed. After an alkaline digestion of the sediments, suspected particles were characterized. The content in both cores is primarily composed of fibers of various colors and lengths (55-85%), with a higher abundance of microplastics in the intertidal flat (average of 92 particles/kg of dry weight sediment) compared to the salt marsh (40 particles/kg of dry weight sediment). The chronostratigraphic and environmental information provided by these microplastics contributes to the reconstruction of the Anthropocene sedimentary record of this estuary.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos RTI2018-095678-B-C21, MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and ERDF A way of making Europe and European Union (MINECO) e IT1616-22 (EJ/GV). J.G. percibe una ayuda predoctoral del GV-EJ (PRE_2020_1_0035).

Desarrollo metodológico para la caracterización del régimen hídrico en humedales secos. Primeros resultados en la cuenca del Duero

Methodological development for the characterization of the water regime in dry wetlands. First results in the Duero basin

J. Heredia-Díaz[1], A. Romero-Prados[2], L. Moreno-Merino[2], H. Aguilera[2], R. Mediavilla[2], M. Llorente-Isidro[2], A. De la Hera-Portillo[2]

1 Hidrogeólogo retirado. negrojghd@gmail.com
2 Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC). Ríos Rosas 23, 28002 Madrid. a.delahera@csic.es; a.romero@igme.es; l.moreno@csic.es; h.aguilera@igme.es; r.mediavillla@igme.es; m.llorente@igme.es;

Palabras clave: Lagunas, Medina del Campo, régimen hídrico, nitratos, impacto antrópico.

Resumen

El Sur de la Cuenca del Duero albergó más de 2000 pequeñas lagunas con régimen hídrico fluctuante, alimentadas por aguas subterráneas y/o por aguas de lluvia y de escorrentía. Actualmente el 93% de esos humedales están secos por efecto del impacto humano. Su desecación comienza en la década de 1980 cuando se desconectan del acuífero regional (acuífero detrítico del Duero) en respuesta al descenso piezométrico causado por la explotación agrícola intensiva de las aguas subterráneas (Mediavilla et al., 2020). Diseñar estrategias de preservación y/o recuperación de dichos ecosistemas precisa conocer el régimen hídrico de cada laguna en su estado natural o poco influenciado. Con este fin, se ha desarrollado una metodología (Heredia et al., 2022) basada en la similitud del contenido de los iones mayoritarios de las sales y la concentración de nitratos presentes en los horizontes más superficiales (10 y 20 cm) de los sedimentos lagunares y de su entorno inmediato. Analizando muestras tomadas en el lecho de lagunas y en posiciones fuera de la influencia del agua subterránea y del encharcamiento, se ha observado la existencia de patrones de distribución iónica directamente relacionados con la circulación regional de las aguas subterráneas, la posición topográfica de las muestras, la presencia de agua encharcada y su origen.

Abstract

The Southern Duero Basin once hosted more than 2000 small, fluctuating water regime ponds, nourished by groundwater and/or rainwater and runoff. Currently, 93% of these wetlands are dry due to human impact. Their desiccation began in the 1980s when they became disconnected from the regional aquifer (Duero detrital aquifer) in response to a piezometric decline caused by intensive agricultural exploitation of groundwater (Mediavilla et al., 2020). Designing preservation and/or recovery strategies for these ecosystems requires understanding the water regime of each pond in its natural or minimally influenced state. To this end, a methodology based on the similarity of the major ion content of salt and nitrate concentration present in the uppermost sediment horizons (10 and 20 cm) of pond sediments and their immediate surroundings (Heredia et al., 2022) has been developed. By analyzing samples taken from the pond bed and positions not affected by groundwater and waterlogging, the existence of ionic distribution patterns directly related to the regional circulation of groundwater, the topographic position of samples, the presence of waterlogging, and its origin have been observed.

Agradecimientos: Contribución al Proyecto NAIAD (EU-H2020 Grant Agreement nº 730497).

Referencias

Heredia, J.; Moreno, L.; Aguilera, H.; De la Hera, A.; Mediavilla, R.; Llorente, M. (2022). En: *Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas*. Libro de resúmenes, 125-126.

Mediavilla, R., Santisteban, J. I., López Cilla, I., Galán de Frutos, L., De la Hera-Portillo, A. (2020). *Water* 12(7).

Las acequias de careo y su registro sedimentario. Un ejemplo de actividad humana en Sierra Nevada (España)

The "acequias de careo" and their sedimentary record. An example of human activity in Sierra Nevada (Spain)

R. Mediavilla[1], A. Ruiz-Constán[1] A. González-Ramón[1], C. Marín-Lechado[1] J. Jódar[1], S. Martos-Rosillo[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. r.mediavillla@igme.es; s.martos@igme.es; a.ruiz@igme.es; antonio.gonzalez@igme.es; c.marin@igme.es; j.jodar@igme.es

Palabras clave: Acequias de careo, Granada, clima, estructura de adaptación, antrópico.

Resumen

Las acequias de careo son una infraestructura hidráulica para la adaptación al cambio climático que está en uso en Sierra Nevada desde la Alta Edad Media (Martos Rosillo *et al*., 2019). Estas acequias infiltran el agua del deshielo, en los acuíferos en ladera, alimentando a manantiales y a cauces de primer orden, que mantienen su descarga durante los meses de estío. La implantación del clima mediterráneo árido durante el Holoceno supuso la instauración progresiva de un régimen marcadamente estacional en el que los meses secos se caracterizan por una pluviosidad insuficiente para la actividad humana y justifican la necesidad de dichas infraestructuras. El estudio geofísico y sedimentológico revela que los depósitos asociados al funcionamiento de dichas estructuras se alojan en depresiones adyacentes a las acequias, donde la mayor parte de la infiltración va a tener lugar, y se caracterizan por un apilamiento de pequeños lóbulos de abanico, cada uno de los cuales muestra una secuencia granodecreciente, que en conjunto forman una secuencia total de disminución de grano. Esta secuencia puede estar condicionada por la pérdida progresiva de pendiente durante el relleno o por la pérdida de carga debida a la apertura aguas arriba de otras compuertas de desagüe. En cualquier caso, no hay evidencias que apunten a que el clima, aunque es la causa de su instauración, haya jugado un papel fundamental en la variabilidad de la secuencia general.

Abstract

The "*acequias de careo*" are part of an ancestral Integrated Water Resources Management system functioning since High Middle Ages at high altitudes. These *acequias* are a delayed recharge mechanism of groundwater and springs from meltwater used to supply water during the driest months. The onset of the Mediterranean dry climate during the Holocene led to the development of marked seasonal conditions during which water supply was not enough for the development of human activities, justifying the digging of such *acequias*. The geophysical and sedimentological studies show that sediments linked to the functioning of the *acequias* are placed in shallow depressions through which infiltration took place. These deposits are characterized by fining-upwards sequences forming small fan-shaped bodies that piled up to create an overall decreasing-energy sequence. This sequence can be related to a slope decrease due to the infill of the depressions or to the upstream opening of discharge gates causing the loss of coarse sediment. Anyway, despite climate is the main reason for the functioning of these *acequias*, there are no data pointing to a climate influence on the overall sequence development.

Agradecimientos

Actividad realizada en el marco del Proyecto PID2022-140092OB-I00

Referencias

Martos-Rosillo, S.; Ruiz-Constán, A.; González-Ramón, A.; Mediavilla, R.; Martín-Civantos, J.M.; Martínez-Moreno, F.J.; Jódar, J.; Marín-Lechado, C.; Medialdea, A.; Galindo-Zaldívar, A.; Pedrera, A.; Durán, J.J. (2019). *Journal of Hydrology,* 578, 124047.

Deposición de polvo sahariano en España: observaciones de la red DONAIRE-POSAHPI entre 2016 y 2023.

Saharan Dust Deposition in Spain: Observations from the DONAIRE-POSAHPI Network between 2016 and 2023.

J. Pey[1], B. Valero-Garces[1], I. de la Parra[1], D. Elustondo[2], N. Pérez[3], S. Castillo[4], J. Causapé[5], J.C. Larrasoaña[5,6], M.P. Mata Campo[7]

1. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC 50059 Zaragoza. jorge.pey@ipe.csic.es, blas@ipe.csic.es, inesdelaparra@ipe.csic.es
2. Universidad de Navarra, Instituto de Biodiversidad y Medio Ambiente (BIOMA) 31080 Pamplona. delusto@unav.es
3. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, CSIC 08034 Barcelona. noemi.perez@idaea.csic.es
4. Andalusian Institute for Earth System Research (IISTA-CEAMA), Granada. scastillo@ugr.es
5. CN Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, 50059 Zaragoza. jcausape@igme.es, jc.larra@igme.es
6. Dpto. Ciencias & INAMAT, Universidad Pública de Navarra 31006 Pamplona, Navarra.
7. CN Instituto Geológico y Minero de España, CSIC 28760 Tres Cantos, Madrid. p.mata@igme.es

Palabras clave: deposición atmosférica, polvo sahariano, cambio global, aerosoles, materia mineral

Resumen

En este trabajo investigamos la cantidad de polvo sahariano que se deposita en España en una red de observación compuesta por >20 puntos de medida, iniciada en 2016 gracias al proyecto DONAIRE, y que ha continuado posteriormente con nuevos puntos de monitorización con la ayuda de los proyectos POSAHPI y POSAHPI-2. La red cubre preferentemente la mitad oriental peninsular y las islas Baleares, y se expandirá en 2024 a zonas del oeste peninsular y Canarias. Nuestros resultados, que en varios observatorios son series continuas durante todo el periodo 2016-2023, muestran dos áreas preferenciales en la deposición de polvo sahariano: el sureste peninsular y la zona del Pirineo Central. Se registran casi anualmente episodios intensos de deposición en muchas zonas (>10 g/m^2), ocurriendo estos episodios intensos durante la estación fría. Nuestros análisis muestran diferencias sutiles en la composición del polvo sahariano, que nos permiten discriminar dos zonas preferenciales de origen del polvo sahariano que impacta en la red: una en la zona noroccidental del continente africano (Sáhara occidental y Marruecos), y la segunda en el corredor Sáhara-Sahel (sur de Argelia, Mali, Níger).

Abstract

In this study, we investigate the amount of Saharan dust deposition in Spain using an observation network composed of >20 monitoring sites. The network was initiated in 2016 through the DONAIRE project and has subsequently expanded with new monitoring sites with the support of the POSAHPI and POSAHPI-2 projects. The network primarily covers the eastern half of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands, and it will be expanded in 2024 to include areas in the western peninsula and the Canary Islands. Our results, which include uninterrupted observations at several stations from 2016 to 2023, reveal two preferential areas for Saharan dust deposition: the southeastern Iberian Peninsula and the Central Pyrenees region. Intense dust deposition episodes, often exceeding 10 g/m2, are recorded almost annually, particularly during the cold season. Our analyses show subtle differences in the composition of Saharan dust, allowing us to discriminate between two preferential source areas for the dust reaching the Iberian Peninsula: one in the northwestern region of the African continent (Western Sahara and Morocco) and the second in the Sahara-Sahel corridor (southern Algeria, Mali, Niger).

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por los proyectos de investigación POSAHPI y POSAHPI-2 (Agencia Estatal de Investigación, PID2019-108101RB-I00 y PID2022-143146OB-I00)

Estructuras de adaptación al cambio climático: variabilidad espacial

Climate-adaptation structures: location-controlled variability

J.I. Santisteban[1], R. Mediavilla[2], S. Martos-Rosillo[2], A. González-Ramón[2], A. Celis[3]

1 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Fac. CC. Geológicas, UCM, Madrid. j.i.santisteban@geo.ucm..es
2 Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. r.mediavillla@igme.es; s.martos@igme.es; antonio.gonzalez@igme.es
3 Departamento de Filosofía y Lógica y Filosofía de la Ciencia, Fac. Filosofía, Universidad de Sevilla. pozuelo@us.es

Palabras clave: Adaptación, clima, antrópico, Holoceno, Península Ibérica, variabilidad espacial.

Resumen

La instauración del clima mediterráneo árido en la Península Ibérica durante el Holoceno ha dado lugar al desarrollo de diferentes estrategias humanas de adaptación al cambio climático, más concretamente a los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos. Estos cambios pueden estar ligados al ciclo anual (estiaje) o a oscilaciones de mayor periodo. Sin embargo, ante los mismos cambios las respuestas adaptativas han sido diferentes en función del asentamiento de las comunidades. Así, la escasez de agua durante el periodo de estiaje en zonas llanas ha sido tradicionalmente solventado, durante periodos no muy áridos en la llanura manchega, mediante el suministro por pozos, cuyo origen puede alcanzar la Edad del Bronce (Santisteban *et al*., 2016) o norias (extracción de aguas superficiales) que se expandieron durante la ocupación árabe. En esas zonas, durante los periodos de mayor aridez, la depresión de los acuíferos dificultó su utilización y así, durante el periodo Romano o la Pequeña Edad de Hielo, se recurrió al uso de sistemas de presas que retuvieran las escasas aguas superficiales. Sin embargo, en zonas de montaña estas estrategias no eran posibles, debido al relieve, y se desarrollaron sistemas de recarga de los acuíferos tales como las acequias de careo de Las Alpujarras combinadas con la captación de manantiales y galerías de drenaje, que se remontan a la Alta Edad Media (Martos *et al*., 2019). Con todo, las diferentes estrategias de adaptación al clima no solo muestran diferencias ligadas al contexto climático sino también a la morfología del entorno.

Abstract

The onset of the Mediterranean dry climate during the Holocene in the Iberian Peninsula caused the development of different adaptation strategies to climate change and, more precisely, to changes in water availability. These oscillations could be related to annual changes (seasonality) or to longer period ones. However, human response to these variations could not be the same depending to the location of the communities. Thus, in plains, water shortage, during not too arid periods, was solved through wells which can be traced back to the Bronze age (Santisteban et al., 2016) or waterwheels (shallow water abstraction) dating back to Arab times. In these plains, during arid phases, the falling groundwater levels prevented the use of shallow underground waters. So, during the Iberian-Roman period and the Little Ice Age, dams were built to retain the scarce surficial waters. However, these strategies were impossible in mountain areas due to the slopes. The communities made groundwater delayed recharge systems using the meltwaters, like the "acequias de careo" (Martos et al., 2019) dating back the Middle Ages and still working. Thus, the different adaptation strategies to climate change not only depend on climate differences but also in the morphological setting.

Agradecimientos

Actividad realizada en el marco de los proyectos CGL2011-30302-C02-01 y PID2022-140092OB-I00

Referencias

Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J.M., Martínez-Moreno, F.J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, A., Pedrera, A. y Durán, J.J. (2019). *Journal of Hydrology* 578, 124047.

Santisteban, J.I., Mediavilla, R., Celis, A., Castaño, S. y de la Losa, A. (2016). *Quaternary International*, 407 Part A, 96-109.

Variabilidad de la composición isotópica ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$) de la materia orgánica en lagos de altura en el Pirineo durante el último milenio.

The $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ signatures of organic matter in high altitude Pyrenean lakes during the last millennium.

B. Valero Garcés[1], M. Galofré[2], M.P. Mata-Campo[3] y A.V. de Vera-García [1]

1 Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), 50059, Zaragoza. blas@ipe.csic.es, a.vicentevera@csic.es
2. Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, (IACT - CSIC), Armilla, 18100, Granada. marcel.galofre@csic.es
3. CN Instituto Geológico y Minero de España, Tres Cantos, 28760, Madrid. p.mata@csic.es

Palabras clave: lagos, Pirineos, ciclo carbono, ciclo nitrógeno, Antropoceno

Resumen

Un estudio isotópico ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$) de la materia orgánica total de sondeos sedimentarios y muestras de cuencas hidrográficas de seis lagos pirenaicos de altura muestra una variabilidad pequeña durante el último milenio, pero una clara tendencia decreciente a partir de mediados del siglo XIX que se, intensifica a partir de mediados del siglo XX y alcanza los valores más negativos durante las últimas décadas. El marcado descenso reciente en $\delta^{13}C$ es sincrónico con un aumento de la bioproductividad que ha provocado a un gran incremento del flujo de carbono orgánico durante la Gran Aceleración (GA, post 1950). Los lagos en cuencas carbonatadas muestran un patrón diferente durante la GA que apunta a fuentes adicionales de Carbono Inorgánico Disuelto. El registro $\delta^{15}N$ muestra una gran variabilidad probablemente controlada por parámetros limnológicos específicos de cada lago, pero los valores menores de $\delta^{15}N$ durante las últimas décadas sugieren un aumento de la deposición atmosférica de nitrógeno reactivo debido a las actividades humanas en los valles. El cambio climático parece ser el principal responsable del aumento de los flujos de acumulación de carbono orgánico durante el último milenio. Sin embargo, las tendencias recientes también podrían haberse visto favorecidas por una mayor productividad inducida por mayores flujos de nutrientes de origen antrópico que han aumentado incluso en estas áreas localizadas a gran altitud.

Abstract

A survey of isotope signatures ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) of total organic matter of sediment cores and watershed samples from six high altitude Pyrenean lakes showed a relatively small variability during the last millennium and a conspicuous decreasing trend starting mid 19th century, intensifying since the mid 20th century, and reaching the most negative values during the last decades. The recent lower $\delta^{13}C_{OM}$ changes parallels lower C/N values and bioproductivity increases that have led to the largest increase in organic carbon accumulation during the Great Acceleration (GA, post-1950). The lakes in dominant carbonate watersheds showed a different pattern which points to additional sources of Dissolved Inorganic Carbon during the Great Acceleration. The $\delta^{15}N$ record show a large variability likely controlled by site-specific limnological parameters, but the lower $\delta^{15}N$ during the recent decades could indicate an increase in atmospheric deposition of reactive nitrogen due to human activities in the valleys. Climate change seems to be the main responsible of increasing carbon deposition fluxes during the last millennium. However, recent trends in carbon accumulation could also have been favored by higher productivity due to an increase in fluxes from anthropically - derived nutrients even in these high altitude settings.

U-Pb dating of garnet (LA-ICP-MS) reveals the oldest tectonothermal event in the Iberian Massif

La datación U-Pb de granate (LA-ICP-MS) revela el evento tectonotermal más antiguo del Macizo Ibérico

R. Arenas[1], R. Albert[2], A. Gerdes[2], I. Novo-Fernández[3], E. Rojo-Pérez[1], S. Sánchez Martínez[1], A. Garcia-Casco[3], D. Moreno-Martín[1], R., Díez Fernández[4]

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología and Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. rarenas@ucm.es; e.rojo@ucm.es; s.sanchez@geo.ucm.es; diamor03@ucm.es
2 Frankfurt Isotope and Element Research Center, Goethe University Frankfurt, 60438 Frankfurt, Germany. richardalbert@fierce.uni-frankfur; gerdes@fierce.uni-frankfurt.de
3 Dpto. de Mineralogía y Petrología and Inst. And. Ciencias Tierra (UGR, CSIC), Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. inovo@ugr.es; agcasco@ugr.es
4 Dpto. de Geología y Subsuelo, CN-IGME-CSIC, Unidad Territorial de Salamanca, 37001 Salamanca, Spain. r.diez@igme.es

Abstract: The oldest basement exposed in the Iberian Massif has Pan-African origin and in Europe is designed as Cadomian basement or Cadomian orogeny. This basement crops out in the Mérida Massif with an excellent representation and little subsequent reworking. Two units in this massif, lower and upper, were generated in a peri-Gondwanan volcanic arc, while an intermediate mafic–ultramafic unit is interpreted as an ophiolite, the Mérida Ophiolite. The mafic protoliths of this ophiolite were generated at c. 594 Ma in a back-arc basin. During their accretion under the volcanic arc, the gabbroic rocks were metamorphosed to the limit of the amphibolite facies, with limited migmatization and development of amphibolites very rich in garnets up to 1 cm in diameter. One of these garnets has provided a consistent U-Pb age of c. 590 Ma (LA-ICP-MS), which has allowed to identify the oldest tectonothermal event dated to date in the Iberian Massif. This age and its relationship with the chronology of protoliths in the Mérida Massif, allows a better understanding of the dynamic context during the formation of the Cadomian orogeny.

Key words: *Cadomian basement, Mérida Ophiolite, U-Pb dating of garnet.*

Resumen: *El basamento más antiguo expuesto en el Macizo Ibérico es de origen Pan-Africano y en Europa es denominado basamento Cadomiense u orogenia Cadomiense. Este basamento aflora en el Macizo de Mérida con una excelente representación y escasa modificación posterior. Dos unidades de este macizo, inferior y superior, fueron generadas en un arco volcánico peri-Gondwánico, mientras que una unidad intermedia máfica–ultramáfica se interpreta como una ofiolita, la Ofiolita de Mérida. Los protolitos máficos de esta ofiolita se generaron a c. 594 Ma en una cuenca de back-arc. Durante su acreción bajo el arco volcánico, las rocas gabroicas fueron metamorfizadas hasta condiciones propias del límite de la facies de las anfibolitas, con migmatización incipiente y desarrollo de tipos muy ricos en granates de hasta 1 cm de diámetro. Uno de estos granates ha proporcionado una edad U-Pb consistente de c. 590 Ma (LA-ICP-MS), lo que ha permitido identificar el episodio tectonotermal más antiguo datado hasta la actualidad en el Macizo Ibérico. Esta edad y su relación con las edades de los protolitos del Macizo de Mérida, permiten comprender mejor el contexto dinámico que acompañó la formación de la orogenia Cadomiense.*

Palabras Clave: *Basamento Cadomiense, Ofiolita de Mérida, datación U-Pb de granate.*

INTRODUCTION

In the SW of the Iberian Massif, the Ossa-Morena Complex is characterized by a polyorogenic evolution. It began during the Ediacaran and has recorded several tectonothermal events before the starting of the Variscan Orogen, which generated the current structure and terrane distribution of the Iberian Massif. The oldest tectonothermal activity has Pan-African age and it is described in Europe as the Cadomian orogeny. The nature of the Cadomian events has been widely discussed, aiming at understanding both their characteristics and their causes. The Mérida Massif represents one of the SW Iberia regions where the Cadomian events show most significant development and less Variscan reworking. It has been investigated in some detail in two initial PhD theses (Gonzalo, 1987; Bandrés, 2001). The information presented in this work is mainly based on recent contributions on the Mérida Massif by Díez Fernández et al. (2022), Rojo-Pérez et al. (2022) and Arenas et al. (2024).

THE MÉRIDA MASSIF

This massif includes several Cadomian units that crop out beneath Early Cambrian series (Carija Unit; Fig. 1). From top to bottom, the following units can be distinguished: Upper Unit of schists and metagranitoids, Intermediate Unit of mafic – ultramafic rocks and Lower Unit of gneisses. The Upper Unit consists of a thick siliciclastic series intruded by a variety of granites, monzogranites, tonalites and some gabbros and diorites, which show low-grade metamorphism. The metasedimentary series can be correlated with the Montemolín Formation of the Serie Negra Group, based on the abundance of metabasites in the lower levels. The age of this series is unknown, but the age of the intrusive granitic sequence (c. 540-602 Ma; U-Pb in zircons; Rojo-Pérez et al., 2022) establishes a minimum age. The whole complex is considered a section of a peri-Gondwanan volcanic arc of Ediacaran age (Rojo-Pérez et al., 2022). The Lower Unit, where observed, is made up of felsic orthogneisses that show high-grade metamorphism with limited migmatization. The age of these gneisses is not known in detail, but preliminary unpublished data (U-Pb in zircons) indicate and age similar to that of the oldest granitoids in the Upper Unit.

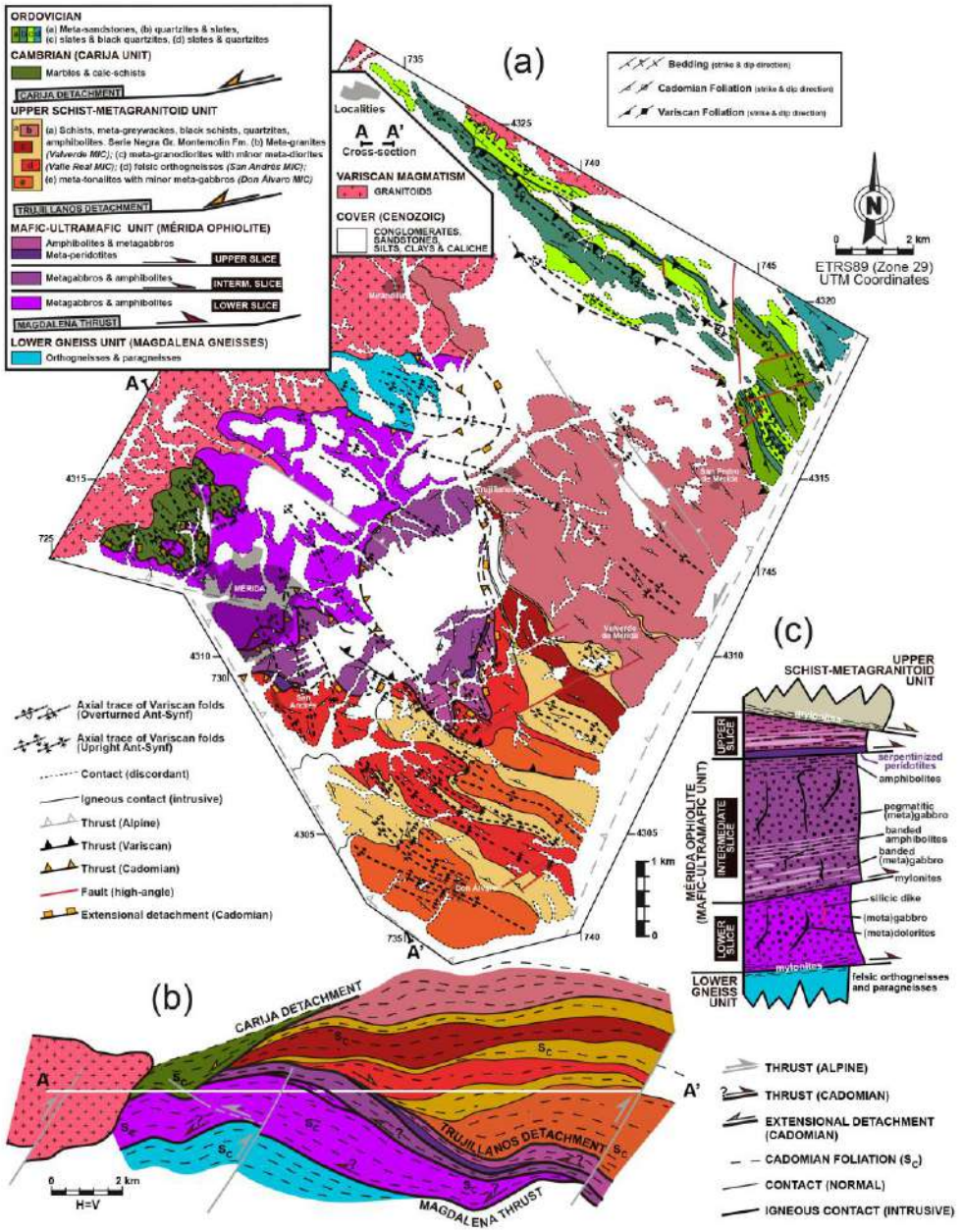


FIGURE 1. *a) Geological map of the Mérida Massif. b) Cross-section of the Mérida Massif. c) Representative column of the Mérida Ophiolite. Modified after Díez Fernández et al. (2022).*

THE MÉRIDA OPHIOLITE

The Intermediate Unit of mafic – ultramafic rocks crops out in large areas within the massif. It mostly consists of metagabbros, metadolerites and amphibolites with some hornblendites and thin layers of serpentinites. The unit was initially described as a mafic pluton intruding the Serie Negra (Bandrés, 2001). However, its mafic-ultramafic composition, the lack of metasedimentary rocks and also the virtual lack of granitoids, the generalized presence of a regional foliation and the tectonic nature of the contacts with the top and bottom units (Fig. 1), has allowed to describe this unit as a Cadomian ophiolite (Díez Fernández et al., 2022; Arenas et al., 2024). Although the outcrop exposures are limited, at least three main slices have been distinguished in the ophiolite that repeat mafic-ultramafic sequences (Fig. 1). The conditions of regional metamorphism are typical of the amphibolite facies, but in some sections, at the contact area between the lower and intermediate slices, deformation and metamorphism increase. These areas of probable inverted metamorphism, beneath mantle sections already removed, are characterized by thick bands of amphibolites with large garnets and limited evidence of partial melting. The characteristics of metamorphism in the ophiolite are therefore compatible with those observed in the Lower Unit, defining throughout the Mérida Massif a polarity of regional metamorphism increasing towards the bottom, although local thermal effects appear inside the ophiolite. The protoliths of the metagabbros from the Mérida Ophiolite have recently been dated to c. 594 Ma (U-Pb in zircons; Arenas et al., 2024) and according to their geochemical characteristics they represent magmas generated in supra-subduction zones, probably in a back-arc basin. The ophiolite is intruded by scarce m sized bodies of granitoids that appear highly sheared, which have been dated to c. 566 Ma (U-Pb in zircons; Arenas et al., 2024).

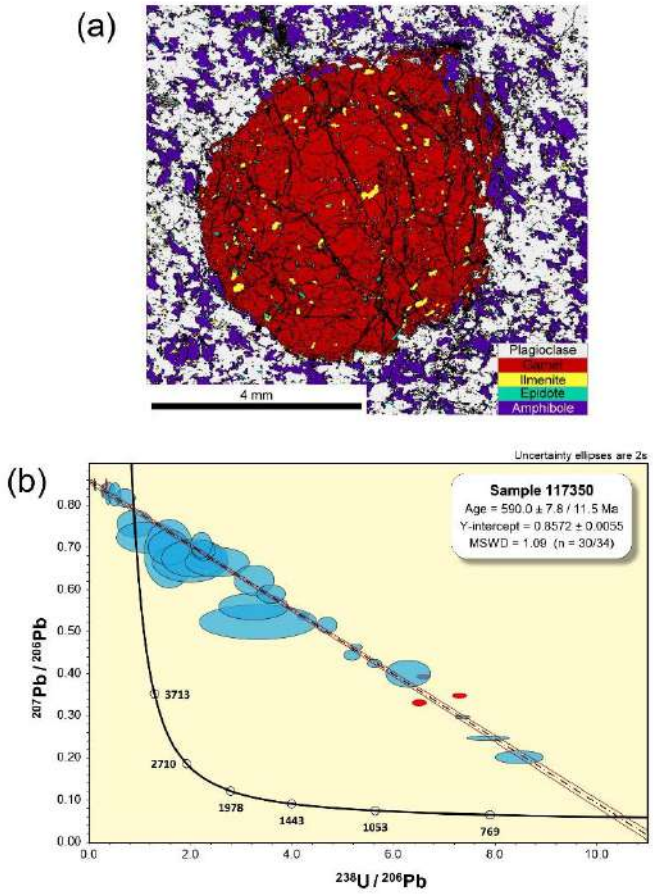


FIGURE 2. *(a) X-ray phase map showing the textural distribution of mineral phases in garnet amphibolite sample 117350 from the Mérida ophiolite. (b) U–Pb Tera–Wasserburg plot for garnet from sample 117350. Modified after Arenas et al. (2024).*

AGE OF METAMORPHISM IN THE MÉRIDA OPHIOLITE

According to the characteristics of metamorphism in the ophiolite, the unit is polymetamorphic in nature and the observed regional fabrics are composite. Amphibolites with thick garnets are the most significant lithologies to investigate the conditions and age of the main metamorphic events. They are porphyroblastic rocks in which abundant and thick syn-kinematic to tardi-

kinematic garnets stands out, reaching up to 1 cm in diameter. They grow on a nematoblastic matrix made up of hornblende, plagioclase, quartz, clinozoisite and ilmenite, which is only slightly retrogressed. A pseudosection calculated for one of the most characteristic garnet-bearing amphibolites allows constraining metamorphic peak conditions at 700 °C and 8 kbar. The age of metamorphism, on the other hand, has been obtained by means U-Pb geochronology of the largest garnets (LA-ICP-MS). The U-Pb data define a discordia line with low deviation on a Tera Wasserburg diagram, with a lower intercept at c. 590 Ma (Fig. 2; Arenas et al., 2024). This is considered the crystallization age of garnet in the amphibolites, developed in turn during the deep accretion of the ophiolitic slices under the Upper Unit, considered a peri-Gondwanan Ediacaran volcanic arc.

DISCUSSION

The U-Pb age obtained in a garnet from the amphibolites of the Mérida Ophiolite, reveals the oldest tectonothermal event recorded to date in the Iberian Massif. Other isotopic ages of Cadomian tectonothermal events have been previously reported in the Ossa-Morena Complex (Blatrix and Burg, 1981; Dallmeyer and Quesada, 1992; Bandrés, 2001; Arenas et al., 2018), although all of them are younger than the event dated in the Mérida Ophiolite. This age may be related to the closure of the back-arc basin where the ophiolite protoliths formed. The high shearing affecting the scarce granitoids that intruded the ophiolite after this event (c. 566 Ma) indicates that the Cadomian evolution of the Mérida Massif is polymetamorphic and occurred during a complex evolution of the NW African peri-Gondwanan margin (Arenas *et al*., 2024, in press). On the other hand, the recent possibility of obtaining precise garnet ages through U-Pb geochronology and microanalysis with LA-ICP-MS, places the research on the tectonothermal evolution of orogens in a new era. Garnet, perhaps the most representative metamorphic mineral, is amenable for accurately approximating the chronology of episodes of maximum thickening/shortening/collision. Isotopic geochronology methods commonly used in metamorphic systems often fail in this objective, either because of their low blocking temperatures (e.g., Ar-Ar in micas and amphibole) or because they frequently grow during post peak pressure partial melting during decompression (zircon). In relation to the Cadomian basement of the Iberian Peninsula, it is a challenge to obtain precise ages of the different reported tectonothermal events, which occurred within a very wide temporal range (c. 600-540 Ma).

ACKNOWLEDGMENTS

Financial support has been provided by the Spanish projects PID2020-112489-GB-C21 and PID2020-112489-GBC22, funded by MCIN/AEI. Richard Albert and Axel Gerdes acknowledge the financial support to FIERCE (Frankfurt Isotope & Element Research Center) by the Wilhelm and Else Heraeus Foundation and the Deutsche Forschungsgemeinschaft.

REFERENCES

Arenas, R., Fernández-Suárez, J., Montero, P., Díez Fernández, R., Andonaegui, P., Sánchez Martínez, S., Albert, R., Fuenlabrada, J.M., Matas, J., Martín Parra, L.M., Rubio Pascual, F.J., Jiménez-Díaz, A., Pereira, M.F. (2018): The Calzadilla Ophiolite (SW Iberia) and the Ediacaran fore-arc evolution of the African margin of Gondwana. *Gondwana Research*, 58: 71–86.

Arenas, R., Rojo-Pérez, E., Díez Fernández, R., Albert, R., Novo-Fernández, I., Sánchez Martínez, S., Fuenlabrada, J.M., Andonaegui, P., Moreno-Martín, D., Gerdes, A., Garcia-Casco. A. (2024): Opening and closure of Cadomian peri-Gondwanan oceans: age and evolution of the Mérida Ophiolite (SW Iberia). *International Geology Review*, 66: 278–309.

Arenas, R., Vérard, C., Albert, R., Rojo-Pérez, E., Sánchez Martínez, S., Novo-Fernández, I., Moreno-Martín, D., Gerdes, A., García-Casco, A., Díez Fernández, R. (in press): Cadomia origins: paired Ediacaran ophiolites from the Iberian Massif, the opening and closure record of peri-Gondwanan basins. In: Supercontinents, Orogenesis and Magmatism (R.D. Nance, R.A. Strachan, C. Quesada and S. Lin, eds.). Geological Society, London, Special Publications, 542.

Bandrés, A. (2001). Evolución geodinámica poliorogénica de los dominios septentrionales de la ZOM. PhD Thesis, Univ. del País Vasco, 377 p.

Blatrix, P., Burg, J.P. (1981): 40Ar/39Ar dates from Sierra Morena (Southern Spain): Variscan metamorphism and Cadomian orogeny. Neues Jahrbuch Mineralogie Monatshefte, 10, 470–478.

Dallmeyer, R.D. and Quesada, C. (1992): Cadomian vs. Variscan evolution of the Ossa-Morena zone (SW Iberia): field and $^{40}Ar/^{39}Ar$ mineral age constraints. *Tectonophysics*, 216: 339–364.

Díez Fernández, R., Arenas, R., Rojo-Pérez, E., Sánchez Martínez, S., Fuenlabrada, J.M. (2022): Tectonostratigraphy of the Mérida Massif reveals a new Cadomian suture zone exposure in Gondwana (SW Iberia). *International Geology Review*, 64: 405–424.

Gonzalo, J.C. (1987): Petrología y estructura del Basamento en el área de Mérida (Extremadura Central). PhD. Thesis, Univ. de Salamanca, 327 p.

Rojo-Pérez, E., Linnemann, U., Hofmann, M., Fuenlabrada, J.M., Zieger, J., Fernández-Suárez, J., Andonaegui, P., Sánchez Martínez, S., Díez Fernández, R., Arenas, R. (2022): U-Pb geochronology and isotopic geochemistry of adakites and related magmas in the well-preserved Ediacaran arc section of the SW Iberian Massif: the role of subduction erosion cycles in peri-Gondwanan arcs. *Gondwana Research*, 109: 89–112.

El papel de las fallas tardías en la exhumación de rocas de alta presión Variscas (SO del Macizo Ibérico)

The role of late faulting during the exhumation of Variscan high-pressure rocks (SW Iberian Massif)

R. Díez Fernández[1], I. Novo-Fernández[2], D. Moreno-Martín[3], R. Arenas[3], E. Rojo-Pérez[3], L. M. Martín Parra[4], J. Matas[4]

1 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Salamanca, España. r.diez@igme.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada 18071 Granada, España. inovo@ugr.es
3 Dpto. de Mineralogía y Petrología e Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. diamor03@ucm.es, rarenas@ucm.es, e.rojo@ucm.es
4 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Tres Cantos, España. luismimparra@gmail.com, j.matas@telefonica.net

Palabras clave: Zona de sutura, subducción, exhumación, cabalgamientos, Orógeno Varisco.

Resumen

La exhumación de rocas subducidas (metamorfismo de alta-P) requiere un proceso largo, que puede incluir varias fases de deformación. En su retorno a superficie, las fallas y pliegues tardíos suelen modificar el apilamiento tectónico previo de estas rocas, pudiendo llevar a conclusiones falsas sobre la polaridad de subducción y reconstrucciones de placas. Se presenta un ejemplo de la parte oriental de la Unidad Central (Complejo Ossa-Morena, Macizo Ibérico) basado en la elaboración de cartografía geológica y análisis estructural. La Unidad Central consta de rocas de alta-P devónicas subducidas durante la Orogenia Varisca, y se considera que representan la exposición de una zona de sutura. La exhumación inicial de las rocas de alta-P se logró mediante la combinación de cabalgamientos y adelgazamiento de la placa superior, que también incluía láminas acrecionadas. Mientras la convergencia varisca proseguía, las rocas de alta-P fueron incorporadas a escamas de un sistema de cabalgamientos fuera-de-secuencia dirigidos hacia el interior de Gondwana. Durante el Carbonífero inferior, la erosión, extensión y desarrollo de una cuenca sin-orogénica fueron seguidos de una etapa de convergencia, que resultó en pliegues y fallas tardíos formados bajo transpresión senestra durante el Carbonífero superior. Las fallas tardías (fuera-de-secuencia y posteriores) duplicaron la zona de sutura del Devónico varias veces, lo que resultó en una sucesión de afloramientos espaciados de la misma sutura. La forma en que las fallas tardías influyeron en la sutura devónica dio como resultado un conjunto de repeticiones litológicas que podría malinterpretarse como un agregado de varias zonas de sutura independientes.

Abstract

The exhumation of subducted rocks (bearing high-P metamorphism) may need a lengthy process, involving several stages of deformation. Late faults and folds may modify the primary tectonic stacking throughout the journey of these rocks back to surface. Deformation by these late structures could lead to false conclusions about subduction polarity and plate reconstructions. A case example is provided after performing geological mapping and structural analysis in the eastern part of the Central Unit (Eastern Ossa-Morena Complex, Iberian Massif). The Central Unit consists of Devonian high-P rocks subducted during the Variscan Orogeny, and are considered to represent the exposure of a suture zone in the core of the Variscan Orogen. Exhumation of the high-P rocks was achieved by successive underthrusting of the continental crust combined with thinning of the accreted crust on top of it after subduction. Upon further convergence, the high-P rocks were then incorporated into tectonic slices of out-of-sequence thrusts directed towards Gondwana. During the Early Carboniferous, subsequent extension favoured erosion and basin inception, while later convergence resulted in late folding and faulting during Late Carboniferous sinistral transpression. Late faults (out-of-sequence and later ones) duplicated the Devonian suture zone many times, resulting in a succession of closely spaced exposures of the same suture. The manner in which late faults influenced the Devonian suture resulted in an outcome that could be misinterpreted for a collection of several suture zones.

Nd model ages of Iberian Cadomian sediments: a discriminator between two sedimentary basins in peri-Gondwana

Edades modelo de Nd en sedimentos Cadomienses de Iberia: un factor de discriminación entre dos cuencas sedimentarias perigonwánicas

J.M. Fuenlabrada[1], R. Arenas[2], M.F. Pereira[3], E. Rojo-Pérez[2], S. Sánchez Martínez[2], R. Díez Fernández[4]

1 Unidad de Geocronología (CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. jmfuenla@ucm.es
2 Departamento de Mineralogía y Petrología e Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. rarenas@ucm.es (R. Arenas); e.rojo@ucm.es (E. Rojo Pérez); s.sanchez@geo.ucm.es (S. Sánchez Martínez).
3 Departamento de Geociências, Instituto de Ciências da Terra, ECT, Universidade de Évora, Apt. 94, 7002-554 Évora, Portugal. mpereira@uevora.pt
4 Dpto. de Geología y Subsuelo, CN-IGME-CSIC, Unidad Territorial de Salamanca, 37001 Salamanca, Spain. r.diez@igme.es

Abstract: Cadomian sedimentary basins in the northern margin of Gondwana from Ediacaran to Lower Cambrian time correspond to autochthonous and allochthonous (far-travelled) terranes of the Variscan Orogen in the Iberian Massif. A comprehensive compilation of Nd model ages (T_{DM}) of siliciclastic series in these terranes agrees with a variability in the source areas located in the North Gondwana margin from Ediacaran to Early Paleozoic. Older T_{DM} (1.4-2.4 Ga) recorded in Iberian allochthonous sedimentary series indicate sedimentation in a western basin, closer locations to the West African Craton. In turn, younger T_{DM} ages (1.2-2.1 Ga) registered in Iberian autochthonous sedimentary series are consistent with source areas located further east. Their sedimentation occurred in an eastern basin, close to the Trans-Saharan Orogen, Sahara Metacraton and the Tuareg and Arabian-Nubian Shield. The discrimination of two sedimentary basins and the correlation with allochthonous and autochthonous Iberian terranes provides with an additional discrimination factor to classify further Variscan Iberian and European terranes.

Key words: peri-Gondwanan basins, Nd isotopic geochemistry, Cadomian orogeny, Variscan terranes, Iberian Massif.

Resumen: *Las cuencas sedimentarias cadomienses del margen norte de Gondwana corresponden a los terrenos autóctonos y alóctonos del Orógeno Varisco en el Macizo Ibérico. Una completa recopilación de edades modelo de Nd (T_{DM}) en series siliciclásticas en estos terrenos concuerda con una variabilidad en las áreas fuente localizadas en el margen norte de Gondwana desde el Ediacárico hasta el Paleozoico Inferior. Valores de T_{DM} más antiguos (1.4-2.4 Ga) registrados en las series sedimentarias alóctonas ibéricas indican una sedimentación en una cuenca occidental, localizada en la proximidad del Cratón del Oeste de África. Por su parte, las edades T_{DM} más jóvenes (1.2-2.1 Ga) registradas en las series sedimentarias autóctonas de Iberia son coherentes con áreas fuente situadas más al este. Su sedimentación tuvo lugar en una cuenca oriental, próxima al Orógeno Transahariano, al Metacratón del Sáhara y al Escudo Tuareg y Arábigo-Nubio. La discriminación de ambas cuencas sedimentarias y su correlación con los terrenos alóctonos y autóctonos en Iberia proporciona un factor de discriminación adicional para su clasificación y su utilización en nuevos estudios de terrenos Variscos de Iberia y de Europa Occidental.*

Palabras clave: *Cuencas perigondwánicas, geoquímica isotópica de Nd, Orogenia Cadomiense, terrenos variscos, Macizo Ibérico.*

INTRODUCTION

Ediacaran and Lower Cambrian siliciclastic sequences are widespread distributed throughout the Iberian Massif (Fig. 1). These sequences represent a valuable record of the Cadomian Orogeny and the influence of the development and evolution of a volcanic arc (construction-dismantling processes) along the N Gondwanan margin (Rojo-Pérez et al., in press; and references therein). The geochemical and isotopic study of these Iberian sedimentary sequences has resulted in new advances in the discrimination of the provenance and the geodynamic scenario where the deposition occurred (Fuenlabrada et al., 2020).

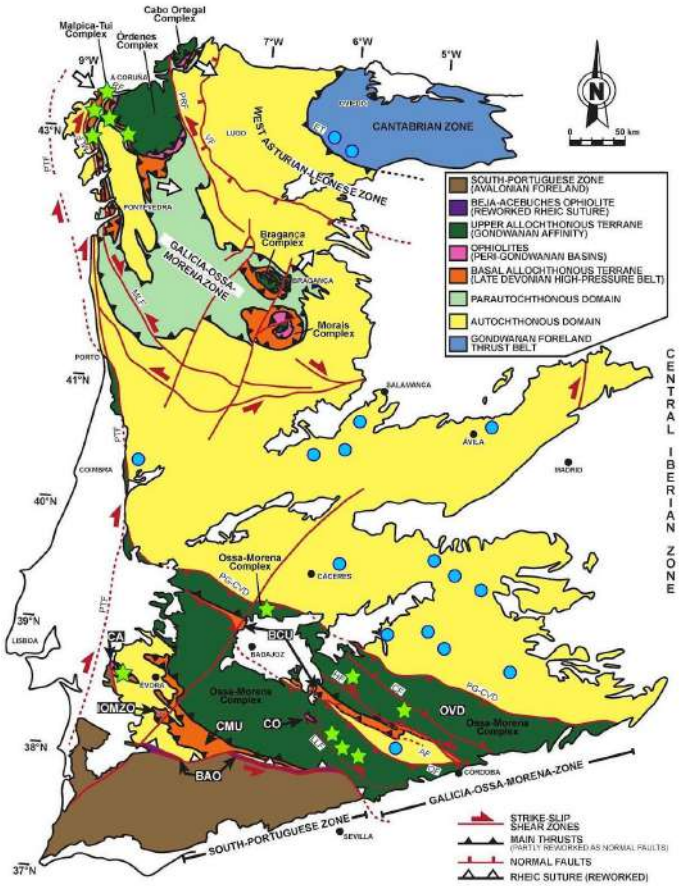


FIGURE 1. *Map of the Iberian Massif showing the sampling areas for Iberian allochthonous terranes (green stars), and relative autochthonous metasedimentary sequences (blue circles) from Fuenlabrada et al. (2023).*

Identify the relative location of the Iberian sedimentary basins along the margin of Gondwana during Cadomian times contributes to a better understanding of the current disposition of Variscan autochthonous and allochthonous terranes in the NW and SW of the Iberian Massif (e.g., Arenas et al., 2016; Díez Fernández et al., 2016). In particular, Nd model ages (T_{DM}) offer an excellent resource for establishing potential source areas for detrital sedimentary inputs to the Iberian peri-Gondwanan basins. During Ediacaran-Lower Cambrian times these basins received detrital materials from the erosion of cratonic areas (West Africa Craton, WAC, and Sahara Metacraton, SMC) and shields of the N African continent (Tuareg shield, TS, and Arabian-Nubian shield, ANS) (Fuenlabrada et al., 2020). The continuous contribution of siliciclastic materials from these areas and the combination of them have resulted in a particular record of T_{DM} model ages, which allows the positioning of the Iberian terranes along the margin of the North African continent. A comprehensive study of the T_{DM} ages recorded in Ediacaran-Lower Cambrian siliciclastic sequences of the Iberian Massif (Fig. 1) (Fuenlabrada et al., 2023) enables a discrimination between two contiguous sedimentary basins, as those recently proposed for Cambrian to Devonian sedimentary rocks from Variscan-Appalachian terranes of North America and Europe (Stephan et al., 2019).

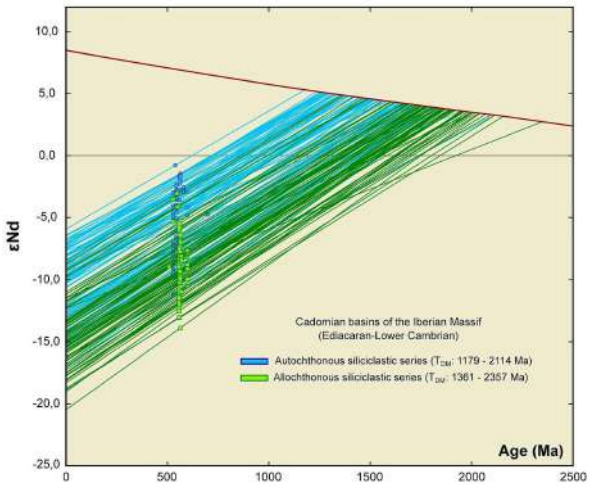


FIGURE 2. *T_{DM} model ages diagram of Ediacaran-Early Cambrian Iberian autochthonous (blue) and allochthonous (green) siliciclastic series (Fuenlabrada et al., 2023).*

Nd MODEL AGES OF THE EDIACARAN - LOWER CAMBRIAN SILICICLASTIC SEQUENCES OF THE IBERIAN MASSIF

A recent compilation of Nd model ages from Ediacaran-Lower Cambrian siliciclastic sequences

from siliciclastic rocks of autochthonous and allochthonous Iberian terranes allows to distinguish between two main age groups (Fig. 2). While autochthonous siliciclastic series yield T_{DM} ages ranging from 2114 to 1179 Ma (Early-Middle Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic), allochthonous siliciclastic series Nd model ages vary between 2357 and 1361 Ma (Late Paleoproterozoic to Middle Mesoproterozoic) (Fuenlabrada et al., 2023; and references therein). Despite the obvious overlap, two trends are clearly observed in the Nd model ages, indicating a differentiated provenance of the detrital material. Iberian autochthonous sedimentary series show two maximum peaks at 1.5 and 1.8 Ga, with ages as young as 1.2 and 1.3 Ga, and no older ages than 1.9 Ga. Moreover, allochthonous sedimentary series of the Iberian Massif display a main peak at 1.9 Ga, with older T_{DM} ages that range between 2.0 and 2.4 Ga (Fig. 3) and the absence of ages younger than 1.4 Ga. This distinction is also apparent when considering $\varepsilon Nd_{(t)}$ values. Autochthonous siliciclastic series present an average value of -5.2 (from -11.3 to -0.8), while allochthonous siliciclastic series exhibit more negative values, with an average value of -8.8 (from -13.9 to -3.0) (Fig. 2) (Fuenlabrada et al., 2023; and references therein).

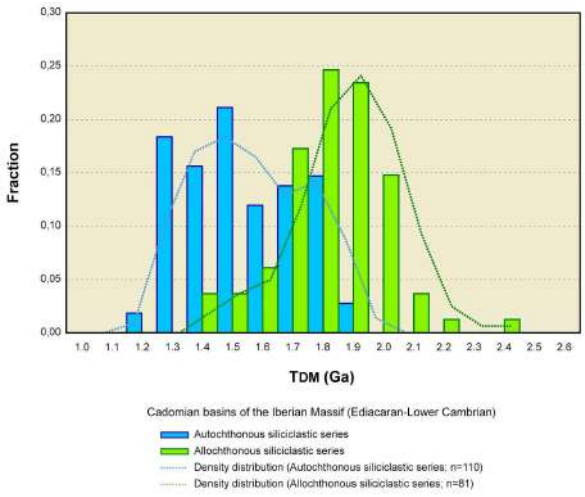


FIGURE 3. *Detailed frequency of T_{DM} values for Ediacaran and Lower Cambrian Iberian autochthonous (blue bars) and allochthonous terranes (green bars) siliciclastic series (Fuenlabrada et al., 2023).*

DISCUSSION

A comparison of the cratonic sections and shields of North African continent with the T_{DM} model ages record of sedimentary series in the Iberian Massif provides a new approach to reconstructing the paleogeography of the Iberian terranes during the Ediacaran and Lower Cambrian. Two differentiated groups of T_{DM} ages (figs. 2 and 3) support the existence of two large contiguous sedimentary basins along the margin of Gondwana, from the west (close to the WAC) to the east (close to the SMC and the ANS), and enables a correlation between them and the relative position of the allochthonous and autochthonous Iberian terranes along the Gondwanan margin since at least Ediacaran times. All Nd model ages registered in Iberian autochthonous and allochthonous terranes agree with a relatively lineal disposition of the sedimentary basins during Cadomian times. Autochthonous Iberian sedimentary series display younger T_{DM} ages than those observed in allochthonous sedimentary series, which are dominated for ages between 1.7 and 2.0 Ga (Fig. 3) and the oldest T_{DM} age on record (2.4 Ga). Older T_{DM} ages account for a closer location of the allochthonous sedimentary basins to the WAC, with a strong influence of Archean and Paleoproterozoic detrital materials with a crustal affinity. In turn, the siliciclastic rocks presented in Iberian autochthonous terranes were deposited in basins further east along the N Gondwanan margin. They were located in the proximity of the Trans-Saharan Orogen, TS, SMC, and the ANS (Fig. 4), where the basins received contributions from areas with younger (crustal Neoproterozoic rocks) and more juvenile magmatic rocks than the WAC.

The existence of these two Cadomian sedimentary basins agrees with the idea suggested by Stephan *et al.* (2019) about the presence of a contiguous bipartite shelf during Early Paleozoic. The sedimentary shelfs would be feed by two (western and eastern) large super-fan systems, separated by the Trans-Saharan Orogen. T_{DM} model ages registered in the Ediacaran-Lower Cambrian siliciclastic rocks of the Iberian Massif support this variability from Ediacaran times. Cadomian sedimentary rocks now outcropping in Iberian allochthonous terranes were deposited in a western shelf (Fig. 4), located in the proximity of the WAC that supply with old detrital materials. Sedimentary rocks preserved in autochthonous Iberian terranes were deposited in an eastern shelf (Fig. 4), with a greater contribution of detrital material with younger Nd isotopic signature. The overlap observed in the T_{DM} ages of the Iberian Ediacaran-Lower Cambrian siliciclastic series accurately reflects a combination of sources and a potential situation closer to the Trans-Saharan Orogen, which separates both peri-Gondwanan shelfs (Fig. 4).

The distinction between these two major sedimentary basins in Cadomian times and the correlation with Iberian autochthonous and allochthonous terranes provides with a new potential distinguishing factor. The study of T_{DM} model ages recorded in siliciclastic rocks presented in both tectonometamorphic Iberian terranes shows a number of determining isotopic factors in the differentiation of their relative position along the Gondwanan margin, These Nd isotopic factors can be used to classify other terranes in Iberia and Western Europe and to locate the relative position of its most probable sedimentary

basins in relation to the northern margin of Gondwana during Ediacaran and Lower Cambrian times.

ACKNOWLEDGMENTS

Financial support has been provided by the Spanish projects PID2020-112489-GB-C21 and PID2020-112489-GBC22, funded by MCIN/AEI. This work is a contribution to IGCP project 683 (Pre-Atlantic geological connections among northwest Africa, Iberia and eastern North America: Implications for continental configurations and economic resources).

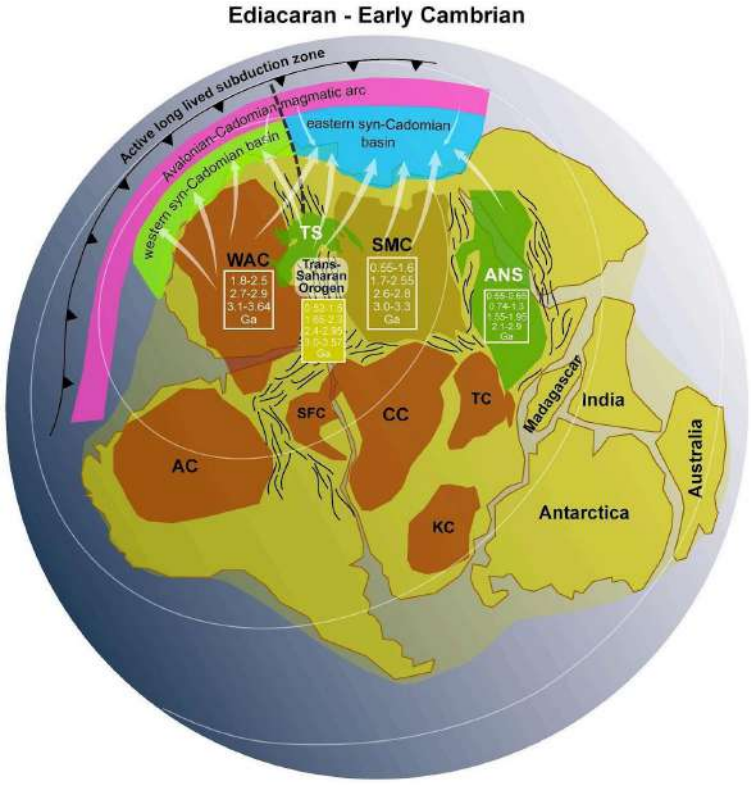


FIGURE 4. *Paleo-geographic reconstruction of the North Gondwanan Cadomian basins during Ediacaran and Lower Cambrian times (Fuenlabrada et al., 2023). Abbreviations: WAC, West African Craton; TS, Tuareg Shield; SMC, Sahara Metacraton; ANS, Arabian-Nubian Shield; AC, Amazon Craton; SFC, San Francisco Craton; CC, Congo Craton; TC, Tanzania Craton; KC, Kalahari Craton.*

REFERENCES

Arenas, R., Sánchez Martínez, S., Díez Fernández, R., Gerdes, A., Abati, J., Fernández-Suárez, J., Andonaegui, P., González Cuadra, P., López Carmona, A., Albert, R., Fuenlabrada, J.M., Rubio Pascual, F.J. (2016): Allochthonous terranes involved in the Variscan suture of NW Iberia: A review of their origin and tectonothermal evolution. *Earth-Science Reviews*, 161: 140–178.

Díez Fernández, R., Arenas, R., Francisco Pereira, M., Sánchez Martínez, S., Albert Roper, R., Martín Parra, L.M., Rubio Pascual, F.J., Matas, J. (2016): Tectonic evolution of Variscan Iberia: Gondwana-Laurussia collision revisited. *Earth-Science Reviews*, 162: 269–292.

Fuenlabrada, J.M., Arenas, R., Sánchez Martínez, S., Díez Fernández, R., Pieren, A.P., Pereira, M.F., Chichorro, M., Silva, J.B. (2020): Geochemical and isotopic (Sm–Nd) provenance of Ediacaran-Cambrian metasedimentary series from the Iberian Massif. Paleoreconstruction of the North Gondwana margin. *Earth-Science Reviews*, 201: 103079.

Fuenlabrada, J.M., Arenas, R., Pereira, M.F., Rojo-Pérez, E., Sánchez Martínez, S., Díez Fernández, R. (2023): Variability in the sources of North Gondwana Cadomian basins tracked by Nd isotopic systematics (Iberian Massif). *Precambrian Research*, 397: 107185.

Rojo-Pérez, E., Fuenlabrada, J.M., Díez Fernández, R., Arenas, R. (in press): Origin and evolution of Cadomian magmatism in SW Iberia: from subduction onset and arc building to a tectonic switching. *International Geology Review*, https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2258394.

Stephan, T., Kroner, U., Romer, R.L., Rösel, D. (2019): From a bipartite Gondwanan shelf to an arcuate Variscan belt: The early Paleozoic evolution of northern Peri-Gondwana. *Earth-Science Reviews,* 192: 491–512.

Desentrañando el estado térmico temprano de la zona de subducción Varisca: Unidades HP-HT de los complejos alóctonos del NO de Iberia.

Unveiling the early thermal state of the Variscan subduction zone: HP-HT units of the allochthonous complexes, NW Iberia.

A. Garcia-Casco[1,2], I. Novo-Fernández[1], N. Pujol-Solà[1], S. Sánchez Martínez[3], G. Iglesias-Ruiz[3], R. Albert[4], A. Beranoaguirre[4], J.A. Proenza[5], I. Gil-Ibarguchi[6], R. Arenas[3]

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. agcasco@ugr.es, inovo@ugr.es, npujolsola@ugr.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), 18100 Armilla, Granada, Spain
3 Dpto. de Mineralogía y Petrología e Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. s.sanchez@geo.ucm.es, gabigles@ucm.es, rarenas@ucm.es
4 Frankfurt Isotope and Element Research Center, Goethe University, 60438 Frankfurt, Germany, AlbertRoper@em.uni-frankfurt.de , beranoaguirre@em.uni-frankfurt.de
5 Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain, japroenza@ub.edu
6 Dpto. de Geologia, Universidad del País Vasco, 48940 Leioa, josei.gil@ehu.es

Palabras clave: Orógeno Varisco, subducción, NO Iberia, complejos alóctonos, unidades superiores

Resumen

Las condiciones termo-báricas de pico de las Unidades Superiores subducidas tempranamente (380-400 Ma) de los complejos alóctonos de Cabo Ortegal, Órdenes y Bragança (NO de Iberia) son contradictorias, dado que corresponden a gradientes térmicos aparentes muy diferentes sincrónicos de la misma zona de subducción. Las condiciones de pico de cuerpos de eclogita (ca. 700 ºC, 80 km de profundidad) indican un gradiente térmico aparente frío de ca. 10 ºC/km, mientras que las condiciones de pico de granulitas HP y piroxenitas con granate de los cuerpos ultramáficos asociados (800-850 ºC, 50-60 km de profundidad) indican un gradiente caliente de 14-18 ºC/km. Estos gradientes tan contrastados se desarrollaron esencialmente de forma sincrónica, a 380-390 Ma para las eclogitas, 380-400 Ma para las granulitas y 383-392 Ma para las rocas ultramáficas. El desarrollo de gradientes contrastados sincrónicos en una zona de subducción no puede explicarse si todos los cuerpos rocosos progradaron cercanos unos a otros. Sin embargo, todos los datos metamórficos y geocronológicos, incluyendo la trayectoria prograda de metagabros coroníticos granulíticos y un potencial estadio eclogítico temprano de las granulitas, pueden reconciliarse si las eclogitas progradaron a lo largo de la interfaz de subducción y las granulitas y rocas ultramáficas progradaron a lo largo de la MOHO subducida. La estimación del grosor y gradiente térmico pre-subducción de la corteza subducida son ca. 15 km y ca. 30 ºC/km, respectivamente, típicos de corteza intermedia estable (de un arco volcánico cámbrico extinto y desmantelado parcialmente), y en consonancia con subducción caliente de la transición corteza-manto y subducción fría de la corteza superior.

Abstract

The peak thermal-baric conditions of the early subducted Upper Units (380-400 Ma) of the allochthonous Cabo Ortegal, Órdenes and Bragança complexes (NW Iberia) are contradictory in that quite different apparent thermal gradients developed synchronously in the subduction zone. Peak conditions in eclogite bodies (ca. 700 ºC, 80 km depth) indicate cold apparent thermal gradients of ca. 10 ºC/km, while peak conditions of HP granulites and garnet pyroxenites within associated ultramafic bodies (800-850 ºC, 50-60 km depth) indicate a hot gradient of ca. 14-18 ºC/km. These contrasted gradients developed mostly synchronously a ca. 380-390 Ma for eclogites, 380-400 Ma for granulites and 383-392 Ma for ultramafic rocks. The development of synchronous contrasted thermal gradients in a single subduction zone cannot be explained if all rock bodies prograded close to each other. However, all the metamorphic and geochronologic data, including the prograde path of granulitic coronitic metagabbros and the potential early eclogitic stage of the granulites, are reconciled if the eclogites prograded along the subduction interface while the granulites and ultramafic rocks prograded along the neighborhood of the subducted MOHO. The estimation of the pre-subduction thickness and thermal gradient of the subducted crust are ca. 15 km and ca. 30 ºC/km, respectively, typical of stable intermediate crust (of an extinct and partly dismantled Cambrian volcanic arc) and in agreement with hot subduction of the crust-mantle transition and cold subduction of the upper crust.

Nuevas evidencias de metamorfismo de alta presión en el Alóctono Inferior de Trás-os-Montes (N Portugal)

New evidence of high pressure metamorphism in the Lower Allochthon of Trás-os-Montes (N Portugal)

J.I. Gil Ibarguchi[1], S. García de Madinabeitia[1], P. Puelles[1], M.L. Ribeiro[2]

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EU 48940 Leioa. josei.gil@ehu.eus, sonia.gdm@ehu.eus, pablo.puelles@ehu.es
2 LNEG – Laboratorio Nacional de Energia e Geologia, 2720-866 Amadora, Portugal. luisacarvalhoduarte@gmail.com

Palabras clave: Metachert, metamorfismo HP/LT, complejos alóctonos, Alóctono Inferior, NO Iberia.

Resumen

El Alóctono Inferior (unidades basales) en la región de Trás-os-Montes (N Portugal) ocupa una gran extensión por debajo de las unidades ofiolíticas. En el Complejo de Morais, la presencia de rocas con metamorfismo Varisco de alta presión y baja temperatura está bien documentada. En Valbom de Figos (SO de Mascarenhas) aparecen esquistos con glaucofana y, ocasionalmente, piroxeno sódico. Al O de Santulhao, se han descrito metadacitas con lawsonita (cf. Ribeiro, 2019 y referencias incluidas). En este trabajo se describen dos nuevas litologías con paragénesis de alta presión y baja temperatura que amplían la tipología de estas rocas en el Alóctono Inferior de Trá-os-Montes. En el área de Valbom de Figos existen metacherts formados esencialmente por cuarzo, con cantidades menores de piroxeno sódico, epidota, hematites, glaucofana y carbonato en orden decreciente de abundancia. Al S de Santulhao, y muy cerca del contacto con las filitas 'borra-de-vinho' del paraautóctono, se han encontrado metabasitas de grado bajo con anfíbol sódico de tipo ferri-winchita, y más raramente glaucofana, relicto en actinolita, junto con albita, epidota y magnetita en la matriz. La existencia de estos dos litotipos abre nuevas perspectivas para la búsqueda de rocas con metamorfismo Varisco de alta presión y baja temperatura en otras unidades basales de los complejos alóctonos del NO peninsular.

Abstract

The Lower Allochthon (basal units) in the region of Trás-os-Montes (N Portugal) occupies a large surface area underlying the ophiolitic units. In the Morais Complex, the presence of rocks with high pressure and low temperature Variscan metamorphism is well documented. In Valbom de Figos (SO of Mascarenhas), there occur glaucophane schists occasionally bearing sodic pyroxene. W of Santulhao, lawsonite-bearing metadacites have been described (see Ribeiro, 2019 and references therein). Here we describe two new lithologies with parageneses of high pressure and low temperature that expand the typology of such rocks within the Lower Allochthon of Trás-os-Montes. In the Valbom de Figos site, there are metacherts made essentially of quartz with minor amounts of sodic pyroxene, epidote, hematites, glaucophane and carbonate in decreasing order of abundance. South of Santulhao and very close to the 'borra-de-vinho' phyllites of the paraautochthon, we have found low-grade metabasites bearing sodic amphibole of the type ferri-winchite and, less commonly, relicts of glaucophane within actinolite, alongside other minerals in the matrix such as albite, epidote and magnetite. The existence of these two lithotypes opens up new prospects for the search of rocks with Variscan high pressure-low temperature metamorphism elsewhere within the basal units of the allochthonous complexes of NW Iberia.

Referencias

Ribeiro, M. L. (2019). In: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach* (C. Quesada and J. T. Oliveira, Eds.). Regional Geology Reviews, Springer Nature Switzerland AG, 445-448.

Condiciones de fusión parcial en gneises migmatíticos de la Unidad de Campo Maior (Arronches, Portugal)

Partial melting conditions in migmatitic gneisses from the Campo Maior Unit (Arronches, Portugal)

L. González-Menéndez[1], R. Díez Fernández[1], G. Gallastegui[1], D. Moreno Martín[2], M.F. Pereira[3]

1 C. N. Instituto Geológico y Minero de España, CSIC. l.gonzalez@igme.es r.diez@igme.es g.gallastegui@igme.es
2 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. diamor03@ucm.es
3 Instituto de Ciencias da Terra, Dpto. Geociencias ECT, Universidade de Évora. 700-671, Évora, Portugal. mpereira@uveora.pt

Palabras clave: Petrología metamórfica, pseudosecciones, Thermocalc, Ossa-Morena, Orógeno Varisco.

Resumen

La Unidad de Campo Maior (sutura Varisca en el Complejo de Ossa-Morena) está formada por gneises (paragneises ± ortogneises) ± anfibolitas, con diferentes grados de migmatización. Los gneises varían desde zonas sin migmatización a metatexitas y diatexitas, con edades de fusión datadas en 335–345 Ma. En una muestra representativa (N de Arronches) estos gneises presentan texturas diatexíticas con una mineralogía formada por Qz, Pl, Bt, Grt, ± Kfs, ± Sill, e Ilm (generalmente orientados y definiendo la foliación principal). Bt, Grt y feldespatos aparecen formado texturas de reacción. Como fases secundarias destacan sericita y clorita. La geoquímica de roca total es peraluminosa (A/CNK = 1.91), con elevado contenido en TiO_2 (0.87 wt%) y relativamente bajo en CaO (1 wt%) y P_2O_5 (0.13 wt%) para una concentración de SiO_2 de 64.5 wt%. Para establecer las condiciones de presión, temperatura y contenido en H_2O de este evento de fusión cortical, se realizaron pseudosecciones P–T y T–XH_2O con el programa Thermocalc en el sistema MnNCKFMASHTO junto con la base de datos termodinámica ds62 y sus correspondientes modelos de actividad-composición para los minerales que forman soluciones sólidas. Mediante el cálculo de isopletas de fundido, Grt y Kfs se estableció una región P–T donde la mineralogía calculada coincide con la observada (Qz + Pl + Kfs + Bt + Grt + Sill + Ilm) a 732–760ºC y 6.3–7.7 kbar coexistiendo con un 20–25% de fundido granítico. Si disminuimos la cantidad de H_2O del sistema hacia el mínimo necesario para su saturación a estas presiones (4.6–5 mol%), el fundido se reduce un ~ 10–15%, lo que podría explicar los diferentes grados de migmatización de estos gneises.

Abstract

The Campo Maior Unit (Variscan suture in the Ossa-Morena Complex) is formed by gneisses (paragneisses ± orthogneisses) ± amphibolites, with different degrees of migmatization. The gneisses vary from zones without migmatization to metatexites and diatexites, with partial-melting ages dated at 335–345 Ma. In a representative sample (N de Arronches) these gneisses present diatexitic textures with a mineralogy formed by Qz, Pl, Bt, Grt, ± Kfs, ± Sill, and Ilm (usually oriented and defining the main foliation). Bt, Grt and feldspars exhibit reaction textures. Sericite and chlorite are secondary phases. The whole-rock geochemistry is peraluminous (A/CNK = 1.91), with high TiO_2 content (0.87 wt%) and relatively low CaO (1 wt%) and P_2O_5 (0.13 wt%) for a concentration of SiO_2 of 64.5 wt%. To establish P, T and H_2O conditions of this crustal melting event, P–T and T–XH_2O pseudosections were calculated with Thermocalc in the MnNCKFMASHTO system, together with the ds62 thermodynamic database and its corresponding models of activity-composition for minerals that form solid solutions. By calculating isopleths of melt, Grt and Kfs, we established a P–T region where the calculated mineralogy coincides with the observed one (Qz + Pl + Kfs + Bt + Grt + Sill + Ilm) at 732–760ºC and 6.3–7.7 kbar, coexisting with 20–25% granitic melt. If we decrease the amount of H_2O in the system towards the minimum necessary for saturation at these pressures (4.6–5 mol%), the melt is reduced by ~ 10–15%, which could explain the different degrees of migmatization of these gneisses.

Reconstrucción de la historia del arco peri-Gondwánico cadomiense a partir de la deformación en el SW del Macizo Ibérico

Reconstruction of the Cadomian peri-Gondwanan arc history based on deformation in the SW Iberian Massif

D. Moreno-Martín[1], R. Díez Fernández[2], R. Arenas[1], E. Rojo-Pérez[1], I. Novo-Fernández[1,3], S. Sánchez Martínez[1]

1 Departamento de Mineralogía y Petrología, Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, Madrid, Spain. diamor03@ucm.es rarenas@geo.ucm.es e.rojo@ucm.es s.sanchez@geo.ucm.es
2 Departamento de Geología y Subsuelo, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Salamanca, Spain. r.diez@igme.es
3 Departamento de Mineralogía y Petrología (UGR), Universidad de Granada, Granada, Spain. inovo@ugr.es

Palabras clave: Orogenia cadomiense, domo extensional, desmantelamiento del arco, subducción, Dominio Obejo-Valsequillo.

Resumen

La Orogenia Cadomiense dio lugar a un orógeno asociado a subducción en la periferia de Gondwana. La complejidad de las estructuras ligadas a este evento requiere un análisis detallado debido al retrabajado de estructuras durante el ciclo Varisco. En el suroeste de Iberia, particularmente en el Macizo de La Serena, se ha realizado un análisis tectonometamórfico y recopilación de datos estructurales, identificando tres fases de deformación Cadomienses. La primera fase (D_{C1}, anterior a 573 Ma) condicionó morfologías tabulares en plutones durante la construcción de un arco continental. La segunda fase (D_{C2}, 573–535 Ma) generó pliegues erguidos y contribuyó al engrosamiento de la corteza. La tercera fase (D_{C3}, entre ~535 y ~480 Ma) produjo un domo elongado con dirección paralela al orógeno y flujo extensional oblicuo bivergente. D_{C1} representa una etapa de crecimiento y engrosamiento cortical dentro de un eje magmático principal del arco, mientras que D_{C2} está ligada con un periodo de engrosamiento cortical global que afectó a la periferia de Gondwana, desde las áreas más externas (*forearc*) hasta las más internas (*back-arc*). D_{C2} sugiere una subducción de bajo ángulo (*flat subduction*), que fue seguida por un periodo de extensión cortical (D_{C3}) tras el *roll-back* de la placa inferior. La construcción Ediacárica del Orógeno Cadomiense (D_{C1} y D_{C2}) implica, para ese periodo, subducción activa bajo Gondwana *s.l.*, mientras que su desmantelamiento y extensión durante el Cámbrico es compatible con una convergencia oblicua y senestra.

Abstract

The Cadomian Orogeny gave rise to a subduction-related orogen on the periphery of Gondwana. The intricate structures related to this event require detailed analysis due to the structural reworking associated with the Variscan cycle. In southwestern Iberia, particularly in the La Serena Massif, tectonometamorphic analysis and compilation of structural data have led to the recognition of three Cadomian deformation phases. The first phase (D_{C1}, prior to 573 Ma) shaped plutons into tabular morphologies during the construction of a continental volcanic arc. The second phase (D_{C2}, 573–535 Ma) generated upright folds and contributed to crustal thickening. The third phase (D_{C3}, between ~535 and ~480 Ma) produced a dome parallel to the orogen with oblique and bi-vergent extensional flow. D_{C1} represents a stage of crustal growth and thickening within a magmatic axis of the arc, while D_{C2} attests to a period of crustal thickening across the entire arc system in the periphery of Gondwana, from the outermost sections (forearc) to the innermost ones (back-arc). D_{C2} suggests flat subduction, followed by a period of crustal extension (D_{C3}) upon the rollback of the lower plate. The Ediacaran construction of the Cadomian Orogen (D_{C1} and D_{C2}) implies ongoing subduction beneath Gondwana *s.l.*, while its dismantling during the Cambrian is consistent with oblique and sinistral convergence.

La zona de cizalla del Cañamares: interpretación cinemática de la fase D_3 varisca en el extremo oriental del Sistema Central español (Zona Centroibérica).

The Cañamares shear zone: kinematic interpretation of the Variscan D_3 phase in the Eastern end of the Spanish Central System (Central Iberian Zone).

D. Moreno-Martín[1], C. Fernández[2], R. Díez Fernández[3] y G. de Vicente[2]

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense de Madrid, 28040-Madrid. diamor03@ucm.es
2 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 28040-Madrid. cafern08@ucm.es; gdv@geo.ucm.es
3 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, 37001-Salamanca. r.diez@igme.es

Resumen: Se describe la estructura de la zona de cizalla del Cañamares, en el extremo oriental del Sistema Central español. Se trata de una estructura de la fase D_3 varisca, situada en la Zona Centro Ibérica. Su disposición general es N-S a N160ºE y vertical. El desplazamiento acomodado por la zona de cizalla en la horizontal es lateral derecho. La orientación de la foliación S_3 y de los ejes de la crenulación (L_3) asociados al cizallamiento ha permitido aplicar un modelo analítico cinemático de transpresión. El resultado es que dicha zona habría actuado como una estructura transpresiva monoclínica ($\alpha = 0º$) o ligeramente triclínica ($\alpha = 10º$), con extrusión en la vertical, y valores de vorticidad en el campo del predominio del cizallamiento simple ($W_k > 0.81$). Esta cinemática predice satisfactoriamente la reorientación fábricas anteriores cerca de la zona de cizalla (e.g., lineación L_2). La dirección de convergencia entre los bloques separados por la zona de cizalla sería N-S a NNW-SSE, lo que debe ser interpretado en el complejo marco de la evolución tectónica del orógeno varisco durante la etapa de formación de oroclinales.

Palabras clave: Zona de cizalla, pliegues erguidos, Orógeno Varisco, Zona Centro Ibérica, Sistema Central español.

Abstract: *A structural description of the Cañamares shear zone, at the eastern end of the Spanish Central System, is made here. It is a structure from the Variscan D_3 phase, located in the Central Iberian Zone. Its general attitude is N-S to N160ºE and vertical. The horizontal displacement accommodated by the shear zone in the is right lateral. The orientation of the S_3 foliation and the crenulation lineation (L_3) associated with the shear zone has allowed the application of a kinematic analytical model of transpression. The shear zone would have acted as a monoclinic ($\alpha = 0º$) or slightly triclinic ($\alpha = 10º$) transpressive structure, with vertical extrusion, and vorticity values in the field of the predominance of simple shearing ($W_k > 0.81$). This kinematics predicts the reorientation of previous fabrics near the shear zone, such as the L_2 lineation. The direction of convergence between the blocks separated by the shear zone would be N-S to NNW-SSE, which must be interpreted in the complex framework of the tectonic evolution of the Iberian Variscan belt during the formation of the oroclines.*

Key words: *Shear zone, upright folds, Variscan Orogen, Central Iberian Zone, Spanish Central System.*

INTRODUCCIÓN

El estudio analítico y cinemático de las grandes estructuras generadas durante una misma fase de deformación dentro de un ciclo orogénico permite calcular direcciones de convergencia y su variabilidad. Este es el caso de las zonas de cizalla transcurrentes generadas durante la tercera fase de deformación Varisca (D_3). Los estudios de dichas zonas de cizalla permiten entender la culminación del Orógeno Varisco. Por ejemplo, la falla del Cañamares tiene una dirección N160°E y es vertical. Esta dirección diverge mucho de la de la falla D_3 de Azuaga (ONO-ESE), situada al S del Macizo Ibérico, así como de muchas otras a lo largo del Macizo Ibérico (Fig. 1a).

SITUACIÓN GEOLÓGICA Y ESTRUCTURA

El orógeno Varisco resultó de la colisión entre terrenos pericontinentales, Gondwana y Laurrusia (Díez Fernández et al., 2016). La zona de estudio se enmarca en el Sistema Central Hispano-Portugués, una cordillera intraplaca cenozoica con basamento formado tras la Orogenia Varisca. El Macizo Ibérico conforma la mayor parte de ese basamento en Iberia. Este estudio se centra en la parte más oriental de la Zona Centro Ibérica, que representa un autóctono (Gondwana *s.s.*) respecto de terrenos peri-Gondwánicos cabalgantes durante la Orogenia Varisca (Díez Fernández et al., 2016; Fig. 1b).

La estructura Varisca resulta de la superposición e interferencia de estructuras generadas durante eventos de engrosamiento (D_1 y D_3) y adelgazamiento cortical (D_2 y D_4) alternantes en un marco de colisión continental. La Falla del Cañamares (Fig. 1b) es una zona de cizalla generada durante D_3, reactivada durante la tectónica transtensional pérmica y, también, en el Orógeno Alpino (Moreno-Martín et al., 2022). Tras filtrar los procesos de retrabajado-reactivación, presentamos aquí un análisis estructural de la deformación varisca D_3 (geometría, número de vorticidad, dirección de extrusión y porcentaje de deformación) ligada a la Falla del Cañamares, referida como Zona de Cizalla del Cañamares.

MODELO CINEMÁTICO

La información disponible para la Zona de Cizalla del Cañamares permite realizar un análisis estructural detallado con objeto de establecer su cinemática y su efecto sobre estructuras y fábricas anteriores. Para simular la zona de cizalla se ha utilizado el modelo analítico de transpresión descrito por Fernández y Díaz Azpiroz (2009). La componente horizontal de desplazamiento para esta zona de cizalla es lateral derecha (Moreno-Martín et al., 2022). Sin embargo, el trazado original de la zona de cizalla, jalonado en la actualidad por una banda de fallas alpinas, es incierto. La información cartográfica sugiere que se trataba de una estructura sub-vertical y de orientación N-S a NNW-SSE. Se han considerado, por tanto, las siguientes posibles orientaciones: N000ºE/90º y N160ºE/90º.

Como primera aproximación, se han considerado descripciones cinemáticas sencillas, con una dirección de extrusión vertical y una componente de cizalla simple horizontal (transpresión monoclínica: ángulo $\alpha = 0º$) o ligeramente inclinada sobre el plano de cizalla (transpresión triclínica: ángulo $\alpha = +10º$ -cabeceo hacia el N-, ya que el valor de $\alpha = -10º$ -cabeceo hacia el S- no ha dado buenos ajustes). La componente coaxial es cizalla pura. Se han explorado hasta 9 valores del número de vorticidad cinemática (W_k) entre 0.1 (flujo cercano a la cizalla pura) y 0.9999 (flujo cercano a la cizalla simple). La Figura 2a muestra la orientación de las fábricas y estructuras de fase D_3 medidas en las cercanías de la zona de cizalla, entre La Bodera y Rebollosa de Jadraque. Los polos de la foliación S_3 son sub-horizontales y se disponen en dirección NE-SW con una cierta dispersión en el rumbo. Los ejes de las crenulaciones de fase D_3 (L_3) se inclinan ligeramente hacia el NW. El modelo analítico ha permitido determinar, para la actuación de la zona de cizalla, la orientación del eje Z (corto) de los elipsoides de la deformación finita, que puede considerarse como aproximadamente coincidente con los polos de S_3.

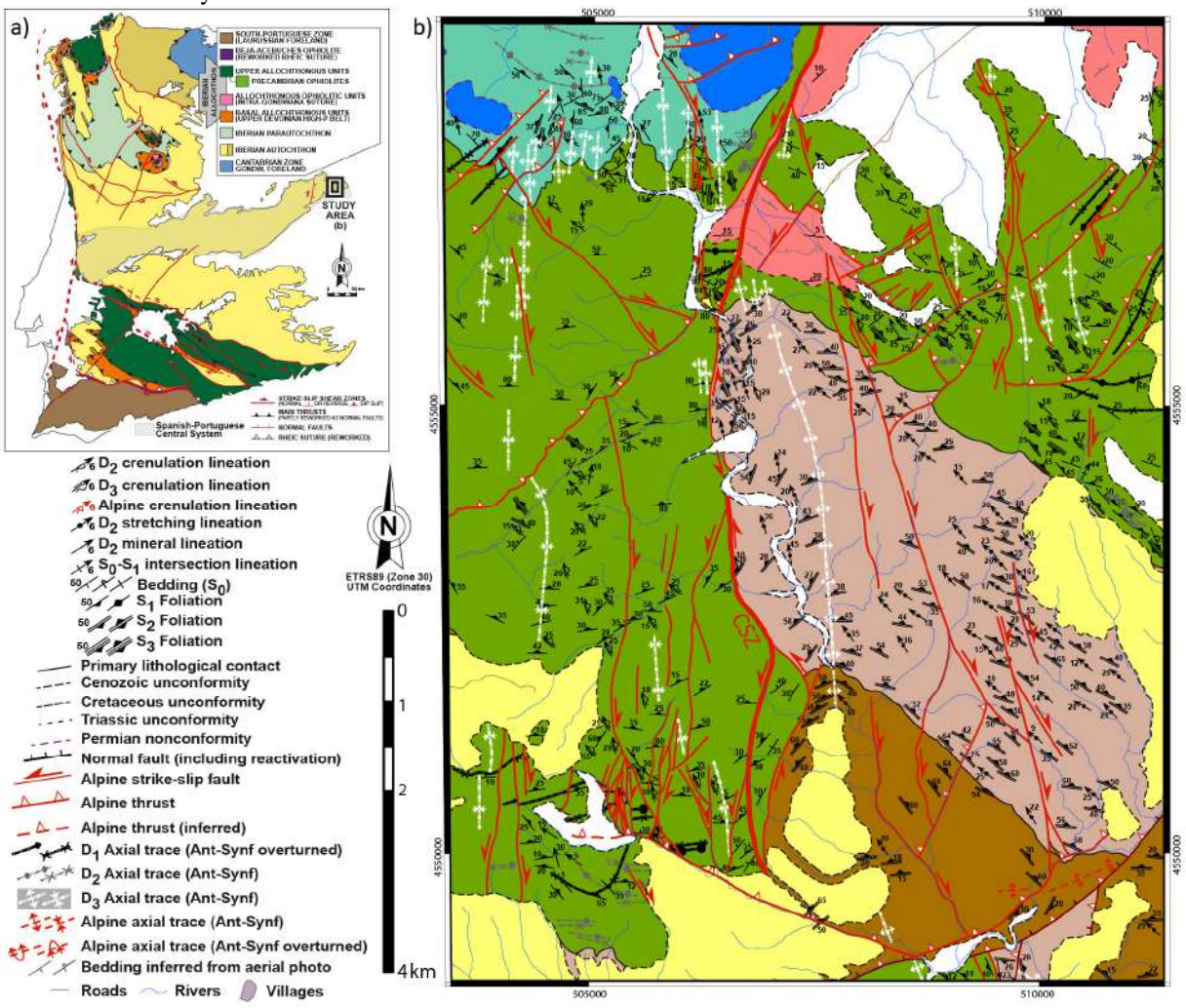


FIGURA 1. *(a) Situación y (b) mapa geológico de la zona estudiada (CSZ: Cañamares Shear Zone-Zona de Cizalla del Cañamares).*

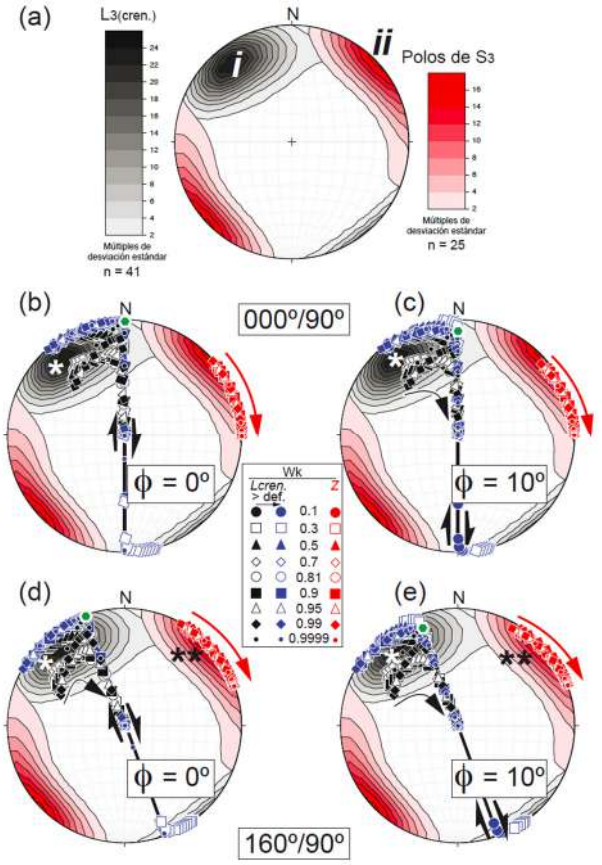


FIGURA 2. *(a) Diagramas de densidad de polos (proyección equiareal, hemisferio inferior; método de Kamb) de las lineaciones de crenulación L_3 (gama de grises) y de los polos de la foliación S_3 (gama de rojos) medidos en la zona estudiada. (b) a (d) Resultados del modelo cinemático aplicado a la zona de cizalla del Cañamares para las distintas orientaciones del plano de cizalla (vertical y en direcciones N-S y N160ºE; el plano de cizalla se representa con una línea negra gruesa), valores del ángulo □ de 0º y 10º (la dirección de cizalla simple se representa con hexágonos verdes) y distintos valores del número de vorticidad cinemática (W_k). Los resultados del modelo se muestran mediante símbolos rojos (eje Z del elipsoide de la deformación finita) o negros y azules (reorientación de los ejes de crenulación para dos orientaciones iniciales extremas de la foliación S_2 plegada; ver texto para más información). Los asteriscos sencillos (para la crenulación) o dobles (para los polos de S_3) indican un ajuste aceptable entre las predicciones del modelo y las observaciones naturales.*

La determinación de las crenulaciones L_3 ha resultado más laboriosa, dado que no marcan una dirección de estiramiento y no deben corresponder necesariamente al eje *X* (largo) del elipsoide de deformación finita. En primer lugar, se ha determinado la orientación de la principal estructura planar afectada por las crenulaciones de fase D_3 que, en la zona estudiada, es la foliación S_2. Los polos de S_2 muestran una gran variabilidad por efecto de las fases posteriores de deformación (variscas, pérmicas y alpinas; Moreno-Martín et al., 2022), por lo que se ha calculado un rango posible de orientaciones originales de S_2 utilizando el modelo cinemático para la actuación de la zona de cizalla de Hiendelaencina (fase D_2, Moreno-Martín et al., 2022), con los mismos valores de vorticidad usados para simular la fase D_3. Dos disposiciones extremas de S_2 se han obtenido para cada valor de vorticidad, uno considerando una deformación infinitesimal y otro para la máxima deformación finita que considera el modelo (equivalente a un acortamiento

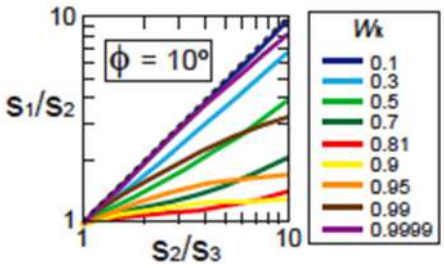


FIGURA 3. *Trayectorias de deformación en el espacio de Flinn logarítmico predichas por el modelo cinemático para los distintos valores de vorticidad (W_k) considerados.*

perpendicular a la zona de cizalla del 90%). A partir de ello, se ha calculado la orientación del eje largo de la elipse seccional de la deformación D_3 en esos planos de S_2, que debe coincidir con la disposición inicial de los ejes de las crenulaciones D_3. Finalmente, se ha obtenido la rotación sufrida por esos ejes de crenulación por efecto del incremento de la deformación durante D_3, considerándolos como líneas pasivas (aproximación razonable de acuerdo con Fossen et al., 2013). Los resultados (Fig. 2b-e) muestran que sólo los casos en los que la zona de cizalla se orienta en dirección N160ºE, para valores de □ entre 0º y +10º ofrecen buenos ajustes entre el modelo y las estructuras de fase D_3 medidas (Fig. 2e). El modelo no permite discriminar con claridad los valores óptimos de vorticidad, aunque favorece flujos dominados por cizalla simple ($W_k > 0.81$).

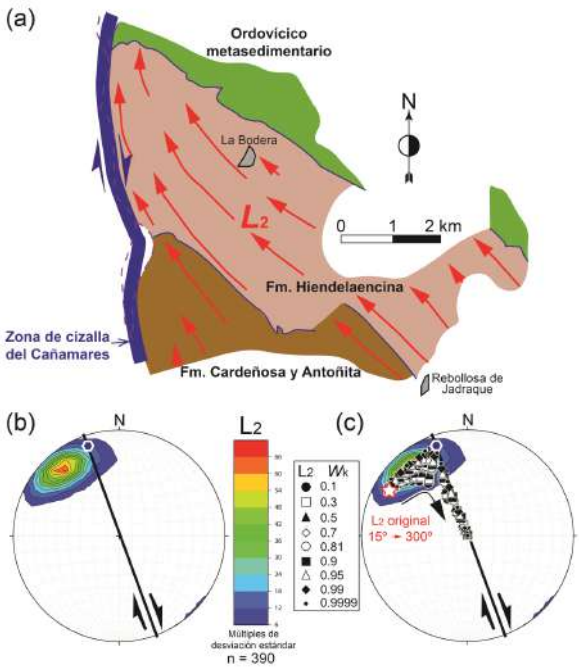


FIGURA 4. *(a) Esquema de la Zona de Cizalla del Cañamares (sector de La Bodera-Rebollosa de Jadraque) mostrando el patrón de reorientación de las trazas de la lineación L_2 (flechas rojas). (b) Diagrama de densidad de polos (proyección equiareal, hemisferio inferior, método de Kamb) de 390 datos de L_2 medidos. (c) Proyección equiareal, hemisferio inferior, mostrando la reorientación de la lineación L_2 calculada mediante el modelo cinemático a partir de su orientación inicial (estrella de borde rojo) y para distintos valores de vorticidad, y su comparación con la distribución de la L_2 observada (diagrama de densidad de polos). Se marca la orientación de la zona de cizalla y la posición sobre dicho plano de la dirección de la componente de cizalla simple (hexágono azul).*

No se dispone de datos referentes a la magnitud o forma del elipsoide de la deformación finita asociada a D_3. El contraste entre las trayectorias teóricas y los diagramas de densidad de datos naturales (Fig. 2), sin embargo, permiten deducir valores bajos a moderados de la deformación finita (acortamientos perpendiculares a la zona de cizalla inferiores al 40%), ya que las mayores magnitudes (superiores al 40%) habrían generado crenulaciones L_3 cercanas a la vertical. En cuanto a la forma de los elipsoides, los valores de vorticidad en el campo de predominio de la cizalla simple podrían generar un amplio rango de formas dentro del campo del aplastamiento aparente (Fig. 3). El modelo debe ser capaz también de reproducir la reorientación de fábricas anteriores como consecuencia de la actuación la fase D_3. Es muy llamativo, desde el punto de vista cartográfico, el cambio en la orientación del trazado de la lineación mineral y de estiramiento de fase D_2 (L_2) al acercarse a la zona de cizalla del Cañamares (Fig. 4a, b). La orientación inicial de L_2 ha sido obtenida nuevamente mediante el mismo modelo utilizado para calcular la de S_2. La reorientación de L2 durante D3 es satisfactoriamente simulada por el modelo cinemático (Fig. 4c) utilizando los valores obtenidos para el mejor ajuste de los datos de la fase D3 comentados anteriormente: zona de cizalla vertical de dirección N160ºE, $\varphi = +10º$ (aunque con 0º se hubiera también obtenido un buen ajuste) y valores de vorticidad superiores a 0.81.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Un modelo de transpresión lateral derecha monoclínica ($\varphi = 0º$) a ligeramente triclínica ($\varphi = +10º$), en el campo del predominio de la cizalla simple ($W_k > 0.81$) define la actuación de la Zona de Cizalla del Cañamares durante la fase D_3 varisca, explicando la formación y orientación de las estructuras y fábricas de dicha fase y la reorientación de la lineación L_2. El efecto de las fases posteriores a D_3 ha sido escaso en el caso de la reorientación de estructuras lineares como L_2 o L_3, dado el paralelismo o perpendicularidad de los ejes principales de la deformación durante las sucesivas fases tectónicas. El carácter heterogéneo de la deformación asociada a D_3 ha limitado también la reorientación de S_3. La dirección de convergencia entre los bloques separados por la Zona de Cizalla del Cañamares se puede determinar con el modelo cinemático aplicado en este estudio mediante el cálculo de la apófisis oblicua del flujo. El resultado varía entre N160ºE y N-S. ¿Qué significado tiene esta dirección de convergencia? Los pliegues y otras estructuras de fase D_3 son simultáneos al funcionamiento de grandes zonas de cizalla sub-verticales, como la descrita en este trabajo (véase, p. ej., Martínez-Catalán, 2011, y las referencias en ese artículo). El complejo patrón cinemático general que controló esta fase a la escala del Macizo Ibérico, así como su intrincada evolución espacial y temporal, caracterizada por el desarrollo de grandes oroclinales, puede ser predicho teóricamente (p. ej., Weil et al., 2012). Otra cuestión es que pueda demostrarse. Esto es debido tanto al amplio rango de edades de estos grandes accidentes, como a la falta de estudios cinemáticos detallados de cada una de las zonas de cizalla asignadas a la fase D_3. El análisis realizado por Díez Fernández et al. (2021) de la falla de Azuaga, en la vecina Zona de Ossa-Morena, ha mostrado una dirección de convergencia E-W entre bloques, es decir, prácticamente ortogonal a la deducida en este trabajo. Es teóricamente posible explicar estas diferencias en el marco de un proceso de *buckling* litosférico. Pero una contrastación estructural verdaderamente sólida de estas hipótesis tectónicas sólo se podrá lograr cuando un número significativo de zonas de cizalla de fase D_3, a lo largo de todo el Macizo Ibérico, haya sido analizado con los modelos cinemáticos disponibles. En este trabajo se contribuye con un paso más en esa dirección.

Señalar, por último, que buena parte de las zonas de cizalla variscas (de cualquier edad en la evolución orogénica) parecen haber conducido y condicionado la deformación alpina en el basamento del Sistema Central Hispano-Portugués (p. ej. de Vicente et al., 2022).

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos PID2021-126347NB-I00, PID2020-112489GB-C21 y PID2020-112489GB-C22 financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

de Vicente, G., Díez Fernández, R., Olaiz, A., Muñoz-Martín, A. (2022): Variscan inheritance induces Alpine upper crustal delamination in East Spanish–Portuguese Central System. *Tectonics*, 41: e2022TC007315.

Díez Fernández, R., Arenas, R., Pereira, M. F., Sánchez-Martínez, S., Albert, R., Martín Parra, L. M., Rubio Pascual, J. F., Matas, J. (2016): Tectonic evolution of Variscan Iberia: Gondwana-Laurussia collision revisited. *Earth-Science Reviews,* 162: 269–292.

Díez Fernández, R., Fernández, C., Arenas, R., Novo-Fernández, I. (2021): On the rootless nature of a Devonian suture in SW Iberia (Ossa-Morena Complex, Variscan Orogen): Geometry and kinematics of the Azuaga Fault. *Tectonics*, 40: e2021TC006791.

Fernández, C., Díaz Azpiroz, M. (2009): Triclinic transpression zones with inclined extrusion. *Journal of Structural Geology*, 31: 1255–1269.

Fossen, H., Teyssier, Ch., Whitney, D.L. (2013): Transtensional folding. *Journal of Structural Geology*, 56: 89–102.

Martínez-Catalán, J.R. (2011): Are the oroclines of the Iberian belt related to late Variscan strike-slip tectonics? *Terra Nova*, 23: 241–247.

Moreno-Martín, D., Díez-Fernández, R., de Vicente, G., Fernández, C., Gómez Barreiro, J. (2022): Orogenic reworking and reactivation in Central Iberia: A record of Variscan, Permian and Alpine tectonics. *Tectonophysics*, 843: 229601.

Weil, A.B., Gutiérrez-Alonso, G., Johnston, S.T., Pastor-Galán, D. (2012): Kinematic constraints on buckling a lithospheric-scale orocline along the northern margin of Gondwana: A geologic synthesis. *Tectonophysics*, 582: 25–49.

Evolución tectonotermal de la lámina de eclogitas del Devónico Inferior del Complejo de Cabo Ortegal (NO Macizo Ibérico)

Tectonothermal evolution of the Lower Devonian eclogitic layer from the Cabo Ortegal Complex (NW Iberian Massif)

I. Novo-Fernández[1], R. Arenas[2], J.I. Gil Ibarguchi[3], R. Albert[4], A. Gerdes[4], S. Sánchez Martínez[2], R. Díez Fernández[5], A. Beranoaguirre[6], A. Garcia-Casco[1]

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada 18071 Granada. inovo@ugr.es, agcasco@ugr.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense 28040 Madrid. rarenas@ucm.es, s.sanchez@geo.ucm.es
3 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco 48940 Bilbao. josei.gil@ehu.eus
4 Frankfurt Isotope and Element Research Center, Goethe-Universität Frankfurt 60438 Frankfurt. RichardAlbert@fierce.uni-frankfurt.de, gerdes@fierce.uni-frankfurt.de
5 Departamento de Geología y Subsuelo, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CSIC) 37001 Salamanca. r.diez@igme.es
6 Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie 76131 Karlsruhe. aratz.beranoaguirre@ehu.eus

Palabras clave: Eclogitas, Complejo de Cabo Ortegal, Orogenia Varisca, modelización termodinámica.

Resumen

La orogenia Varisca tuvo lugar durante el Paleozoico Superior a consecuencia de la colisión entre Gondwana y Laurrusia. Actualmente, la zona más interna del Orógeno Varisco aparece preservada en varios complejos alóctonos del Macizo Ibérico. Al NO de este macizo, el Complejo de Cabo Ortegal contiene a techo el llamado Alóctono Superior, cuya sección inferior experimentó metamorfismo de alta-P y alta-T durante el Devónico Inferior. El Alóctono Superior está constituido por rocas ultramáficas, granulitas de alta presión, una lámina de eclogitas y paragneises migmatíticos. La lámina de eclogitas tiene un espesor de hasta 700 m y más de 20 km de longitud, y en ella se han diferenciado tres tipos de eclogitas: eclogitas ricas en Mg-Al, eclogitas ferrotitaníferas y eclogitas comunes (Mendia *et al.*, 2001). El estudio petrológico en base a la modelización termodinámica de los tres tipos de eclogitas revela condiciones PT de ~750-800 ºC y 23-25 kbar para el pico metamórfico, indicando la subducción profunda de la periferia de Gondwana al inicio de la Orogenia Varisca durante el Devónico Inferior.

Abstract

The Variscan Orogeny took place during Late Paleozoic as a consequence of the collision between Gondwana and Laurussia. Currently, the most internal zone of the Variscan Orogen is preserved in several allochthonous complexes from the Iberian Massif. The Cabo Ortegal Complex (NW Iberia) contains the so-called Upper Allochthon, whose lower section underwent high-P and high-T metamorphism during Lower Devonian. The Upper Allochthon is constituted by ultramafic rocks, high-P granulites, an eclogitic layer and migmatitic paragneisses. In the eclogitic layer, which is up to 700 m thick and 20 km long, three types of eclogites have been identified: Mg-Al-rich eclogites, Fe-Ti-rich eclogites and common eclogites (Mendia *et al.*, 2001). Thermodynamic modelling of the three types of eclogites reveals metamorphic peak conditions of ~750-800 ºC and 23-25 kbar, indicating deep subduction of the peri-Gondwana realm at the onset of the Variscan Orogeny during Early Devonian.

Referencias

Mendia, M., Gil Ibarguchi, J. I. y Ábalos, B. (2001). *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe* 26, 155–178.

Implicaciones de la discordancia Cadomiense en la estratigrafía del Supergrupo Beiras ("Dominio Esquisto-Grauváquico", Portugal)

Implications of the Cadomian unconformity in the stratigraphy of the Beiras Supergroup ("Schist-Greywacke Domain", Portugal).

C.A.P. Meireles[1], P.F. Castro[1], N. Vaz[2], C. Ângelo[1], N. Ferreira[1], A.J.D. Sequeira[1], A.A. Sá[2]

1 Laboratório Nacional de Energía e Geologia, Rua da Amieira, Apartado 1089, 4466-901 S. Mamede de Infesta, Portugal. carlos.meireles@lneg.pt; paulogcsfcastro@gmail.com; carlos.angelo@lneg.pt; narciso.ferreira54@gmail.com; antoniojdsequeira@gmail.com
2 Departamento de Geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Quinta dos Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal. asa@utad.pt; nunovaz@utad.pt

Palabras clave: Zona Centro Ibérica, discordancia Cadomiense, secuencias metasedimentarias, Supergrupo Beiras, correlación ibérica

Resumen

Una revisión de trabajos anteriores del Dominio Esquisto-grauváquico en Portugal (Meireles *et al*., 2014, 2022; Dias da Silva *et al*., 2023), demuestran la existencia de la discordancia intracadomiana (Alcudiense) en el Supergrupo Beiras. Este hecho implica la definición de dos secuencias metasedimentarias distintas, los grupos Fróia y Lousã, que se correlacionarían con las secuencias españolas del Alcudiense inferior y superior, respectivamente (Meireles *et al*., 2022). Se presentan las evidencias cartográfica y estructural de esta discordancia y se hace un análisis crítico de las propuestas litoestratigráficas en discusión (Meireles *et al*., 2022; Dias da Silva *et al*., 2023).

Abstract

Recent works reviewing the geology of the Beiras Supergroup (Meireles *et al*., 2014, 2022; Dias da Silva *et al*., 2023) demonstrates the existence of an intracadomian (Alcudian) unconformity. This has led to the definition of two distinct metasedimentary sequences, the Fróia and Lousã groups, correlated with the Spanish sequences of the lower and upper Alcudian, respectively (Meireles *et al*., 2022). The cartographic and structural evidence of this unconformity is presented and a critical analysis of the lithostratigraphic proposals under discussion is made (Meireles *et al*., 2022; Dias da Silva *et al*., 2023).

Referencias

Dias da Silva, Í., Martins, I., Mateus, A. (2023). In *Resumos do XI CNG 2023, Coimbra*, 187–188.
Meireles, C., Castro, P., Ferreira, N. (2014). In IX CNG/2º CoGePLiP, Porto. *Comunicações Geológicas*, 101, Especial I, 495–498.
Meireles, C.A.P., Castro, P. F., Vaz, N., Ângelo, C., Ferreira, N., Sequeira, A.J.D., Sá, A.A. (2022). *Cadernos Xeolóxicos de Laxe* 44, 1–30.

Descompensación entre relieve y espesor cortical en las Béticas.

Decoupling between relief and crustal thicknesses in the Betics.

J. M. Azañón[1,2], J.V. Pérez-Peña[1,2], G. Booth[1], J.P. Galve[1], J. Morales[2], D. Stich[2], F. L. Mancilla[2]

1 Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. jazanon@ugr.es
2 Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de desastres sísmicos. Universidad de Granada.

Palabras clave: Topografía residual, espesores corticales, slab-rollback

Resumen

Los nuevos datos sobre espesor cortical y litosférico bajo las Béticas y su entorno revelan una topografía descompensada respecto a la profundidad de la Moho. Las elevaciones esperables en un modelo de equilibrio isostático superan las elevaciones observadas en las cuencas del Neógeno del sector central, mostrando una topografía residual negativa. Además, el sector occidental de esta cadena, donde afloran unidades de flysch, presenta los valores negativos más extremos de la topografía residual. Por el contrario, el sector oriental de la Cordillera Bética muestra una topografía residual positiva. Los valores positivos más importantes de la topografía residual se encuentran en el sector occidental de Sierra Nevada, donde la elevación de la superficie alcanza más de 3.300 m. Precisamente, este sector de la cordillera, sin una raíz cortical significativa, ha sido fuertemente exhumado durante los últimos 8 Ma y presenta las tasas más altas de incisión y elevación del Plio-Cuaternario. En este trabajo, se presenta un análisis completo del patrón de drenaje y su evolución reciente considerando: a) la componente de elevación debida al rebote isostático; b) las consecuencias en el relieve del "slab rollback" ; c) la posible incidencia en el relieve un ascenso astenosférico producido por el "tearing" y delaminación del manto litosférico ibérico.

Abstract

New crustal and mantle lithosphere data under the Betics reveal an important decoupling between relief and crustal thicknesses. Predicted elevations due to the lithospheric buoyancy exceed the observed elevations on the Neogene basins of the central sector that show a negative residual topography. Moreover, the western sector of this chain, where flysch units outcrop, shows the most extreme negative values of the residual topography. By contrary, the Eastern sector of the Betic Cordillera shows a positive residual topography. The largest positive values of residual topography are located on the western sector of Sierra Nevada, where surface elevation reaches more than 3.300 m. Precisely, this region, without a thick root/crust, has been exhumed during the last 8 Ma and has the highest Plio-Quaternary rates of incisión and elevation. We present a complete analysis of the drainage pattern and its recent evolution considering: a) the current crustal component of buoyancy: b) the buoyancy consequences of the slab rollback motion towards the west; d) the potential push up of the asthenosphere produced by the tearing and removal of the Iberian mantle lithosphere.

U-Pb detrital zircon geochronological record of the Jubrique unit and the Maláguide complex (western Betics)

Registro geocronológico U-Pb en zircones detríticos de la Unidad de Jubrique y el complejo Maláguide (Béticas occidentales)

A. Azor[1], A. Acosta-Vigil[2], C. Accotto[1,3] y N.J. Evans[4]

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada. azor@ugr.es
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, Granada. a.acosta@csic.es
3 Université Laval, Québec, Canada. accotto@ugr.es
4 School of Earth and Planetary Science, John de Laeter Centre, Curtin University, Bentley, Australia. noreen.evans@curtin.edu.au

Abstract: The detrital zircon records of the Jubrique unit (uppermost unit of the Alpujárride complex) and the overlying Maláguide complex in the western Betic Cordillera share pre-Paleozoic peaks (c. 650, 1000, 2000 and 2600 Ma), but differs in Paleozoic populations, with the upper part of the Jubrique unit containing c. 290, 350 and 475 Ma ages and the Maláguide complex only c. 350 and 475 Ma ages. This distribution suggests that the Maláguide complex would have overthrust the Jubrique unit during the Alpine orogeny. Altogether, these detrital zircon age spectra support a derivation of the studied sequences from fragments of the Iberian Massif and/or Variscan terranes of NW Africa. However, slightly different age distribution of the Paleozoic populations between the Jubrique and Maláguide samples regarding Devonian ages might imply that the former deposited close to the Cantabrian zone and NE Iberia (Iberian Massif), while the Maláguide samples probably deposited close to the Ossa-Morena Zone (Iberian Massif) or a similar terrane in NW Africa.

Key words: Detrital zircon U-Pb geochronology, Betic Cordillera, Variscan terranes, Pangea.

Resumen: *El registro de zircones detríticos de la unidad de Jubrique (unidad superior del complejo Alpujárride) y del complejo Maláguide en las Béticas occidentales comparte una serie de picos pre-paleozoicos (c. 650, 1000, 2000 y 2600 Ma), pero difiere en los picos paleozoicos, ya que la parte superior de la unidad de Jubrique contiene edades de c. 290, 350 y 475 Ma, mientras que el complejo Maláguide presenta picos de c. 350 y 475 Ma pero no el pico pérmico. Esta distribución es compatible con una superposición mediante un cabalgamiento del complejo Maláguide sobre la unidad de Jubrique durante la orogenia alpina. En conjunto, los espectros de zircones detríticos sugieren que las unidades estudiadas derivan de fragmentos del Macizo Ibérico y/o terrenos variscos del NW de África. Sin embargo, ligeras diferencias en las poblaciones paleozoicas de edad devónica podrían implicar que las muestras de la unidad de Jubrique se depositaron cerca de la Zona Cantábrica y el NE del Macizo Ibérico, mientras que las del complejo Maláguide se habrían depositado cerca de la Zona de Ossa-Morena o un terreno similar del NW de África.*

Palabras clave: *Geocronología U-Pb sobre zircones detríticos, Cordillera Bética terrenos variscos, Pangea.*

INTRODUCTION AND GEOLOGICAL SETTING

The Betic Cordillera in southern Spain and the Rif Mountains in northern Morocco are part of a strongly curved Alpine orogenic belt located at the westernmost Mediterranean. It resulted from a complex orogenic evolution involving, at least: (i) the approaching of the African and Iberian plates; (ii) the westward migration of a continental terrane (the Alborán domain or Internal Zone) located today in between the African and Iberian plates; and (iii) the east-directed subduction of a narrow domain of Mesozoic oceanic lithosphere underneath the Alborán domain, with slab retreating/tearing and back-arc extension in the overriding Alborán microplate (e.g., Platt et al., 2013). The consumption of the oceanic lithosphere led to the collision of S Iberian and N African paleomargins with the Alborán domain. During the collision, these paleomargins were inverted to form two external zones with opposite vergences (NNW in the Betic Cordillera and SSW in the Rif).

The Alborán domain is made up of a pile of units, which have been usually grouped into three tectonometamorphic complexes: Maláguide, Alpujárride and Nevado-Filábride. These complexes are made up of Paleozoic basements and Mesozoic to Cenozoic covers, all variably affected by Alpine ductile deformation and metamorphism (e.g., Platt et al., 2013). The Nevado-

Filábride complex is the lowermost unit, being nowadays reinterpreted as the leading edge of the South Iberian paleomargin, underthrusted at early Miocene time below the Alpujárride and Maláguide complexes.

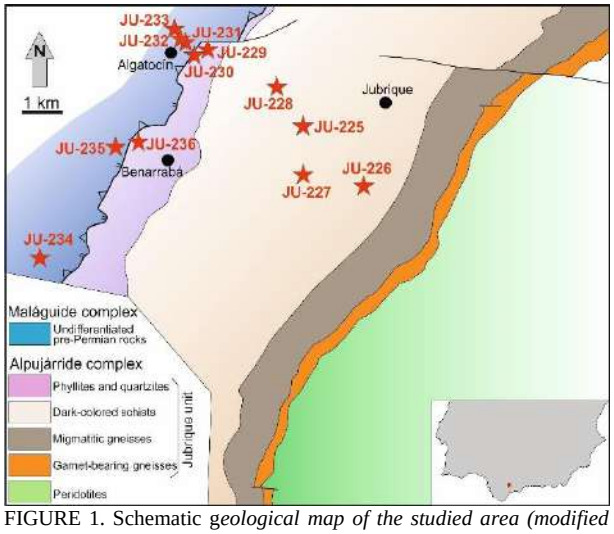


FIGURE 1. Schematic *geological map of the studied area (modified after del Olmo et al., 1980) showing the location of the studied samples. Lower left corner inset shows the geographic location of the studied area on a map of the southern Iberian Peninsula.*

The Maláguide complex (Figs. 1 and 2) occupies the uppermost structural position in the tectonic pile, and is characterized by a Paleozoic basement affected by low- to very low-grade Variscan metamorphism, and a Mesozoic to Cenozoic unmetamorphosed cover (e.g., Martín-Algarra et al., 2009).

The Alpujárride complex (Figs. 1 and 2) is sandwiched in between the overlying Maláguide complex and the underlying Nevado-Filábride complex, and is made up of a Paleozoic basement with a Permian-Mesozoic cover. In the studied section, the Alpujárride complex is represented by the Jubrique unit, which is the uppermost Alpujárride unit in the western Betic Cordillera. Here, the Alpujárride Paleozoic basement includes, from top to bottom, schists, gneisses, migmatites, as well as large lithospheric mantle slabs exposed in the western Betic Cordillera and the Rif (e.g., Balanyá et al., 1997). The cover consists of a thick Triassic sequence of marbles and limestones/dolostones, overlying Permo-Triassic phyllites with quartzite intercalations.

This contribution provides new U-Pb detrital zircon dates from the Paleozoic sequence of the Maláguide complex and the underlying Jubrique unit (Figs. 1 and 2), which represents the uppermost part of the Alpujárride complex in the western Betics. Our results contribute to refine the depositional ages of the rocks, as well as the structural relationships and paleogeographic location of the Maláguide and Alpujárride complexes (see Esteban et al., 2017, Jabaloy-Sánchez et al., 2018, and 2021, and Poulaki and Stockli, 2022, for previous data and proposals).

SAMPLES AND RESULTS

We collected 12 samples of metasiliciclastic rocks along two transects (Genalguacil-Algatocín and Gaucín-Benarrabá; Fig. 1). These rocks are interbedded with medium- to low-grade schists and phyllites in the case of the Jubrique unit, and phyllites/slates and unmetamorphosed carbonates and shales in the case of the Maláguide complex (Fig. 2; Table I). U-Th-Pb analyses were conducted using Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry at the GeoHistory Facility of the Curtin University (Perth, Australia).

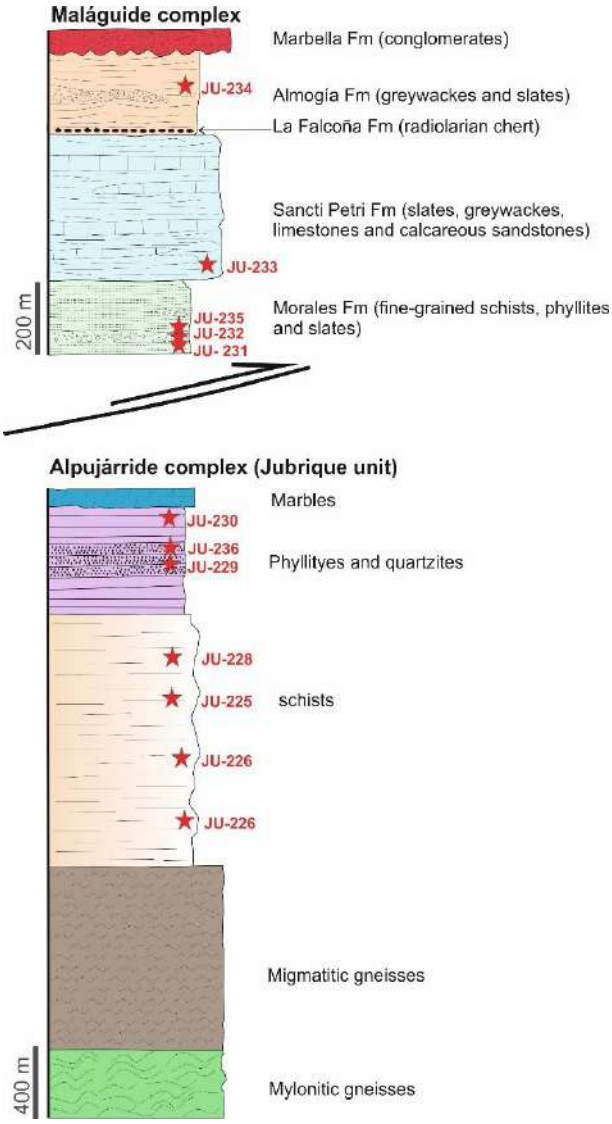


FIGURE 2. Position of the analyzed samples in the lithostratigraphic columns of the Jubrique unit and the Maláguide complex.

All of the studied samples share a common detrital zircon pattern regarding the Precambrian record (Table I), which is characterized by the occurrence of an always dominant Ediacaran-Cryogenian population (c. 30-40 % of the dates), a secondary early Tonian-Stenian population (c. 10-30 % of the dates), and minor Paleoproterozoic (c. 5-20 % of the data) and Neo-archean populations (c. 5-10 % of the data). In contrast, the Paleozoic detrital zircon distribution varies as a function of the structural location of rocks. Thus, the lowermost

samples from the Jubrique unit lack Paleozoic peaks, while the uppermost usually depict several peaks of middle Permian-middle Carboniferous (c. 5-10 % of the data), middle Carboniferous-middle Devonian (c. 2-10 % of the data), and Ordovician-Cambrian (c. 10-20 % of the data) ages. As for the Paleozoic record in the Maláguide complex samples, we note that they lack Permian detrital zircon crystals, showing usually two populations of Carboniferous-Devonian (5-15 % of the data) and Ordovician-Cambrian (10-20 % of the data) ages (Table I).

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Besides the Ediacaran-Cryogenian, Paleoproterozoic and Neoarchean detrital zircon populations, the presence of a late Mesoproterozoic peak centered at c. 1000 Ma points to the Saharan Metacraton as the most likely primary source for both the Maláguide and the Alpujárride complexes. However, the Precambrian detrital zircon grains were likely fed from intermediate repository sources in the Iberian Massif and other Variscan terranes from northern Africa.

The structurally lower Jubrique unit schists show no Paleozoic detrital zircon grains, while the upper schist, phyllite and quartzite sequence usually contains several peaks of Permian-Carboniferous, Carboniferous-Devonian, and Ordovician-Cambrian ages. Hence, this part of the sequence was probably deposited at middle-late Permian time, putatively representing a sedimentary cover unconformably overlying a Variscan basement. The lower Jubrique unit schists would have been deposited at pre-Carboniferous, but likely post-Cambrian times.

The Paleozoic detrital zircon record of the Maláguide complex lacks Permian ages, featuring only two Paleozoic populations of Carboniferous-Devonian (5-15 % of the data) and Ordovician-Cambrian (10-20 % of the data) ages (Table I). These data constrain the deposition of the entire Paleozoic Maláguide sequence at late Carboniferous, and question, therefore, the classical stratigraphy that ascribes the lower part of this complex to pre-Devonian and Devonian ages. The Flysch-like nature of the Paleozoic Maláguide sequence points to fossil redeposition and variably sized olistoliths included in a late Carboniferous sequence. Thus, our data suggests that the Paleozoic Maláguide complex rocks were deposited in a syn-to-late orogenic Variscan sedimentary basin.

The lack of Permian detrital zircon grains in the Paleozoic Maláguide samples, together with the presence of a Permian population in the underlying fine-grained schists, phyllite and quartzite Jubrique succession, have important regional implications regarding the primary relationships between these two tectonometamorphic complexes. Thus, the Maláguide complex necessarily overthrusted the Alpujárride complex during the Alpine orogeny, though these primary relationships were later obliterated due to ductile and brittle extensional deformation (Balanyá et al., 1997).

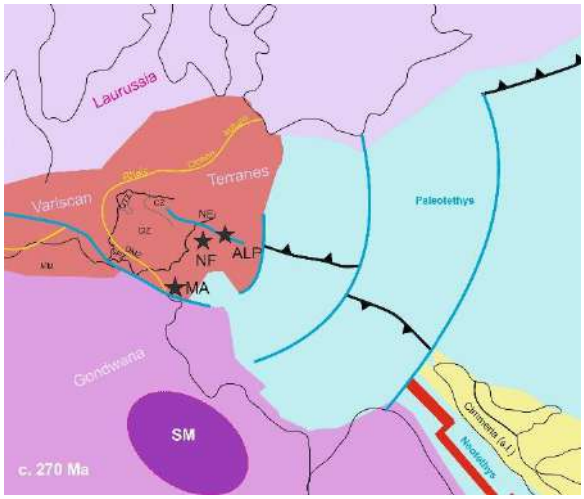


FIGURE 3. *Proposed pre-Mesozoic paleogeographic location for the Maláguide (MA), Alpujárride (ALP) and Nevado-Filábride (NF) complexes, based on our data and previously published detrital zircon ages. The Permian paleogeographic reconstruction is based on Pastor-Galán, 2022). SM: approximate location of the Saharan Metacraton, NE: Northeast Iberia, CZ: Cantabrian Zone, GTZ: Galicia – Tras-os-Montes Zone, CIZ: Central Iberian Zone, OMZ: Ossa-Morena Zone, SPZ: South Portuguese Zone; MM: Moroccan Mesetas.*

The scarce Devonian detrital zircon grains present in the Maláguide samples might be key to establish the pre-Mesozoic paleogeography of this tectonometamorphic complex. Until now, these ages have only been reported in metasediments of the Eastern Moroccan Meseta, and in the lowermost formation of the Pulo do Lobo unit cropping out at the boundary between the Ossa-Morena and the South Portuguese Zones. This fact, combined with the relative abundance of Cambrian and Ordovician detrital zircon grains in the Maláguide samples, points to a Pre-Mesozoic location of this complex close to a terrane similar to the Ossa-Morena Zone (Fig. 3), or a present-day non-exposed terrane with similar characteristics of the late Carboniferous – Permian north African margin.

According to the available detrital zircon spectra, the Nevado-Filábride and Alpujárride complexes show almost no differences, which, in turn, suggests pre-Mesozoic proximity prior to the opening of the Neotethys ocean (Fig. 3). The eastern prolongation of the Cantabrian Zone and NE Iberia are the Variscan domains that better fit with the detrital zircon content observed in the Jubrique samples and other Alpujárride units, as well as in the Nevado-Filabride complex. Thus, we interpret that these two domains were nearby at late Carboniferous – Permian time, though separated some hundreds of km from the Maláguide complex.

DETRITAL ZIRCON AGES	**MIDDLE TO LOWER JUBRIQUE UNIT** medium-grade schists (3 samples)	**UPPER JUBRIQUE UNIT** Phyllites, quartzites and medium- to low-grade schists (4 samples)	**MALÁGUIDE COMPLEX** Schists, slates, metagreywackes and metaconglomerates (5 samples)
Siderian-Neoarchean c. 2400-2700 Ma	c. 2600-2680 Ma (4-8% of the data)	c. 2590-2670 Ma (5-9% of the data)	c. 2560-2650 Ma (4-8% of the data)
Statherian-Rhyacian c. 1750-2250 Ma	c. 1805-2075 Ma (14% of the data)	c. 1870-2080 Ma (8-16% of the data)	c. 1850-2000 Ma (4-23% of the data)
Tonian-Stenian c. 850-1150 Ma	c. 985-1005 Ma (9-25% of the data)	c. 995-1025 Ma (10-16% of the data)	c. 980-1015 Ma (9-26% of the data)
Tonian c. 720-850 Ma	c. 800 Ma (10% of the data)	c. 820 Ma (11% of the data)	c. 800 Ma (5% of the data)
Ediacaran-Cryogenian c. 538-720 Ma	c. 640-690 Ma (37-42% of the data)	c. 600-650 Ma (28-32% of the data)	c. 600-635 Ma (31-39% of the data)
Silurian-Cambrian c. 420-530 Ma	Absent	*c.* 460-490 Ma (10-21% of the data)	c. 480-490 Ma (9-22% of the data)
Permian-Devonian c. 270-375 Ma	Absent	*c.* 300-330 Ma (8-16% of the data)	*c.* 345-370 Ma (7-18% of the data)
Younger detrital population	550-580 Ma	290-330 Ma	330-470 Ma

TABLE I. *Summary of U-Pb detrital zircon ages*

ACKNOWLEDGEMENTS

Funding for this study was provided by the Spanish Ministerio de Educación e Innovación and Junta de Andalucía Grants PID2019-107718GB-100, PID2020-11882GB-I00 and P20_00063. Research in the John de Laeter Centre GeoHistory Facility is enabled by AuScope (auscope.org.au) and the Australian Government via the National Collaborative Research Infrastructure Strategy (NCRIS).

REFERENCES

Balanyá, J.C., García-Dueñas, V., Azañón, J.M. y Sánchez-Gómez, M. (1997): Alternating contractional and extensional events in the Alpujarride nappes of the Alboran Domain (Betics, Gibraltar Arc). *Tectonics,* 16: 226–238.

del Olmo Sanz, A., de Pablo Macía, J.G., Aldaya, F., Campos, J., Chacón, J., García-Dueñas, V., Sanz de Galdeano, C., Orozco, M. y Torres-Roldán, R. (1980): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 1064 (Cortes de la Frontera).* IGME, Madrid.

Esteban, J. J., Cuevas, J., Tubía, J.M., Gutiérrez-Alonso, G., Larionov, A., Sergeev, S. y Hofmann, M. (2017): U–Pb detrital zircon ages from the Paleozoic Marbella Conglomerate of the Malaguide Complex (Betic Cordilleras, Spain). Implications on Paleotethyan evolution. *Lithos,* 290-291: 34–47.

Jabaloy-Sánchez, A., Talavera, C., Gómez-Pugnaire, M.T., López-Sánchez-Vizcaíno, V., Vázquez-Vílchez, M., Rodríguez-Peces, M.J. y Evans, N.J. (2018): U-Pb ages of detrital zircons from the Internal Betics: A key to deciphering paleogeographic provenance and tectono-stratigraphic evolution. *Lithos,* 318-319: 244–266.

Jabaloy-Sánchez, A., Talavera, C., Rodríguez-Peces, M.J., Vázquez-Vílchez, M. y Evans, N.J. (2021): U-Pb geochronology of detrital and igneous zircon grains from the Águilas Arc in the Internal Betics (SE Spain): Implications for Carboniferous-Permian paleogeography of Pangea. *Gondwana Research,* 90: 135–158.

Martín-Algarra, A., Mazzoli, S., Perrone, V. y Rodríguez-Cañero, R. (2009): Variscan tectonics in the Malaguide Complex (Betic Cordillera, southern Spain): stratigraphic and structural Alpine versus pre-Alpine constraints from the Ardales area (Province of Malaga). II. Structure. *Journal of Geology,* 117: 263–284.

Pastor-Galán, D. (2022): From supercontinent to superplate: Late Paleozoic Pangea's inner deformation suggests it was a short-lived superplate. *Earth-Science Reviews,* 226: 103918.

Platt, J.P., Behr, W.M., Johanesen, K. y Williams, J.R. (2013): The betic-rif arc and its orogenic hinterland: A review. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences,* 41: 313–357.

Poulaki, E.M. y Stockli, D.F. (2022). Paleotectonic evolution of the Western Mediterranean: Provenance insights from the Internal Betics, Southern Spain. *Frontiers of Earth Science,* 10: 929502.

La cara visible de los Arcos.

The visible side of Arcs.

J.C. Balanyá[1], I. Expósito[1], M. Díaz-Azpiroz[1], A. Jiménez-Bonilla[1]

1 Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla 41013. jcbalrou@upo.es, iexpram@upo.es, mdiaazp@upo.es, ajimbon@upo.es

Palabras clave: arcos tectónicos, grano orogénico, cinemática, revisión histórica.

Resumen

El grano orogénico y las alineaciones del relieve han sido, desde el siglo XIX hasta hoy, los elementos clave utilizados en la identificación y trazado de los arcos tectónicos. Ambos elementos, íntimamente relacionados en los arcos alpinos como el de Gibraltar, son los rasgos más evidentes de los cinturones arqueados. Sin embargo y pese al largo recorrido de casos analizados, son muchos los aspectos mal comprendidos acerca de su naturaleza.

Este año se cumplen 100 años de la publicación del trabajo de Argand (1924) "La Tectónica de Asia". Argand, como Carey (1955) y otros muchos después, hicieron visible lo que hasta el momento no lo era. La historia muestra que lo nuevamente perceptible resulta no solo de la calidad y número creciente de datos adquiridos de muy diferente naturaleza (estructurales, estratigráficos, geocronológicos, geofísicos, etc.). Con frecuencia aflora a través del establecimiento de nuevas relaciones entre hechos de observación que ya eran en gran parte conocidos. En relación con ello, los modelos (conceptuales, analíticos, analógicos), han jugado un papel muy importante.

Abstract

Both the orogenic grain and topographic lineaments have been, since the XIXth century, the key elements used in the recognition and mapping of tectonic arcs. Both elements, closely related in the alpine arcs like the Gibraltar one, are the most conspicuous traits of arcuate orogens. However and despite the large number of analyzed cases, many aspects of their nature remain poorly understood.

This year we celebrate the 100 years since the publication of the work by Argand (1924) "Tectonics of Asia". Argand, like Carey (1955) and many others thereafter, made visible what was previously unseen. The history has shown that what is newly visible at a given time, it is not solely grounded on the increasing acquired data of different nature (structural, stratigraphic, geochronological, geophysical, etc.). It often arises from the establishment of new connections among facts that were largely known. In this regard, models (conceptual, analytical, analogical) have played a critical role.

Referencias

Argand E. (1924). La Tectonique de l'Asie. Comptes Rendus du XIIIème Congrés Géologique International Bruxelles 1922, 1er fasc. (Liège, 1924), 171 p.

Carey S. (1955). The oroclinal concept in Geotectonics. Proceedings of the Royal Society of Tasmania, 89, 255-289.

Tectónica extensional del Mioceno superior en la costa norte de la provincia de Alicante (Cordillera Bética oriental)

Upper Miocene extensional tectonics along the northern coast of Alicante province (Eastern Betic Cordillera)

O. Bedmar[1], I. Medina-Cascales[1], M. De Ruig[2], A. Estévez[1], I. Martín-Rojas[1] y P. Alfaro[1]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03080, Alicante, Spain; ivan.medina@ua.es, pedro.alfaro@ua.es, ivan.martin@ua.es
2 Oropesa BV, 2582 LD The Hague, Netherlands; menno.deruig@gmail.com

Palabras clave: extensional tectonics, normal faults, Prebetic of Alicante, Eastern Betic Cordillera

Resumen

La Zona Externa de la Cordillera Bética oriental (Alicante) se sitúa entre varios dominios tectónicos: la Cordillera Ibérica al norte, el surco de Valencia al noreste y la Zona Interna bética al sur. Su historia tectónica se ha caracterizado por una sucesión de etapas extensionales y compresivas (De Ruig, 1992). Este trabajo se centra en el análisis de la tectónica extensional del Mioceno superior a lo largo del litoral comprendido entre la cala del Xarco (Villajoyosa) y el Cabo de la Nao (Jávea). Se desarrolló un sistema de fallas normales que cortan muchas de las estructuras de la anterior etapa compresiva, como pliegues y cabalgamientos. Estas fallas normales desplazan las rocas del Prebético de Alicante y de las cuencas miocenas, modelando la actual costa acantilada del norte de la provincia. Las orientaciones principales varían entre N030E y N080E, algunas con direcciones próximas a N-S. La dirección media de las fallas coincide con la actual línea de costa. Las trazas cartográficas de estas fallas son de unos pocos kilómetros de longitud, aunque continúan bajo el mar. Sus desplazamientos varían entre unas pocas decenas y varios centenares de metros. De las fallas estudiadas, la del Moraig (Benitatxell) es la que, con más de 500 m, tiene un mayor desplazamiento.

Abstract

The External Zone of the Eastern Betic Cordillera (Alicante) is located between several major tectonic domains: to the north, the Iberian Cordillera, the Valencia Trough to the northeast and the Internal Betic Zone to the south. Its tectonic evolution has been characterized by successive stages of compression and extension (De Ruig, 1992). We analyse the upper Miocene extensional tectonics along the coastline between Cala del Xarco (Villajoyosa) and Cabo de la Nao (Jávea). A normal fault system developed in late Miocene time, cutting many structures from the previous compressive stage, including folds and thrusts. These normal faults deformed Prebetic Mesozoic rocks as well as middle Miocene basins, shaping the northern present-day steep coastline of the province. They exhibit predominant trends which strike N030E to N080E, some trending close N-S. The average strike coinciding with the orientation of the present-day coastline. The mappable traces of these faults extend for few kilometers, although they continue offshore (Yébenes et al., 2002), with vertical displacements ranging from a few tens to several hundred meters. Among the faults previously studied, the Moraig fault (Benitatxell) stands out with over 500 m of vertical displacement.

Referencias

De Ruig, M. (1992). *Tectono-sedimentary evolution of the Prebetic fold belt of Alicante (SE Spain)*. Tesis Doctoral, Vrije Universiteit Amsterdam, 207 p.

Yébenes, A., Alfaro, P., Delgado, J., Estévez, A. y Soria, J. M. (2002). *Geomorphology* 42(3-4), 197-211.

Metamorfismo colisional en unidades nominalmente pertenecientes al Alpujárride inferior (Cordilleras Béticas)

Collisional metamorphism in nominally lowermost Alpujarride Complex Units (Betic Cordillera)

I.F. Blanco-Quintero[1], A. Martín-Algarra[2], J.M. González-Jiménez[3], A. Sánchez-Navas[4], D. Benavente[1], J.C. Cañaveras[1], A. García-Casco[3,4]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03690 San Vicente del Raspeig, España. if.blanco@ua.es, david.benavente@ua.es, jc.canaveras@ua.es
2 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. agustin@ugr.es
3 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR, 18100, Armilla, España. jm.gonzalez.j@csic.es
4 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071, Granada. asnavas@ugr.es; agcasco@ugr.es

Palabras clave: Complejo Alpujarride, metabasita, metamorfismo barroviano.

Resumen

Lacolitos, sills y diques de rocas básicas (ofitas) intruyeron en los sedimentos pérmico-triásicos de las unidades más orientales del Complejo Alpujárride Inferior (Zona Bética Interna, sur de España), asociados a la ruptura de Pangea durante el Triásico y el Jurásico. Las rocas presentan una sobreimpresión metamórfica alpina de bajo grado registrada por la neoformación de magnesioriebeckita, actinolita, albita, estilpnomelana, fengita y clorita; aunque preservan minerales relictos ígneos constituidos por augita, plagioclasa y anfíbol, presentando texturas ofíticas/subofíticas y doleríticas. Los cálculos termodinámicos indican un pico metamórfico en aprox. 6 kbar a 340 ºC, consistente con un enterramiento hasta aprox. 18 km de profundidad con gradientes térmicos aparentes intermedios de aprox. 18ºC/km. Estas condiciones indican un metamorfismo colisional (barroviano), diferente de las condiciones de facies de esquisto azul relacionadas con la subducción descritas en unidades vecinas. La ausencia de asociaciones de esquistos azules en las metabasitas descarta que las rocas hubieran alcanzado condiciones de alta presión previas a la trayectoria barroviana. Este hallazgo es similar a otras estimaciones previas de P-T en unidades del llamado Complejo Almagride, ahora considerado parte del Complejo Alpujárride Oriental. Las implicaciones de estos resultados se discuten en términos de la evolución orogénica del Cinturón Bético oriental.

Abstract

Lacoliths, sills and dikes of basic rocks (ophites) intruded the Permian-Triassic sediments of the easternmost Lower Alpujarride units (Internal Betic Zone, south Spain) during the Triassic-to-Jurassic breakup of Pangea in the region. Low-grade Alpine metamorphic overprints include magnesioriebeckite, actinolite, albite, stilpnomelane, phengite and chlorite. Thermodynamic calculations indicate metamorphic peak at approx. 6 kbar at 340 ºC, implying burial to approx. 18 km depth with intermediate apparent thermal gradients of approx. 18 ºC/km. These conditions accomplish collisional (Barrovian) metamorphism, distinctively different to subduction-related blueschist facies conditions of neighboring units. The lack of true blueschist assemblages in the metabasites rules out the achievement of high-pressure conditions previous to the barrovian path. This finding is similar to other previous P-T estimations in units of the formerly so-called Almagride Complex now considered part of the eastern Alpujárride Complex. The implications of these findings are discussed in terms of the orogenic architecture of the eastern Betic Belt.

Desde eclogitas a arañas: cómo la biogeodinámica desvela la paleogeografía del Mediterráneo occidental.

From eclogites to spiders, how biogeodynamics unveils the Western Mediterranean paleogeography.

G. Booth Rea[1], P. Mas-Peinado[2,3], J.P. Galve[1], O. Jiménez-Robles[4], J.M. Azañón[1] y C.J. Garrido[5]

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, España. gbooth@go.ugr.es
2 CNRS, Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (ISEM). Montpellier, Francia
3 Departamento de Biología (Zoología) & Centro de Investigación en Biodiversidad y Cambio Global (CIBC-UAM), Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, España.
4 Institut de Biologie, École Normale Supérieure, Paris, Francia
5 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC, Armilla, Granada, España

Palabras clave: Western Mediterranean, paleogeography, biogeography, orogenic arcs.

Resumen

El Mediterráneo occidental está enclavado entre arcos orogénicos estrechos ("*Narrow Orogenic Arcs*", NOA), que han migrado oblicuamente a la dirección de convergencia entre África–Eurasia siguiendo el retroceso de litosfera subducida. Distintos mecanismos tectónicos inherentes a los NOA han producido una evolución dinámica del relieve que ha determinado la biodiversidad de la región. En esta contribución, integramos los patrones de especiación biogeográficos con datos geológicos —trayectorias P-T-t, estratigrafía, relaciones "*source to sink*", desplazamientos tectónicos, rotaciones paleomagnéticas, el registro fósil y estimaciones de tiempos de divergencia— para desvelar la paleogeografía del Mediterráneo occidental. Esta integración muestra que el sistema de subducción-colisión paleógeno estaba segmentado, con zonas de colisión continental en los Alpes y AlKa, coetáneamente a subducción oceánica bajo Córcega y Cerdeña en el dominio PeCa y a la preservación de corteza oceánica no subducida al sur de Iberia. Tras el colapso de una transformante al WSW del dominio AlKa en el Mioceno inferior surgió el NOA Bético-Rifeño, que migró hacia el WSW, abriendo la cuenca Argelino-Balear durante el Mioceno medio y superior. De este proceso nació el "*hotspot*" de biodiversidad de las Béticas-Rif, donde eventos de especiación alopátrica aislaron a organismos terrestres y fluviales, al mismo tiempo que se producía la conexión terrestre entre continentes y archipiélagos favoreciendo la dispersión e incrementando la biodiversidad del arco.

Abstract

Narrow Orogenic Arcs (NOA) surround the Western Mediterranean, which have migrated obliquely to Africa-Eurasia plate convergence, following subducting segments of retreating lithospheric slabs. Different tectonic mechanisms inherent to NOA drove a dynamic landscape that determined the evolution of biodiversity within the region. Here, we integrate biogeographic speciation patterns with geological data, including P-T-t paths, stratigraphy, source to sink relationships, tectonic displacements, paleomagnetic rotations, fossil record and divergence time estimates, to develop a novel scenario of Cenozoic paleogeography for the Western Mediterranean. The Paleogene subduction collisional system of the western Mediterranean was strongly segmented, with continental collision developing in the Alps and AlKa domains in the Oligocene, coeval to ongoing oceanic subduction under Corsica and Sardinia, and preservation of a narrow Betic-Rif Tethys oceanic domain South of Iberia. Early Miocene transform collapse to the southwest of the AlKa domain gave birth to the westward migrating Betics-Rif NOA, opening the Algero-Balearic basin during the middle to late Miocene. This process was the birth of the Betics-Rif arc biodiversity hotspot, as allopatric-speciation events were promoted in isolating land and river biotas, at the same time that bridging across continents increased the local diversities by favoring dispersal.

Evolución térmica acoplada de la corteza inferior y el manto superior relacionada con extensión continental drástica durante el Pérmico (Cordillera Bética Occidental, S España)

Coupled thermal evolution of the lower crust and upper mantle during intense Permian continental extension (Western Betic Cordillera, S Spain)

J. Díaz-Alvarado[1], L. González-Menéndez[2], K. Hidas[2], A. Azor[3] y A. Pedrera[2]

1 Dpto. de Biología y Geología, Universidad Rey Juan Carlos, 28933 Móstoles. juan.diaza@uda.cl
2 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, 28003 Madrid. l.gonzalez@igme.es, k.hidas@igme.es, a.pedrera@igme.es
3 Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada. azor@ugr.es

Palabras clave: rift continental; migmatita de corteza inferior; unidad de Guadaiza; Peridotitas de Ronda; Cordillera Bética
Keywords: continental rifting; lower-crustal migmatite; Guadaiza unit; Ronda Peridotites; Betic Cordillera

Resumen

La revisión de la cartografía geológica en las Peridotitas de Ronda, expuestas en la parte occidental de la Cordillera Bética, revela una correlación sistemática entre las unidades metamórficas de la corteza inferior y ciertos dominios tectonometamórficos del macizo ultramáfico. Las peridotitas con espinela ±granate de los dominios de milonita Grt-Spl y de tectonita Spl, representan un dominio basal del manto que siempre aparece en contacto con gneises con granate de la unidad de Jubrique, ambas unidades involucradas en una zona de cizalla extensional. Los cálculos de equilibrio de fases realizados en estas unidades sugieren un espesor cortical *pre-rift* normal seguido de dos eventos de fusión en la base de la corteza: uno más antiguo y profundo, y otro más reciente y somero. Por otro lado, las peridotitas de espinela ±plagioclasa del dominio tectonita Pl están en contacto con migmatitas de la unidad de Guadaiza. Estas rocas corticales registran un único evento de fusión durante el adelgazamiento extremo de la corteza continental que coincide con la formación de plagioclasa en los niveles más superficiales del manto. La datación radiométrica U-Pb de circones de la serie migmatítica sugiere que este evento de fusión ocurrió alrededor de 280 Ma y afectó de manera generalizada a todas las unidades corticales situadas sobre el manto litosférico durante un proceso de *rifting* continental.

Financiado por la AEI (MICINN), PID2020-119651RB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

Abstract

Recent geological mapping in the Ronda Peridotites, exposed in the Western Betics, revealed a field correlation between lower crustal metamorphic units and specific tectono-metamorphic domains of the ultramafic massif. Mylonitic and highly tectonized spinel ±garnet peridotites of the Grt-Spl mylonite and Spl tectonite domains –originating from a thick continental lithosphere– are in contact with garnet-bearing gneisses of the Jubrique unit along a continuous extensional shear zone. Phase equilibrium calculations indicate an initial continental setting with normal crustal thicknesses, undergoing two subsequent melting events at deeper and shallower crustal conditions. In contrast, the spinel ±plagioclase peridotites (i.e., Pl-tectonite domain) –stable only at shallowest mantle levels within a highly extended continental lithosphere– are consistently found in contact with heterogeneous granites and migmatites of the Guadaiza crustal unit, recording a single melting event at the base of an extremely thin continental crust. U-Pb radiometric dating of zircons from gneisses, migmatites, and heterogeneous granites indicates a melting event around 280 Ma, suggesting a Permian high-temperature / low-to medium-pressure event uniformly affected the crustal units overlying the Ronda Peridotites during continental rifting.

Transpresión inclinada durante el emplazamiento mioceno de la Lámina Cabalgante de Alborán (Arco de Gibraltar occidental)

Inclined transpression during the Miocene emplacement of the Alborán Thrust Sheet (Western Gibraltar Arc)

M. Díaz-Azpiroz[1], J.C. Balanyá[1], M. Sánchez-Gómez[2], I. Expósito[1] y A. Jiménez-Bonilla[1]

1 Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Universidad Pablo de Olavide. Crtra. Utrera km 1, 41013 Sevilla. mdiaazp@upo.es, jcbalrou@upo.es, iexpram@upo.es, ajimbon@upo.es
2 Dpto. Geología, CEACTEMA, Campus Las Lagunillas, Universidad de Jaén, 21007 Jaén. msgomez@ujaen.es

Palabras clave: Adelgazamiento cortical, Arco de Gibraltar Occidental, Cinemática 3D, Transpresión

Resumen

Los complejos Alpujárride y Maláguide del dominio de Alborán en el Arco de Gibraltar Occidental componen una única lámina cabalgante cristalina (la Lámina Cabalgante de Alborán, ATS) que cabalgó sobre las unidades de los paleomárgenes Bético y Rifeño durante el Mioceno inferior-medio. En su parte oeste, la ATS constituye la culminación frontal de una rampa de techo que corta una columna tectono-estratigráfica de unos 11-12 km de espesor. Sobre esta rampa, las unidades Alpujárrides muestran pliegues de acomodación de falla de orientación N-S y vergencia al oeste, los cuales son coetáneos con un acortamiento vertical (adelgazamiento) del 40-60%, y lineaciones y ejes de curvatura de inclusiones en porfiroblastos (Aerden et al., 2020), ambos paralelos a los ejes de los pliegues. Las secciones paralelas a L muestran fábricas simétricas o con sentidos de cizalla inconsistentes. Desde un punto de vista puramente cinemático, interpretamos la parte oeste de la ATS como una zona de transpresión monoclínica inclinada ligeramente hacia el E, en la que las estructuras asimétricas se deben al cizallamiento simple, vergente hacia N270º-280ºE, en la rampa, el cual, en cambio, no es responsable de las lineaciones. Estas marcan la dirección de estiramiento de la componente coaxial del flujo, la cual estaría compensando al acortamiento perpendicular. Esta situación es posible solo en condiciones de transpresión dominada por el cizallamiento puro (Wk < 0.81) o ligeramente dominada por el cizallamiento simple (Wk = 0.81-0.86).

Abstract

The Alpujárride and Maláguide complexes of the Alborán Domain in the Western Gibraltar Arc compose a single, crystalline, thrust sheet (the Alborán Thrust Sheet, ATS) that was thrusted upon the Betic and Rif Paleomargin derived units during the lower-middle Miocene. At its western part, the ATS constitutes a frontal culmination wall related to a hangingwall ramp that cut across a ca. 11-12 km-thick tectono-metamorphic column. Above this ramp, the Alpujárride units present ca. N-S, west-vergent, ramp accommodation folds, which formed coevally with 40-60% of vertical shortening (thinning), and fold-axis parallel lineations and inclusion-trail curvature axes in porphyroblasts (see also Aerden et al., 2022). L-parallel sections typically yield statistically symmetric fabrics or inconsistent shear-senses. From a strictly kinematic viewpoint, we interpret the western ATS as a gently east-dipping monoclinic transpression zone where the asymmetric structures are produced by top-to-N270º-280ºE simple shearing, which is, however, not responsible for the lineations. These mark the stretching direction of the coaxial component of the flow, which would compensate zone-normal shortening. This is possible only with pure shear-dominated transpression (Wk < 0.81) or sligthly simple shear-dominated transpression (Wk = 0.81-0.86).

Referencias

Aerden, D.G.A.M., Farrell, T.P., Baxter, E.F., Stewart, E.M., Ruiz-Fuentes, A. y Bouybaouene, M. (2022). *Tectonics* 41, e2022TC007366. https://doi.org/10.1029/2022TC007366

Terminación oriental del escalón topográfico de Sierra Morena: reactivación tectónica y segmentación del relieve en el *forebulge* bético

The eastern termination of the Sierra Morena topographic step: tectonic reactivation and relief segmentation in the betic forebulge

I. Expósito[1], A. Jiménez-Bonilla[1], L. Granados[1], M. Díaz-Azpiroz[1], M. Delchiaro[2], J.L. Yanes[1], F. Moral[1], M. Della Seta[2] y J.C. Balanyá[1]

1. Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla 41013. iexpram@upo.es, ajimbon@upo.es, lgralop1@alu.upo.es, mdiaazp@upo.es, jlyancon@upo.es, fmormar@upo.es, jcbalrou@upo.es

2. Dpto. Scienze della Terra, Sapienza Università di Roma, 00185. michele.delchiaro@uniroma1.it, marta.dellaseta@uniroma1.it

Palabras clave: reactivación, rejuvenecimiento del relieve, tectónica de intraplaca, deformación bética

Resumen

Sierra Morena se localiza en el *forebulge* bético, un relieve flexural que se generó, debido a la carga ejercida por este orógeno a partir del Mioceno medio (García-Castellanos et al., 2002). Su límite meridional constituye un escarpe WSW-ENE que se sigue a lo largo de las provincias de Sevilla y Córdoba, donde presenta su mayor gradiente topográfico. Sin embargo, este escarpe termina de forma abrupta al norte de la ciudad de Córdoba, coincidiendo con el valle del río Guadalmellato. Esta terminación parece controlada por la reactivación como fallas normales de estructuras variscas NW-SE. También existen fallas normales WSW-ENE cortando afloramientos miocenos que descienden su bloque SE. Datos preliminares de sísmica pasiva tomados en la cuenca de antepaís, al pie del escarpe en esta terminación, apuntan a que esta segmentación podría involucrar al basamento de dicha cuenca. Estos datos, combinados con otros datos geomorfológicos, estructurales y de datación con cosmogénicos apuntan a que los patrones de rejuvenecimiento del relieve del *forebulge* son compatibles con una propagación intraplaca de la deformación identificada en las zonas externas béticas (Barcos et al., 2015).

Abstract

Sierra Morena is located in the Betic forebulge, a flexural relief that formed in response to the Betic orogenic load from the middle Miocene onwards (García-Castellanos et al., 2002). The southern boundary of this relief is a WSW-ENE escarpment that can be followed along the provinces of Seville and Córdoba, where it presents its greatest topographic gradient. However, this escarpment ends abruptly north of the city Córdoba at the Guadalmellato valley. This termination seems to be controlled by the reactivation as normal faults of NW-SE variscan structures. There are also WSW-ENE normal faults cutting Miocene outcrops, downthrowning their SE block. Preliminary seismic ambient noise data from the foreland basin, at the foot of the escarpment at this termination, suggest that this segmentation could involve the basement of this basin. These data, combined with other geomorphological and structural data (Expósito et al., 2022) together with cosmogenic ages, suggest that the rejuvenation patterns of the forebulge relief are compatible with an intraplate propagation of the deformation identified in the Betic external zones (Barcos et al., 2015).

Referencias

García-Castellanos, D., Fernández, M., y Torne, M. (2002), Tectonics, 21, doi: 10.1029/2001TC001339.

Expósito, I., Jiménez-Bonilla, A., Delchiaro, M., Yanes, J.L., Balanyá, J.C.., Moral-Martos, F., Della Seta, M. (2022). Earth Surface Dynamics. Doi: 10.5194/esurf-10-1017-2022.

Barcos, L., Díaz-Azpiroz, M., Balanyá, J., Expósito, I. y Jiménez-Bonilla, A. (2015), Tectonophysics, doi; 10.1016/j.tecto.2015.05.002.

Evolución de la Cresta de Alborán y Cuenca Meridional de Alborán: implicaciones sobre la tectónica de indentación en el Mediterráneo Occidental

Alboran Ridge and Southern Alboran Basin evolution: insights into indentation tectonics in the Western Mediterranean

J. Galindo-Zaldívar[1], M. Sequeira[2], F. Estrada[3] y G. Ercilla[3]

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. jgalindo@ugr.es
2 PEDECIBA (Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas), Geociencias, UDELAR. Isidoro de María 1614, 11800, Montevideo, Uruguay. msequeiracollazo@gmail.com
3 Institut de Ciències del Mar, Grupo de Márgenes Continentales, CSIC, 08003 Barcelona, España. festrada@icm.csic.es; gemma@icm.csic.es;

Palabras clave: Cuenca central de Alborán, Tectónica de indentación, Falla de Yusuf.

Resumen

La evolución de la Cresta y la Cuenca Meridional de Alborán son esenciales en el conocimiento de la tectónica de indentación asociada a la colisión de las placas de Nubia y Eurasia en el Mediterráneo occidental. El análisis de la fisiografía, estratigrafía sísmica, fallas y pliegues permite determinar la distribución espacial y temporal de las deformaciones tectónicas. Se identifican tres secuencias principales (Mioceno superior, Plioceno y Cuaternario) y dos discordancias regionales (Superficie Erosiva del Messiniense y Base de los Depósitos Cuaternarios). Durante el Mioceno superior, destacan los depocentros restringidos y aislados, controlados por un paleorrelieve volcánico, con depósitos carbonatados sobre las elevaciones y depósitos marinos profundos en la cuenca (turbiditas y hemipelagitas). El depocentro más grande se encuentra en la actual área occidental de la Cresta de Alborán, lo que indica que esta región aún no se había elevado hasta el Messiniense. En el Plioceno, se desarrolla la Cuenca Meridional de Alborán, coincidiendo con la exhumación de la cresta. Además, fueron activas las fallas de colapso normales en el flanco sur de la Cresta, deformaciones regionales en su extremo oriental y la actividad de la zona de falla de Al-Idrisi. Durante el Cuaternario, la sedimentación de contornitas contribuye al relleno de la cuenca, mientras que la elevación de la cresta continúa, y la deformación está principalmente focalizada en su extremo occidental. En este contexto es cuestionable la actividad actual de la Falla de Yusuf, en el límite oriental de la Cresta de Alborán y por lo tanto su consideración como límite de placas.

Abstract

The evolution of the Alboran Ridge and the Southern Alboran Basin is crucial for understanding indentation tectonics associated with the collision of the Nubia and Eurasian plates in the western Mediterranean. Analysis of physiography, seismic stratigraphy, faults, and folds allows determining the spatial and temporal distribution of tectonic deformations. Three main sequences (Upper Miocene, Pliocene, and Quaternary) and two regional unconformities (Messinian Erosive Surface and Base of Quaternary Deposits) are identified. During the Upper Miocene, the restricted and isolated depocenters are controlled by a volcanic paleo-relief, with carbonate deposits over elevations and deep marine deposits in the basin (turbidites and hemipelagites). The largest depocenter is situated in the current western area of the Alboran Ridge, indicating that this region had not yet risen until the Messinian. In the Pliocene, the Southern Alboran Basin develops, coinciding with the exhumation of the ridge. Additionally, there were active normal collapse faults on the southern flank of the Ridge, regional deformations at its eastern end, and activity along the Al-Idrisi fault zone. During the Quaternary, contourite sedimentation contributes to basin infilling, while ridge uplift continues, and deformation is primarily focused on the western end. In this context, the current activity of the Yusuf Fault at the eastern boundary of the Alboran Ridge is questionable, raising doubts about its consideration as a plate boundary.

Efecto de los procesos de captura fluvial en el relieve de Sierra Nevada

Effects of the river capture processes in the Sierra Nevada landscape

J.P. Galve[1], M. Viaplana-Muzas[2], C. Reyes-Carmona[3], J.V. Pérez-Peña[1,4], M. Ortuño[5], G. Booth-Rea[1,6], J.M. Azañón[1,6].

1 Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada 18071 Granada, España. jpgalve@ugr.es, , gbooth@go.ugr.es,
2 Group of Dynamics of the Lithosphere (GDL), Geosciences Barcelona (Geo3Bcn), CSIC, 08028 Barcelona, España. mviaplana@geo3bcn.csic.es
3 Dipartimento delle Scienze dell'ambiente e della Terra , Università di Milano-Bicocca, 20126 Milano, Italia. cristirecar@gmail.com
4 Instituto Andaluz de Geofísica (IAG), Universidad de Granada 18071 Granada, España. vperez@ugr.es
5 Grupo RISKNAT, Departamento de la dinámica de la Tierra y los Oceanos, Universitat de Barcelona, 08028, Barcelona, España. maria.ortuno@ub.edu
6 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR 18100 Armilla. jazanon@ugr.es

Palabras clave: geomorfología, erosión, deslizamientos, captura fluvial, nivel de base.

Resumen

Sierra Nevada es el relieve más prominente de la Península Ibérica. En 34 km se asciende desde el nivel del mar a 3479 m. La tectónica reciente ha elevado de manera rápida este gran macizo rocoso, de tal manera que su forma dómica todavía prevalece en su silueta. Su elevación y los gradientes del relieve creados han favorecido el desarrollo de procesos superficiales como la erosión glaciar, hídrica y los deslizamientos. Estos procesos modelan el relieve de la Sierra y le confieren unas características singulares: relieves suaves en las zonas altas con algunas divisorias laterales difusas, laderas de perfil convexo con desniveles de hasta 1 km, y escarpes rocosos y desfiladeros en lugares muy específicos. Cabe destacar cómo la captura fluvial progresiva de cuencas intramontañosas que rodean Sierra Nevada han activado o reactivado los procesos de erosión antes citados en diferentes zonas de la Sierra, modificando su morfología local y general. Observaciones geomorfológicas, índices geomorfométricos y recientes estimaciones de tasas de erosión ofrecen un relato complejo de cómo el relieve de la Sierra va modificando su aspecto en el tiempo.

Abstract

Sierra Nevada is the most prominent relief in the Iberian Peninsula. In just 34 km, it ascends from sea level to 3479 m. Recent tectonics have rapidly uplifted this large rock massif, so much so that its domed shape still dominates its silhouette. Its elevation and the gradients of relief created have favored the development of surface processes such as glacial and water erosion, as well as landslides. These processes shape the relief of the Sierra and give it unique characteristics: gentle reliefs in the high areas with some diffuse lateral divides, convex profile slopes with local relief up to 1 km, and rocky cliffs and gorges in very specific places. It is worth noting how the progressive fluvial capture of intramontane basins surrounding Sierra Nevada has activated or reactivated the aforementioned erosion processes in different areas of the Sierra, modifying its local and general morphology. Geomorphological observations, geomorphometric indices, and recent estimates of erosion rates offer a complex narrative of how the relief of the Sierra is changing over time.

.

Anomalías magnéticas y estructura cortical del límite meridional de la Cordillera Bética Central

Magnetic anomalies and crustal structure of the southern boundary of the Central Betic Cordillera

L. González-Castillo[1], A.M. Blanco Coronas[1], J.A. Villada Palomo[1] y J. Galindo-Zaldívar[1]

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. lgcastillo@ugr.es; jgalindo@ugr.es; ablanco@ugr.es; josepalomo404@correo.ugr.es.

Palabras clave: Anomalías magnéticas, Rocas ultrabásicas, Complejo Alpujárride, Cordillera Bética.

Resumen

El límite meridional del sector central de la Cordillera Bética está caracterizado por anomalías aeromagnéticas que constituyen dipolos con máximos al Sur y mínimos al Norte. Hacia el Oeste de la Cordillera, encontramos anomalías con una disposición similar que están asociadas a los cuerpos de rocas ultrabásicas de las unidades Alpujárrides emplazados en la corteza.

En este trabajo se han analizado las anomalías magnéticas a lo largo perfiles de dirección N-S a partir de datos intensidad del campo total medidos en superficie. Estos perfiles cruzan perpendicularmente los principales dipolos aeromagnéticos. La modelización simultánea de las anomalías aeromagnéticas y magnéticas de campo ha permitido la caracterización de la geometría y profundidad de los cuerpos anómalos responsables de dichas anomalías. Las anomalías más intensas podrían estar relacionadas con cuerpos de origen básico o ultrabásico intercalados tectónicamente entre rocas corticales de la Zona Interna de la Cordillera Bética afectadas por metamorfismo. Sobre estos cuerpos se disponen localmente esquistos del Complejo Alpujárride con elevada susceptibilidad magnética, que no llegan a justificar la elevada intensidad de las anomalías observadas. Los cuerpos básicos o ultrabásicos descritos podrían tener una naturaleza similar a las peridotitas que afloran en la Cordillera Bética occidental, probablemente emplazados en la corteza por la actividad de cabalgamientos.

Abstract

The southern boundary of the central sector of the Betic Cordillera is characterized by aeromagnetic anomalies that form dipoles with maxima to the south and minima to the north. Towards the western Cordillera, anomalies with similar features correspond to the ultrabasic rock bodies of the Alpujárride units emplaced in the crust.

This study analyses the magnetic anomalies along north-south profiles based on total field intensity data measured on the surface. These profiles cross perpendicularly the main aeromagnetic dipoles. The simultaneous modelling of the aeromagnetic and field magnetic anomalies has enabled the characterization of the geometry and depth of the anomalous bodies responsible for these anomalies. The most intense anomalies could be related to basic or ultrabasic bodies tectonically emplaced between crustal rocks of the Betic Cordillera Internal Zone, affected by metamorphism. Locally, schists of the Alpujárride Complex with high magnetic susceptibility are found over these bodies. However, they do not fully account for the high intensity of the observed anomalies. The described basic or ultrabasic bodies could be similar in origin to the peridotites outcropping in the western Betic Cordillera, probably emplaced in the crust due to thrusting activity.

Reactivación transpresiva de la falla de transferencia de Antequera

Transpressional reactivation of the Antequera transfer fault

P.P. Hernaiz Huerta[1], J. García Senz[2], A. Pedrera[2]

1 CN IGME_CSIC. c/ Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid, p.hernaiz@igme.es
2 CN IGME_CSIC. Plaza de España, Torre Norte, 41013, Sevilla, jesus.garcia@igme.es, a.pedrera@igme.es

Palabras clave: Fm Viñuela, transpresión, zona de falla de Antequera, Cordilleras Béticas

Resumen

Una reciente cartografía geológica de la Fm Viñuela en el corredor de Colmenar-Periana (provincia de Málaga) ha proporcionado nueva información sobre su estratigrafía y estructura sinorogénica controlada por la deformación del basamento subyacente. La Fm Viñuela está constituida por un miembro inferior de brechas y conglomerados desorganizados que intercalan niveles pelíticos con foraminíferos planctónicos, y un miembro superior de margas silíceas de color claro con silexitas, tufitas y turbiditas (Burdigaliense inferior). Los cantos proceden mayoritariamente del Paleozoico y, en menor medida, del Triásico Maláguide pero también se han identificado potentes paquetes de brechas calcáreas con nummulites y alveolinas procedentes de la destrucción de plataformas carbonatadas del Eoceno. El corredor tectónico de Colmenar-Periana está definido por fallas N100ºE a N130ºE con cinemática lateral dextra y fallas N60ºE a N90ºE con cinemática oblicuo-inversa. Las primeras, de 2 a 4 km de longitud, con una disposición 'en echelon' limitan zonas de relevo contractivo dentro de las cuales se desarrollan los abanicos de fallas oblicuo-inversas de dirección preferente N60ºE-N70ºE. Estas últimas aparecen imbricadas con espaciados de orden hectométrico y vergencias preferentes al S/SE dando lugar a dúplex transpresivos y estructuras en flor positivas con elevación y exposición a la erosión de los bloques de basamento. Los segmentos de falla que delimitan el corredor de Colmenar-Periana conectan con las fallas de salto en dirección dextro del borde norte de la Sierra del Torcal y del borde sur de la Sierra de las Cabras, situadas al NO de la zona de estudio, y con las fallas del borde suroeste de las sierras de Tejeda y la Almijara, situadas al SE. En su conjunto, conforman la zona de falla de Antequera que se ha interpretado como una zona de transferencia del eje del rift que separaba los márgenes conjugados sudibérico y magrebí durante el Jurásico y el Cretácico. Esta zona de falla fue reactivada en el Burdigaliense y ha quedado circunscrita a la placa superior de la zona de subducción/colisión sobre la que se ha formado la Cordillera Bética.

Abstract

A recent geological map of the Viñuela Fm in the Colmenar-Periana corridor (Málaga province) provides new insights into its stratigraphy and synorogenic structure controlled by the deformation in the underlying basement. The Viñuela Fm consists of a lower member of disorganized breccias and conglomerates interbedded with pelitic levels containing planktonic foraminifera, and an upper member composed of light-colored siliceous marls with silexites, tuffs, and turbidites (Lower Burdigalian). The clasts indicates their preferential provenance from the underlying Paleozoic and, to a lesser extent, Triassic Maláguide units. Additionally, thick packages of calcareous breccias with nummulites and alveolinas derived from the destruction of Eocene carbonate platforms have also been identified. The Colmenar-Periana tectonic corridor, is defined by N100ºE to N130ºE trending faults with dextral-lateral kinematics and N N60ºE to N90º E trending faults with oblique-inverse kinematics. The former, with 2 to 4 km in length and an "en echelon" arrangement, delimit contractional bands where oblique-reverse faults and thrusts fans with a predominant N60-N70 trend develop. These latter faults exhibit hm-scale spacing imbrication and preferential vergences to the S/SE leading to the formation of transpressive duplex and positive flower structures with uplift and exposure to erosion of the basement blocks. The fault segments delineating the Colmenar-Periana corridor conect with the dextral strike-slip faults located at the northern boundary of Sierra del Torcal and the southern edge of the Sierra de las Cabras, located NW of the study area. They also link with the faults that delimit the southwestern edge of Sierras Tejeda and Almijara, situated to the SE. Collectively these faults constitute the Antequera fault zone, interpreted as a transfer zone of the rift axis that separated the South Iberian and Maghrebian conjugate margins during the Jurassic and Cretaceous. Reactivated during the Burdigalian, this fault zone remained confined to the upper plate of the Betic subduction/collision zone.

Dataciones U-Pb en circones de rocas metadetríticas y metaígneas de la sucesión superior del Complejo Nevado-Filábride (Cadena Bética, SE España).

Zircon U-Pb ages in metadetrital and metaigneous rocks from the uppermost succession of the Nevado-Filábride Complex (Betic Chain, SE Spain).

A. Jabaloy-Sánchez[1], C. Talavera[2], V. López-Sánchez-Vizcaíno[3], M.T. Gómez-Pugnaire[4], A. Martín-Algarra[5], J.M. Fernández-Soler[4], N. Joyce Evans[6,7]

1 Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, Spain jabaloy@ugr.es
2 School of Geosciences, University of Edinburgh, UK
3 Departamento de Geología, Universidad de Jaén, Linares, Spain
4 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Granada, Spain
5 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Granada, Spain
6 School of Earth and Planetary Science/John de Laeter Center, Curtin University, Bentley, Australia.
7 John de Laeter Center, Curtin University, Bentley, Australia

Palabras clave: geocronología, ortogneis, circones metadetríticos, Complejo Nevado-Filábride.

Resumen

Hemos analizado y datado mediante U-Pb LA-ICP-MS y SHRIMP circones de rocas metadetríticas (cuarcitas) y ortogneises que forman parte de la secuencia de rocas más altas del Complejo Nevado Filábride en el norte de la Sierra de los Filabres. Dicha secuencia se sitúa sobre metapelitas con edades de depósito máximas (MDAs) de 274 ± 3 Ma (MSWD = 0.88, probabilidad = 0.45) (Jabaloy-Sánchez *et al.*, 2018). Dos cuerpos de ortogneises situados a diferentes alturas de la sucesión litológica proporcionaron edades muy similares: el primero de ellos una edad de $^{206}Pb/^{238}U$ de 275 ± 1 Ma (MSWD = 0.66, probabilidad = 0.92) y el segundo, un ortogneis alcalino leucocrático, una edad de $^{206}Pb/^{238}U$ (^{207}Pb corregido) de 274 ± 2 Ma (MSWD = 1.3, probabilidad = 0.23). Sin embargo, los circones metadetríticos obtenidos en rocas que se encuentran entre estos ortogneises tienen una MDA de 261 ± 12 Ma (MSWD=1.3, probabilidad=0.29). Esto sugiere la presencia de, al menos, tres unidades tectónicas diferentes dentro de lo que hasta ahora había sido considerado como una sola unidad tectónica en las rocas superiores del Complejo Nevado-Filábride.

Abstract

We have analysed and dated by U-Pb LA-ICP-MS and SHRIMP zircons of metadetrital rocks (quartzites) and orthogneisses from the uppermost sequence of rocks of the Nevado Filábride Complex in the northern Sierra de los Filabres. This lithological sequence is located on rocks with Maximum Depositional Ages (MDAs) of 274 ± 3 Ma (MSWD = 0.88, probability = 0.45) (Jabaloy-Sánchez et al., 2018). Two bodies of orthogneisses located at different heights within the lithological sequence yielded very similar ages: the first one has a $^{206}Pb/^{238}U$ mean age of 275 ± 1 Ma (MSWD = 0.66, probability = 0.92), and the second one, a leucocratic alkaline orthogneiss, provided a mean ^{207}Pb corrected-$^{206}Pb/^{238}U$ age of 274 ± 2 Ma (MSWD = 1.3, probability = 0.23). However, the zircons of metadetrital rocks located between these two orthogneisses yielded a MDA of 261 ± 12 Ma (MSWD = 1.3, probability = 0.29). This suggests the existence of at least three distinct tectonic units within what was previously considered as a single tectonic unit in the upper rocks of the Nevado-Filábride Complex.

Referencias

Jabaloy-Sánchez, A., Talavera, C., Gómez-Pugnaire, M.T., López Sánchez-Vizcaíno, V., Vázquez, M., Rodríguez-Peces, M.J. y Evans, N.J. (2018). *Lithos* 318-319, 244-266.

Geomorfología submarina de las plataformas adyacentes al Umbral de Camarinal (Estrecho de Gibraltar, sur de Iberia)

Geomorphological features of continental shelves adjacent to the Camarinal Sill (Gibraltar Strait, southern Iberia)

M. Luján[1], P. Daguinos[2], F.J. Lobo[3], P. Le Roy[2], M. Achab[4] y equipo científico de MORFEO

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz 11510, Puerto Real, Cádiz. maria.lujan@uca.es
2 UMR Geo-Ocean– Université de Bretagne Sud, Francia. paul.daguinos@univ-brest.fr; pascal.leroy@univ-brest.fr
3 Inst. Andaluz de Ciencias de la Tierra-CSIC, 18100 Armilla, Granada. francisco.lobo@csic.es
4 Dpto. Geology and Remote Sensing, Mohammed-V University in Rabat Marruecos. med.achab70@gmail.com

Palabras clave: Estrecho de Gibraltar, plataforma continental, procesos tectono-sedimentarios

Resumen

El Estrecho de Gibraltar es un rasgo fisiográfico construido a partir del Plioceno, formado por la inmersión local de los relieves del sur de España y del norte de Marruecos, pertenecientes a la parte frontal del Arco Orogénico de Gibraltar. En el estrecho afloran mayoritariamente las unidades del Surco de Flyschs y recubrimientos post-orogéncios (Sandoval et al., 1995). Esta incisión muestra un fondo marino irregular con depresiones y umbrales alternos (ej. Umbral de Camarinal) que unen las plataformas norte y sur. Se presenta un estudio inicial de las características geomorfológicas de las plataformas adyacentes al Umbral de Camarinal, localizadas entre 36° 05´N - 35° 49´N y 5° 48´E - 5° 36´E, a partir de datos obtenidos en las campañas oceanográficas PEG-0411 y MORFEO. A grandes rasgos, ambas plataformas presentan un sustrato constituido principalmente por formaciones arcillosas y arenosas detríticas y/o carbonáticas de origen turbidítico de las unidades de los Flyschs. En el basamento se han identificado trazas de cabalgamientos, zonas de fallas y pliegues; dichas estructuras se atribuyen al acortamiento principal del Arco de Gibraltar ocurrido durante el Mioceno y Plioceno. El basamento de la plataforma septentrional está cubierto por importantes acumulaciones de sedimento no consolidado, principalmente arenas bioclásticas y gravas postorogénicas. Por el contrario, la cobertera sedimentaria es muy reducida en la plataforma meridional del umbral. Estas diferencias se atribuyen a la actividad de procesos tectono-sedimentarios acaecidos en ambos márgenes continentales a partir del Plio-Cuaternario.

Abstract

The Gibraltar Strait is a physiographic feature built up since the Pliocene. Its evolution involved the local immersion of the reliefs of the south of Spain and the north of Morocco, belonging to the apical part of the Gibraltar Arc orogenic belt. Units of the Flysch Trough and post-orogenic deposits crop out in the strait (Sandoval et al., 1995). This incision shows an irregular seafloor with alternating depressions and sills (e.g. Camarinal Sill) that link the northern and southern shelves. The geomorphological features of the shelves adjacent to the Camarinal Sill, located between 36° 05´N - 35° 49´N and 5° 48´E - 5° 36´E, are reported here, based on data obtained during PEG-0411 and MORFEO geophysical surveys. Both shelves have a substrate mainly consisting of clayey and sandy materials, composing siliciclastic and/or calciturbiditic rocks of the Flysch units. Traces of thrusts, fault zones and folds have been identified in the basement; these structures are attributed to the main shortening of the Gibraltar Arc during the Miocene and Pliocene. In the northern shelve, the basement is covered by significant accumulations of unconsolidated sediments such as bioclastic sands and post-orogenic gravels. However, the sedimentary cover is very thin in the southern shelf of the sill. This denotes differences in the tectono-sedimentary processes that occurred on both continental margins since the Plio-Quaternary onwards.

Referencias

Sandoval, N.G., Izquierdo, F.J. y Sanz, J.L. (1995). En: *IV Coloquio Internacional sobre el enlace fijo del Estrecho de Gibraltar*. Comunicaciones 9–18.

Geometría a gran escala del adelgazamiento dúctil del complejo Nevado-Filábride durante la tectónica extensional de las Cordilleras Béticas en el Mioceno medio y superior.

Large-scale geometry of ductile thinning in the Nevado-Filabride complex during extensional tectonics of the Betic Cordilleras in the middle and upper Miocene.

J.M. Martínez Martínez[1]

1 Dpto. Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 21007 Granada.jmmm@ugr.es

Palabras clave: Nevado-Filábride, tectónica extensional, zonas de cizalla, exhumación.

Resumen

El complejo Nevado-Filábride, en la zona interna del Arco de Gibraltar, ha sufrido un episodio Eoceno-Mioceno de subducción continental, seguido por apilamiento de mantos con simultánea y posterior extensión de la corteza media y superior mediante sistemas extensionales de gran escala que incluyen un despegue basal, con superficies de falla discretas, brechas y harinas de falla asociadas, sobre el que son coalescentes sistemas de fallas normales lístricas, que extienden de manera frágil el bloque de techo del sistema. Se ha descrito la presencia de bandas de rocas miloníticas en el bloque de muro, pero su geometría y su relación con los despegues no son suficientemente conocidas. En este trabajo se presenta un análisis estructural del bloque de muro del despegue de Filabres en Sierra de los Filabres y Sierra Nevada oriental, incluyendo una sección estructural detallada según la dirección de extensión. Se constatan variaciones significativas en el espesor de las columnas nevado-filábrides, de este a oeste y un cambio gradual en las estructuras predominantes en el que, esquistosidad y clivaje de crenulación, en las áreas con grandes espesores, son reemplazadas por foliación milonítica y lineación de estiramiento, en las áreas con espesores reducidos. Existe una estrecha relación entre las rocas miloníticas y el despegue, localizándose en una zona de cizalla dúctil cuyo límite superior es frágil, discontínuo y su límite inferior es gradual. Esta zona de cizalla sería la continuación del despegue de Filabres en la corteza media y afectaría a más de 20 km de espesor estructural (perpendicular a la foliación principal), de modo que todo el sistema extensional podría justificar hasta 30 km de exhumación.

Abstract

The Nevado-Filabride complex, in the Gibraltar Arc hinterland, underwent an Eocene-Miocene episode of continental subduction, followed by nappe stacking with simultaneous and subsequent middle and upper crustal extension through large-scale extensional systems. These include a basal detachment, with discrete fault surfaces, and associated breccias and fault gouges, on which sets of listric normal faults, that brittlely extend the detachment hanging wall, coalesce. Mylonitic rock bands occur in the footwall, but their geometry and relationship with the detachments are not sufficiently known. This work presents a structural analysis of the Filabres detachment footwall in Sierra de los Filabres and eastern Sierra Nevada, including a detailed structural section along the extension direction. Significant variations in the thickness of the Nevado-Filábride columns are observed, from east to west, accompanied by a gradual change in the predominant structures, where schistosity and crenulation cleavage in areas with great thickness are replaced by a mylonitic foliation and stretching lineation in areas with reduced thickness.There is a close relationship between the mylonitic rocks and the detachment, with a zone of ductile shear whose upper limit is brittle, discontinuous and its lower limit is gradual. This shear zone would be the continuation of the Filabres detachment in the middle crust and would affect more than 20 km of structural thickness (perpendicular to the main foliation), so that the entire extensional system could justify up to 30 km of exhumation.

Subducción de segmentos oceánicos e inversión de sus márgenes conjugados en la Cordillera Bética

Oceanic subduction and inversion of conjugate margins in the Betic Cordillera

A. Pedrera[1], J. García-Senz[1], B. López-Mir[2], A. Ruiz-Constán[1], C. Marín-Lechado[1], A. Azor[3], J. Díaz-Alvarado[2], P.P Hernaiz Huerta[1], L. González-Menéndez[1], A. Ramos[4], C. Ayala[5], K. Hidas[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, a.pedrera@igme.es

2 Dpto. de Biología y Geología, Universidad Rey Juan Carlos, 28933 Móstoles.

3 Universidad de Granada, 18071 Granada.

4 Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante, 03080, Alicante

5. Geosciences Barcelona - CSIC, 08028 Barcelona

Palabras clave: Rifting; Inversión; Herencia tectónica; Tectónica salina; Arco de Gibraltar

Resumen

Este estudio reexamina la estructura y evolución geodinámica de la Cordillera Bético-Rifeña con especial atención al control que ejercen las estructuras heredadas de los ciclos de rifting mesozoicos y los procesos de tectónica salina. Diez cortes geológicos a escala cortical ilustran las principales características del orógeno, las variaciones laterales de su estructura y la evolución 4D de la deformación. Además de la cartografía ya disponible, durante su elaboración se han utilizado mapas geológicos nuevos, perfiles de sísmica de reflexión y sondeos profundos, datos gravimétricos, magnéticos y paleomagnéticos. Las conclusiones más relevantes indican que: (i) El orógeno resulta de la subducción de un dominio estrecho de corteza oceánica, que da paso a un *rift* fallido hacia el este, y de la incorporación de los márgenes pasivos conjugados a la colisión. (ii) El paleo-margen sudibérico ocupa la placa inferior (Z. Externas y C. Nevado-Filábride) y el magrebí la superior (C. Alpujárride y Maláguide). (iii) La cobertera mesozoica invertida de ambos márgenes está preservada en el orógeno: el Subbético Externo y Medio, Dom. Intermedio y el Prebético sobre el paleo-margen sudibérico; y el Subbético Interno, las Unidades Frontales y la cobertera maláguide sobre el paleo-margen magrebí. (iv) Potentes secuencias evaporíticas triásicas favorecen los procesos de tectónica salina antes y durante la orogénesis en la parte occidental y oriental de la cordillera. (iv) Fallas de transferencia ENE-OSO heredadas del rifting segmentan el orógeno. (v) La subducción de corteza oceánica está restringida al dominio occidental y limitada por una *tear* lateral asociada a la zona de transferencia de Antequera (vi) En este sector, el frente de subducción está marcado por unidades pelágicas situadas al norte del Subbético Interno. (vii) El acortamiento de la cordillera aumenta de este a oeste y está variación explica las importantes rotaciones paleomagnéticas dextrales de eje vertical observadas en las Béticas.

Abstract

This study has re-evaluated the development of the Betic-Rif system mostly focusing on the impact of rift-related inherited structures and salt tectonics. Available data and new geological mapping, together with seismic, borehole, gravity, magnetic and paleomagnetic data allowed us to provide ten crustal-scale detailed cross-sections that illustrate the main features of the orogen. Cross-section restoration allows the reconstruction of the pre-shortening template and the 4D evolution of the orogenesis. Our main conclusions are: (i) The orogen results from the subduction of a narrow oceanic basin, laterally evolving into a failed rift towards the E?, and the incorporation of the conjugated passive margins into the collision. (ii) The South-Iberian paleo-margin as the lower plate (External Z. and Nevado-Filábride C) and the Maghrebian as the upper plate (Alpujárride and Maláguide C.). (iii) The inverted mesozoic cover of both margins are preserved within the orogen: the External and Median Subbetic, Intermediate Zone and Prebetic over the South-Iberian paleomargin, and the Internal Subbetic, Frontal Units and the Malaguide cover over the Maghrebian margin. (iv) Kilometer-thick Triassic evaporites promote a salt tectonic style before and during collision in the western and eastern sector of the orogen. (iv) ENE-WSW rift-related transfer zones segmented the fold-and-thrust belt. (v) Subduction of oceanic crust restricted to the western domain limited by the Antequera transfer zone reactivated as a lateral tear. (iv) The subduction trench is marked by pelagic units and located north of the Internal Subbetic. (iv) The east-to-west increase in shortening explains the documented dextral vertical axis paleomagnetic rotations in the Betics.

El arco que quedó atrás

The arc that was left behind

M. Sánchez-Gómez[1], L.A. Pérez-Valera[1,2], J.J. Villalaín[2] y F. Pérez-Valera[3]

1 Dpto. Geología, CEACTEMA, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071 Jaén. msgomez@ujaen.es
2 Dpto. Física. Universidad de Burgos, Plaza Misael Bañuelos, s/n. 09001 Burgos. laperez@ujaen.es. villa@ubu.es
3 Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03690 S.Vicente del Raspeig, Alicante. fperez@ua.es

Palabras clave: Cordillera Bética, Arco de Gibraltar, paleomagnetismo, Falla de Socovos.

Resumen

El arco de Gibraltar es la estructura más característica del orógeno Bético-Rifeño, tanto es así que ha llegado a convertirse en su epónimo. Sin embargo, en la rama bética del orógeno, el arco de Cazorla-Alcaraz (ACA) forma una estructura arqueada igualmente reconocible en la cordillera, pero con una posición que puede considerarse retrasada respecto al avance de las estructuras hacia el oeste. El ACA está constituido por un clásico y aparentemente sencillo cinturón de pliegues y cabalgamientos de tectónica de piel fina. No obstante, en su parte nororiental, las estructuras del ACA muestran un giro de 90º cuyo mecanismo de formación no está bien establecido, y se desconoce si es similar al propuesto para otras rotaciones en las Béticas. La existencia y funcionamiento de la falla de Socovos, una falla de desgarre dextra en conexión con estructuras litosféricas (Pérez-Valera et al., 2013), podría tener relación con parte o la totalidad del giro observado en el ACA. Por otro lado, la terminación abrupta hacia el suroeste del ACA, su probable rebasamiento y su conexión con el resto de la cordillera sigue sin estar bien explicada, aun existiendo estructuras significativas como las fallas de Tíscar y Collejares. En este sentido, se han identificado arcos tectónicos menores limitados por fallas de transferencia dextras en el Alto Guadalquivir (Pérez-Valera et al., 2017), una vez superado el ACA por el sur, que sería necesario conectar genéticamente al propio ACA. En definitiva, quedaría aún por determinar si el retraso de ACA con respecto al arco de Gibraltar es un desfase temporal o paleogeográfico para poder mejorar los modelos tectónicos y que el ACA no quede atrás en el conocimiento de la cordillera.

Abstract

The Gibraltar arc is the most characteristic structure of the Betic-Rif orogen, that has become its eponym. However, in the Betic branch of the orogen, the Cazorla-Alcaraz arc (ACA) forms an equally recognizable arched structure, but with a position that can be considered delayed with respect to the advance of the structures towards the west. The ACA is constituted by a classic and apparently simple fold and thrust belt of thin-skinned tectonics. However, in its northeastern part, the ACA structures present a 90º rotation whose genesis is not clear, nor if it is similar to that proposed for other rotations in the Betic cordillera. The Socovos fault, a strike-slip dextral fault linked with a lithospheric tear fault, (Pérez-Valera et al., 2013), could be related to part or all of the rotation observed in the ACA. On the other hand, the abrupt southwest ACA ending, its probable overlap, and its connection with the rest of the mountain range remain poorly explained, despite the existence of notable structures such as the Tíscar and Collejares faults. In this sense, minor tectonic arches limited by dextral transfer faults have been identified in the Upper Guadalquivir (Pérez-Valera et al., 2017), just beyond the ACA. Establishing the relationships between this Upper Guadalquivir arcs and the ACA itself remain pending. In short, it remains to be determined whether the delay of the ACA with respect to the Gibraltar Arc is a temporal or paleogeographic lag, in order prevent the ACA from being left behind in the tectonic models of the Betic mountain range.

Referencias

Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-López, A. y Pérez-Valera, L.A. (2017). *Tectonics* 36(6), 1006-1036.

Pérez-Valera, L.A., Rosenbaum, G., Sánchez-Gómez, M., Azor, A., Fernández-Soler, J.M., Perez-Valera, F. y Vasconcelos, P.M. (2013). *Lithos* 180, 252-263.

Paleomagnetismo, remagnetizaciones y rotaciones de eje vertical en la rama norte del Arco de Gibraltar. Nuevos enfoques y nuevos datos.

Palaeomagnetism, remagnetizations and vertical axis rotations in the northern branch of the Gibraltar Arc. New approaches and new data.

J.J. Villalaín[1], P. Calvín[1], L.A. Pérez-Valera[1], V.C. Ruiz[2], A. Casas[3], T. Román[3], A. Crespo-Blanc[4] y M.L. Osete[2]

[1] Departamento de Física, EPS, Univ. de Burgos, Av. Cantabria, s/n, 09006 Burgos. villa@ubu.es, pcalvin@ubu.es, laperez@ubu.es.
[2] Departamento de Física de la Tierra AAI, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense, Madrid, vcarlos@ucm.es, mlosete@fis.ucm.es
[3] Departamento de Ciencias de la Tierra. Grupo de investigación Geotransfer (IUCA). Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza, acasas@unizar.es, mtdjrb@unizar.es.
[4] Dpto. Geodinámica, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva s/n, 41013 Granada, acrespo@ugr.es

Palabras clave: Paleomagnetismo, Cordilleras Béticas, Arco de Gibraltar, Remagnetización, Rotación de eje vertical

Resumen

El orógeno Betico-Rifeño y su principal elemento estructural, el Arco de Gibraltar, es el resultado de la convergencia Europa-África en el mediterráneo occidental y ha sido en las últimas décadas objeto permanente de investigación y de debate científico. La década de los años 90 fue muy productiva en cuanto a la generación de datos que sirvieran para constreñir los modelos de evolución propuestos. En particular, varios grupos abordaron estudios paleomagnéticos en diferentes áreas, materiales, edades y contextos tectónicos, poniendo de manifiesto distintos patrones de rotaciones de eje vertical. En las Béticas occidentales (rama norte del cierre del arco) se realizaron estudios paleomagnéticos en calizas marinas del jurásico superior que mostraron sistemáticamente una remagnetización sinorogénica que en muchos casos coexiste con una magnetización jurásica primaria. Ambas componentes muestran amplias rotaciones de eje vertical dextrales posteriores a la magnetización secundaria. Desde entonces nuestro grupo de investigación ha implementado nuevas técnicas de interpretación de remagnetizaciones regionales sintectónicas como la de las Béticas. En este trabajo se hace una revisión de los datos existentes a la luz de estas nuevas técnicas. Además, se presentan nuevos resultados obtenidos en 24 estaciones paleomagnéticas en rocas jurásicas y cretácicas, la mayoría de ellas de la fm. Capas Rojas, extraídas y analizadas en los años 90 y aún inéditas. También se muestran nuevos resultados paleomagnéticos y de ASM obtenidos en 14 estaciones más, procedentes de una campaña de muestreo reciente. Financiación: PID2019-108753GB-C2.

Abstract

The Betic-Rif orogen and its main structural feature, the Gibraltar Arc, is the result of the European-African convergence in the western Mediterranean and has been a permanent object of research and scientific debate in recent decades. The decade of the 1990s was very productive in terms of the generation of data that served to constrain the proposed models of evolution. In particular, several groups addressed palaeomagnetic studies in different areas, materials, ages and tectonic contexts, revealing diverse patterns of vertical axis rotations (VAR). In the Western Betics (northern branch of the arc), palaeomagnetic studies on Upper Jurassic marine limestones systematically showed a synorogenic remagnetization that in many sites coexists with a primary Jurassic magnetization. Both components show extensive dextral VAR generated after the secondary magnetization. In recent years, our research group has developed new techniques for the interpretation of regional syntectonic remagnetisations such as the Betic one. In this paper we review published data in the light of these new techniques. In addition, new results obtained in 24 palaeomagnetic sites in Jurassic and Cretaceous rocks, most of them from the *Capas Rojas* fm. analysed in the 1990s and still unpublished, are presented. New paleomagnetic and AMS results from 14 additional stations from a recent sampling is also presented. Funding: PID2019-108753GB-C2.

Evidencias de un campo de bloques generado por tsunami en terrazas marinas del Estadio Isotópico MIS 3 de la costa del Desierto de Atacama (norte de Chile)

Evidence of paleotsunamis from boulder fields in marine terraces of the isotopic stage MIS 3 on the Atacama Desert coast (northern Chile)

M.Abad[1,2], T. Izquierdo[1,2], N. Pereira[1,2], F. Ruiz[3], J. Rodríguez-Vidal[3]

1 Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Universidad Rey Juan Carlos, c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles (España); manuel.abad@urjc.es; tatiana.izquierdo@urjc.es; n.pereira.2023@urjc.es
2 Grupo de investigación en Dinámica de la Tierra y Evolución del Paisaje (DYNAMICAL), Universidad Rey Juan Carlos, c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles (España).
3 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Huelva, Campus del Carmen, 21007, Huelva (España). ruizmu@uhu.es; jrvidal@uhu.es

Resumen: Se describe un campo de bloques en los depósitos de una terraza marina datada en el MIS 3 en el P.N. Pan de Azúcar (zona costera del Desierto de Atacama meridional). Los bloques (algunos con diámetro >3 m) aparecen intensamente colonizados por cirrípedos en posición de vida. En conjunto, el campo de bloques tapiza una marcada superficie erosiva desarrollada sobre depósitos bioclásticos de naturaleza transgresiva y, a su vez, son recubiertos y englobados en facies arenosas que registran la regresión de los sistemas litorales. Este tipo de registros permite ampliar el catálogo de tsunamis generados en el Cuaternario reciente del Desierto de Atacama, donde los trabajos destinados a identificar e interpretar eventos marinos de alta energía es limitado en comparación a otras zonas de Chile. Además, se pone en evidencia la recurrencia de tsunamis y grandes terremotos en este segmento de la zona de subducción entre las placas de Nazca y Sudamérica más allá del Holoceno, circunstancia que también ha recibido escasa atención hasta la fecha.

Palabras clave: Tsunami, Campo de bloques, Terraza marina, Desierto de Atacama, Chile

Abstract: *A boulder field is described in marine terrace deposits dated to MIS 3 in the Pan de Azúcar National Park (coastal sector of the southern Atacama Desert). The boulders (up to 3 m in diameter) are intensely colonized by cirripeds in a life position. All cover an erosive surface sculptured on transgressive bioclastic deposits and are overlaid and encompassed in sandy facies that record the regression of littoral systems. This type of record allows the expansion of the catalog of recent Quaternary tsunamis of the Atacama Desert, where efforts to identify and interpret high-energy marine events in the geological record are limited compared with other areas of Chile. Additionally, the recurrence of tsunamis and megathrust earthquakes in this subduction segment of the Nazca and South American plates is highlighted, a circumstance that has also received scant attention to date.*

Key words: *Tsunami, Boulder field, Marine terrace, Atacama Desert, Chile*

INTRODUCCIÓN

Las terrazas marinas del norte de Chile han recibido una especial atención en los últimos años debido a su excelente estado de conservación y el interés que suscitan como posibles marcadores de levantamiento tectónico del borde costero (Martinod *et al.*, 2016; entre muchos otros). Recientemente, se ha puesto de manifiesto una tasa de elevación tectónica acelerada en el extremo meridional del Desierto de Atacama (González-Alfaro *et al.*, 2018), con valores muy superiores a los previamente publicados para el Pleistoceno de esta región. Esta tectónica de elevación tan intensa ha permitido la emersión de depósitos marinos asignados por datación de radiocarbono al MIS 3, que en la actualidad se encuentra sumergidos a profundidades de -70 a -40 m a lo largo de la mayor parte de las costas del planeta (Pico *et al.*, 2016).

El acceso a estos depósitos constituye una oportunidad única para reconstruir la historia geológica reciente de este margen activo, donde la continua y rápida subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana ha producido, en tiempos históricos y a lo largo del Cuaternario reciente, terremotos y tsunamis de gran magnitud. En este trabajo se describen y analizan los depósitos de un posible tsunami registrado en la terraza marina más baja en el Parque Nacional (P.N.) de Pan de Azúcar (norte de Chile), permitiendo ampliar el registro de este tipo de eventos marinos de alta energía varios miles de años atrás en este sector costero.

LOCALIZACIÓN

El área de estudio se localiza en el litoral del P.N. Pan de Azúcar (Fig. 1). La costa en este sector se clasifica como micromareal, con un oleaje dominante del SO con alturas significantes de 2,04 m (Abad *et al.*, 2020). La altura máxima registrada para el oleaje de tormenta es de 4,26 m. Específicamente, la zona de trabajo se ubica en el paraje de Playa Piqueros, frente a la isla de Pan de Azúcar, donde se forma una bahía con una estrecha playa arenosa, delimitadas por espolones rocosos, que se encuentra protegida del oleaje de buen tiempo y de tormentas.

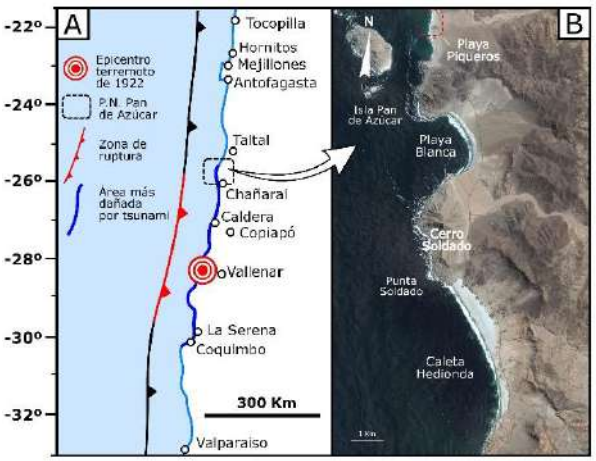


FIGURA 1. *A) Localización de la zona de estudio en la costa del sur del Desierto de Atacama a lo largo del segmento de subducción de Atacama. B) Ubicación de la zona de estudio, delimitada con un cuadrado rojo, donde se describe el depósito de campos de bloques Pleistoceno.*

La geología de este sector de la Cordillera de la Costa se caracteriza por la presencia de un basamento metamórfico de edad Paleozoica, intruido por cuerpos plutónicos de edad Pérmico-Jurásico. Sobre los anteriores se disponen mediante inconformidad retazos de formaciones neógenas detríticas costeras y diferentes formaciones superficiales continentales y marinas de edad cuaternaria, como playas, abanicos aluviales y campos dunares. Hacia tierra es frecuente la aparición de un acantilado costero, de escasa altura, labrado en el sustrato neógeno, y de terrazas marinas de edad Pleistoceno superior, cuyo límite inferior cerca de la costa varía entre los 5 y 9 m s.n.m. y que han sido fechadas en ~44 ka (Izquierdo *et al.*, 2020).

Es precisamente en una de estas terrazas donde se han identificado los depósitos de un posible paleotsunami conformado por un campo de bloques. De manera coincidente, esta terraza marina experimenta erosión por acción de un gran tsunami mucho más reciente, que forma otro depósito de campos de bloques sobre la propia terraza y que ha sido asignado, en base a sus características morfo-sedimentarias y crónicas históricas, al último gran tsunami histórico que afectó a la región de Atacama en el año 1922 (Abad *et al.*, 2023).

RESULTADOS

La sucesión sedimentaria en la terraza marina (Figs. 2 y 3), de muro a techo, se inicia con un paquete de 45 cm de potencia, de morfología irregular y base erosiva. En su base presenta numerosos clastos de longitud máxima de 12 a 32 cm, redondedados a subredondeados, formados por rocas plutónicas y metamórficas (nivel I). El tamaño de los clastos disminuye de base a techo. Abundan en la matriz arenosa los restos de cirrípedos y ostreidos. Sobre esta capa, se observa un nivel de calcarenitas bioclásticas, masivas, de 25 cm, en aparente continuidad sedimentaria (nivel II). En contacto neto y ligeramente erosivo, se superpone un nivel de areniscas calcáreas, de tamaño de grano de fino a medio, ligeramente bioclásticas, con una marcada laminación horizontal y buzamiento de bajo ángulo hacia mar (nivel III). Su espesor y geometría lateral es muy variable, llegando a alcanzar un espesor máximo de 40 cm, o casi desaparecer por completo hacia el sur.

Tapizando esta superficie erosiva aparecen decenas de bloques redondeados a subangulosos de grandes dimensiones (algunos de más de 3 m de diámetro) que se distribuyen formando una orla de amplia continuidad lateral (> 250 m) a lo largo todo el escarpe que delimita la terraza hacia mar. Varios de estos bloques se encuentran tapizados por colonias del cirrípedo *Austromegabalanus psittacus*, en general muy bien conservados. La superficie basal sobre la que descansan los bloques es muy irregular y llega a erosionar por completo el nivel III en algunos puntos, poniendo en contacto de forma directa los niveles II y IV (Fig. 3). Los bloques son de diversa naturaleza litológica (tonalitas, andesitas y paragneis). Todos ellos se encuentran englobados en un paquete de sedimentos arenosos de 90 cm y morfología tabular, que los recubren casi por completo, "fosilizando" el depósito. Se tratan de arenas medias a gruesas, muy bioclásticas y estratificación cruzada planar de alto ángulo orientada hacia mar (>30º) y en surco (Nivel IV).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La secuencia sedimentaria descrita se corresponde con la sucesión transgresiva clásica delimitada en su base por un depósito residual (Posamentier y Allen, 1999), o *lag* transgresivo, al que se superponen depósitos de playa progradante. Una vez el nivel del mar se ha estabilizado, o la tasa de ascenso del nivel del mar se ralentiza, los sistemas litorales migran hacia la cuenca marina si el volumen de sedimentario aportado al sistema litoral es suficiente como para rellenar el espacio de acomodación. Se genera entonces una secuencia regresiva en que los depósitos transgresivos son recubiertos por las facies costeras. Las características sedimentarias descritas en los niveles III y IV se corresponden con las típicas facies de *foreshore* y *shoreface* superior de playas arenosas micromareales dominadas por oleaje (Dabrio, 1982). Por otro lado, el elevado ángulo de las estratificaciones cruzadas planares, conformando sets de crestas de playas progresivamente más jóvenes y a cotas topográficas más bajas hacia mar, ha sido interpretado en terrazas marinas del norte de Chile como el registro de regresiones forzadas, probablemente asociadas a un levantamiento tectónico rápido de origen sísmico de la costa (Cantalamessa *et al.*, 2006).

Es evidente que la particularidad de estos depósitos de terraza es el nivel de bloques que, muy probablemente, registra un evento tsunamigénico que ha sido fechado en el Pleistoceno superior (~ 44 ka) a partir de su fauna intermareal incrustante (NIVEL IV en Fig. 3) (Izquierdo *et al.*, 2020). Las características de este depósito son asimilables a los campos de bloques generados por tsunamis recientes descritos en otras zonas del norte de Chile, como Bahía Cisne (Abad *et al.*, 2020), en las terrazas marinas de Caldera (Carballeira *et al.*, 2022), o

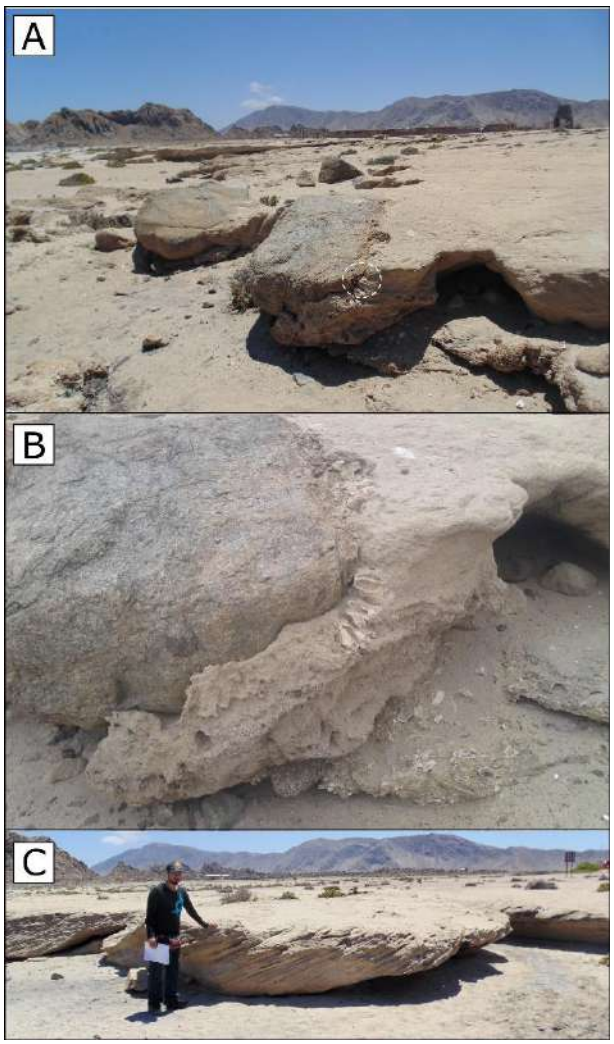


FIGURA 2. *A) Fotografías del campo de bloques pleistoceno en los depósitos de terraza marina (nivel IV en figura 3). A) Campo de bloques englobados en las arenas con estratificación cruzada. El círculo indica la presencia de colonias de cirrípedos en posición de vida. B) Detalle de las colonias de cirrípedos. C) Arenas con estratificación cruzada planar de alto ángulo registrando la rápida progradación de los sistemas litorales sobre el campo de bloques.*

incluso en unidades geológicas plio-pleistocenas de Hornitos (Hartley *et al.*, 2001). Esta situación permite reconocer el campo de bloques Pleistoceno de Pan de Azúcar como uno de los eventos marinos de alta energíamás antiguo descritos en el Cuaternario chileno. Aunque el área fuente de los bloques no ha podido ser establecida con precisión, dada su naturaleza litológica, forma y tamaño, se infiere un origen local, en zonas sumergidas o intermareales cercanas donde afloran estos materiales ígneos y metamórficos, específicamente en los cabos rocosos que delimitan la propia ensenada. Determinar si la colonización de los bloques por parte de los cirrípedos fue anterior o posterior a su transporte por causa de las olas de tsunami es muy complicado, si bien la posición exclusiva de los individuos epibentónicos en la parte superior de los bloques y su excelente estado de conservación parece registrar una colonización post-evento en un contexto intermareal. El avance posterior de la línea de costa recubre todo el conjunto y ha favorecido su preservación en los depósitos de terraza.

El análisis de los depósitos de las terrazas marinas asignadas al estadio isotópico MIS 3 en el sector costero del Desierto de Atacama meridional permite ampliar el catálogo de tsunamis que se han generado en esta zona durante el Cuaternario reciente y establecer nuevos escenarios y contextos en los quedan preservados diferentes de los actuales. La búsqueda y datación de otros eventos tsunamigénicos en terrazas marinas del MIS 3 lo largo de este segmento litoral facilitará la identificación de grandes terremotos en el registro geológico y su correlación regional en secuencias sedimentarias que están sumergidas decenas de metros en la mayor parte de las costas del planeta en el presente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Germán Carrasco su ayuda en la campaña de campo y a Pablo Silva la revisión del trabajo. Este trabajo es una contribución de los proyectos DIUDA Programa Inserción Nº22365 de la Universidad de

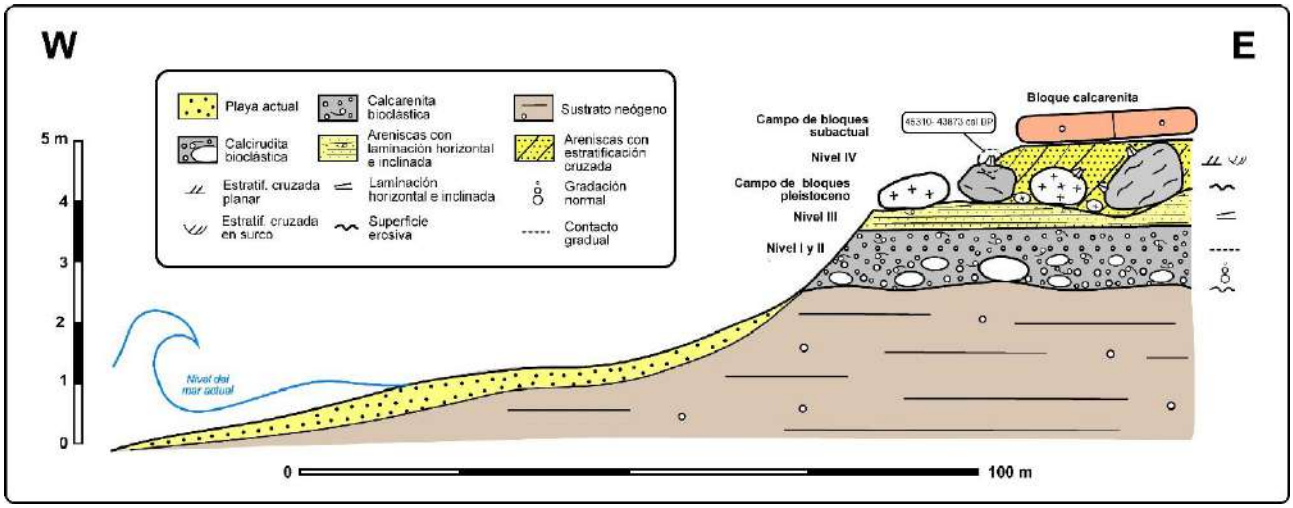


FIGURA 3. *Corte esquemático de la terraza marina baja donde se intercala el campo de bloques formado por un paleotsunami en zona de estudio. La datación del balánido en posición de vida incluida en el nivel IV está tomada de Izquierdo et al., (2020).*

Atacama (Chile), TSUARA (M2615) de la Universidad Rey Juan Carlos y TRAMPA (PID2021-127268NB-100) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER/UE.

REFERENCIAS

Abad, M., Izquierdo, T., Cáceres, M., Bernárdez, E. y Rodríguez-Vidal, J. (2020): Coastal boulder deposit as evidence of an ocean-wide prehistoric tsunami originated on the Atacama Desert coast (northern Chile). *Sedimentology*, 67: 1505-1528.

Abad, M., Izquierdo, T., Forch, M., Cortés, P., Easton, G., González-Alfaro, J. Alvarado-Justo, A. y Ruiz, F. (2023): El registro de tsunamis en costas áridas: 100 años después del tsunami de 1922 de Atacama en el norte de Chile. *Geogaceta*, 74: 47-50.

Carballeira, R., Peña-Monne, J.L., Otero, X.L., Sampietro-Vattuone, M.M., Castro-Correa, C.P., Soto-Bauerle, M.V. y Pérez-Alberti, A. (2022): Paleotsunami evidence in the Bahía Inglesa coast (Atacama, Chile) based on a multi-approach analysis. *Environmental Earth Sciences*, 81: 153.

Cantalamessa, G., Di Celma, C., y Ragaini, L. (2006): Tectonic controls on sequence stacking pattern and along-strike architecture in the Pleistocene Mejillones Formation, northern Chile: implications for sequence stratigraphic models. *Sedimentary Geology*, 183(1-2): 125-144.

Dabrio, C.J. (1982): Sedimentary structures generated on the foreshore by migrating ridge and runnel systems on microtidal and mesotidal coasts of S Spain. *Sedimentary Geology*, 32(1-2): 141-151.

González-Alfaro, J., Vargas, G., Ortlieb, L., González, G., ruiz, S., Báez, J.C., Mandeng-Yogo, M., Caquineau, S., Álvarez, G., del Campo, F. y del Río, I. (2018): Abrupt increase in the coastal uplift and earthquake rate since ~ 40 ka at the northern Chile seismic gap in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 502: 32-45.

Hartley, A., Howell, J., Mather, A.F., y Chong, G. (2001): A possible Plio-Pleistocene tsunami deposit, Hornitos, northern Chile. *Revista Geológica de Chile*, 28(1): 117-125.

Izquierdo, T., Carrasco, G., Rodríguez-Vidal, J., Ruiz, F. y Abad, M. (2020): Geomorfología y evolución geológica reciente del litoral del Parque Nacional Pan de Azúcar (norte de Chile). *Geogaceta*, 67: 111-114.

Martinod, J., Regard, V., Riquelme, R., Aguilar, G., Guillaume, B., Carretier, S., Cortés-Aranda, J., Leanni, L. y Hérail, G. (2016): Pleistocene uplift, climate and morphological segmentation of the Northern Chile coasts (24 S–32 S): Insights from cosmogenic 10Be dating of paleoshorelines. *Geomorphology*, 274: 78-91.

Pico, T., Mitrovica, J. X., Ferrier, K. L. y Braun, J. (2016): Global ice volume during MIS 3 inferred from a sea-level analysis of sedimentary core records in the Yellow River Delta. *Quaternary Science Reviews*, 152: 72-79.

Posamentier, H.W. y Allen, G.P. (1999): *Siliciclastic sequence stratigraphy—concepts and application. Concepts in Sedimentology and Paleontology*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, 210 p.

Características y procesos generales en cuevas con arte rupestre en el cantábrico: los casos de Lumentxa, Santimamiñe y Altxerri.

Characteristics and general processes in rock art caves of Cantabrian Region: The cases of Lumentxa, Santimamiñe, and Altxerri.

M. Arriolabengoa[1], I. Intxaurbe[1], C. Pérez-Mejías[2], H. Cheng[2] y D. Garate[3]

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Euskal Herriko Unibertsitatea 48940 Leioa. martin.arriolabengoa@ehu.eus; inaki.intxaurbe@ehu.eus
2 Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, 710054 Xi'an, China. perezmegias@xjtu.edu.cn; cheng021@xjtu.edu.cn
3 Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de Cantabria, Universidad de Cantabria 39005 Santander. diego.garate@unican.es

Palabras clave: Cuevas multinivel, aloestratigrafía, geomorfología de cuevas, conservación.

Resumen

Los estudios geomorfológicos en cuevas posibilitan la identificación de procesos que amenazan el arte rupestre, lo que a su vez facilita la adopción de medidas para mitigar estos riesgos. El presente trabajo se centra en los estudios geomorfológicos de las cuevas de Lumentxa, Santimamiñe y Altxerri en el norte de la península ibérica, declaradas Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Las 3 cuevas comparten características, como pertenecer a un nivel de cueva donde la erosión está muy condicionada por la actividad de niveles inferiores, presentar unidades aloestratigráficas características de la región (Aranburu *et al*., 2015) y contener procesos de biocorrosión por murciélagos. Individualmente, Lumentxa destaca por su estabilidad en los últimos miles de años, Santimamiñe por la formación de coladas en periodos interglaciares desde el MIS 11, y Altxerri por los procesos gravitacionales y la formación de espeleotemas en periodos glaciares. Se considera que, a partir del marco geomorfológico y el estudio de los procesos activos, las investigaciones sobre los procesos en los paneles de arte, y los datos de monitorización ambiental, pueden ayudar a prever las variaciones en la dinámica de las cuevas debido al cambio global, y detallar con mayor resolución las posibles amenazas para la preservación del arte rupestre.

Abstract

Geomorphological studies in caves enable the identification of processes posing threats to cave art, thereby facilitating the adoption of measures to mitigate these risks. This paper focuses on the geomorphological studies of the caves of Lumentxa, Santimamiñe, and Altxerri in the northern Iberian Peninsula, declared UNESCO World Heritage Sites. These caves share characteristics such as belonging to a cave level where erosion is heavily influenced by lower-level activity, presenting aloestratigraphic units typical of the region (Aranburu *et al*., 2015), and containing processes of biocorrosion by bats. Individually, Lumentxa stands out for its geological stability over the past millennia, Santimamiñe for the formation of stalagmites during interglacial periods since the MIS 11, and Altxerri for gravitational processes and the formation of speleothems during glacial periods. It is considered that, based on this geomorphological framework and the study of active processes in the three caves, research into processes in the art panels, and environmental monitoring data, can help anticipate variations in cave dynamics due to global change and provide greater resolution on potential threats to the preservation of cave art.

Referencias

Aranburu, A., Arriolabengoa, M., Iriarte, E., Giralt, S., Yusta, I., Martínez-Pillado, V., del Val, M., Moreno, J. y Jiménez-Sánchez, M. (2015). *Quaternary International*, https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.09.025

Microsedimentología del Pleistoceno Superior en el abrigo de la Malia (Guadalajara, Iberia central).

Microsedimentology of the Late Pleistocene at the Malia rock shelter (Guadalajara, central Iberia).

M. Arriolabengoa[1], N. Sala[2], A. Corral[1] y A. Pablos[3,4,2]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Euskal Herriko Unibertsitatea 48940 Leioa. martin.arriolabengoa@ehu.eus; aneco00@gmail.com
2 Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), 09002 Burgos. nohemi.sala@cenieh.es
3 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid 28040 Madrid. adpablos@ucm.es
4 Dpto. de Prehistoria y Arqueología, Universidad de Sevilla 41004 Sevilla.

Palabras clave: Petrología, procesos deposicionales, post-deposicionales, yacimiento arqueológico.

Resumen

Es difícil encontrar registros sedimentarios continentales continuos, y por eso es importante caracterizarlos lo máximo posible cuando se hallan, ya que permite correlacionar y entender el funcionamiento del ambiente continental en el pasado. En este trabajo se presenta el estudio de la secuencia sedimentaria del yacimiento arqueo-paleontológico del Pleistoceno Superior del abrigo de la Malia (Tamajón, Guadalajara), realizado mediante microscopio petrográfico, microscopio electrónico de barrido y difracción de Rayos X. Los datos revelan la interacción de cuatro procesos deposicionales a lo largo del tiempo: fluviales, eólicos, escorrentías y colapsos de techo. Además, se identifican tres procesos post-deposicionales, incluyendo deformación, bioturbación (de raíz y de lombriz) y lixiviación. La variación temporal de estos procesos, junto con la correlación con otros registros del centro peninsular (Wolf *et al.*, 2021), sugiere condiciones más áridas previas al último máximo glaciar.

Abstract

It is difficult to find continuous continental sedimentary records, which emphasises the importance of thoroughly characterising them when they are discovered. This allows for correlation and a better understanding of the functioning of the continental environment in the past. This study presents the analysis of the sedimentary sequence from the Late Pleistocene archaeo-paleontological site of the la Malia rock shelter (Tamajón, Guadalajara), conducted using polarizing microscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The data reveal the interaction of four depositional processes over time: fluvial, aeolian, runoff, and roof collapses. Additionally, three post-depositional processes are identified, including deformation, bioturbation (root and earthworm), and leaching. The temporal variation of these processes, coupled with correlation with other records from the Iberian Peninsula (Wolf *et al.*, 2021), suggests drier conditions prior to the last glacial maximum.

Referencias

Wolf, D., Kolb, T., Ryborz, K., Heinrich, S., Schäfer, I., Calvo, R., Sanchez, J., Hambach, U., Zech, R., Zöller, L. y Faust, D. (2021) *Quaternary Research*, doi:10.1017/qua.2020.119.

Agradecimientos

Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha; CENIEH; Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2021-122355NB-C31 y PID2021-122355NB-C33 (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE); Consejo Europeo de Investigación (N.º 949330). Ayuda RYC2020-029656-I financiada por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por El FSE invierte en tu futuro.

Middle Pleistocene hippopotamuses in the Guadalquivir River (southern Iberia).

Hipopótamos del Pleistoceno Medio en el Río Guadalquivir (sur de Iberia).

R. Baena[1], I.C. Guerrero[1], J.J. Fernández[2], C. López[3], P.G. Silva[4], J.C. Posada[1], F, Durán[1,2]

1 Department of Physical Geography and Regional Geographic Analysis, University of Seville. 41004 Sevilla, Spain. baena@us.es; inmaguer@us.es; posada@us.es; fduran@us.es
2 Museo Arqueológico y Paleontológico de La Rinconada, 41309 La Rinconada (Sevilla), Spain. cultura@aytolarinconada.es
3 Explotación Minera Áridos y Reforestaciones S.A. 41300 La Rinconada (Sevilla), Spain. clopez@sando.com
4 Department of Geology, Escuela Politécnica Superior de Ávila, University of Salamanca, 37008 Salamanca. Spain. pgsilva@usal.es.

Abstract: A new Pleistocene vertebrate assemblage from fluvial deposits of the Guadalquivir River at La Rinconada (Seville), has provided remains of hippopotamus (*Hippopotamus amphibius*) in the "Las Jarillas" terrace at +29-35 m, with additional material of *Equus ferus*, elephant (*Elephas Palaeoloxodon antiquus*) and Acheulean industry. The presence of these taxa indicates fully temperate climatic conditions, and the presence of hippopotamuses, reveals as an important biostratigraphic indicator for the Spanish Middle Pleistocene. The comparative study of some of the canine fragments found with respect to those from other paleontological sites in the Europe shows the enormous size of this population and suggests its possible relationship with optimal climatic conditions during MIS11, as well as contributing to contextualize the transition between the presence of *H. antiquus* and *H. amphibius* populations in Europe.

Key words: Pleistocene, Terraces, Acheulean, *Hippopotamus antiquus*, *Hippopotamus amphibius*.

Resumen: *Un nuevo conjunto de vertebrados pleistocenos procedentes de depósitos fluviales del río Guadalquivir en La Rinconada (Sevilla), ha proporcionado restos de hipopótamo (Hippopotamus amphibius) en la terraza de "Las Jarillas" a +29-35 m, con material adicional de Equus ferus, elefante (Elephas Palaeoloxodon antiquus) e industria achelense. La presencia de estos taxones indica unas condiciones climáticas plenamente templadas y la presencia de hipopótamos supone un importante indicador bioestratigráfico para el Pleistoceno Medio español. El estudio comparativo de algunos de los fragmentos caninos encontrados con respecto a los de otros yacimientos de Europa muestra el enorme tamaño de esta población y sugiere su posible relación con condiciones climáticas óptimas durante el MIS11 además de contribuir a contextualizar la transición entre H. antiquus y H. amphibius en Europa.*

Palabras clave: *Pleistoceno, Terrazas, Achelense, Hippopotamus antiquus, Hippopotamus amphibius.*

INTRODUCTION

Middle Pleistocene vertebrate assemblages from fluvial deposits of the Guadalquivir River at La Rinconada (Seville) (*ca*. 0.4-0.24 Ma) have yielded specimens of *Hippopotamus amphibius* and *Hippopotamus* sp.A, together with *Equus ferus*, *Palaeoloxodon antiquus*, *Bovidae* and Acheulean industries (Baena et al., 2014). In this chronological range, it has been hypothesized a turnover in Europe of hippopotamus populations, with the entry of *Hippopotamus amphibius* and the subsequent disappearance of *Hippopotamus antiquus*.

In the Iberian Peninsula, *H. antiquus* is estimated to have been present since ca. 1.7 Ma, being especially abundant in the Early Pleistocene lacustrine palaeoenvironments of the Guadix-Baza Basin and in the Early-Middle Pleistocene localities of the north-eastern Iberian Peninsula. Scarce are the findings in fluvial terrace, such as the Júcar and Guadiana rivers; or the deposits in caves, as in Sierra de Atapuerca sites or Pontón de la Oliva. *H. amphibius*, on the other hand, has a less clear record and is represented by dubious attributions. Specimens dated from the Mid-Middle Pleistocene (terraces of the Tajo and Jarama rivers, Mealhada or Cova de Bolomor, among others) to the Upper Pleistocene (Cova del Toll and tentatively Cueva de la Lloseta) are attributed to this taxon. In most cases, the presence of *H. amphibius* is associated with lithic industry as well as with the faunal associations observed in La Rinconada. The presence of these taxa is usually interpreted as an indicator of temperate climatic conditions with permanent presence of water bodies and grasslands. It is more controversial to use the presence of Hippopotamuses as a biostratigraphic indicator, as there is no consensus on the taxonomic assignment at the specific level of isolated teeth or most postcranial elements.

GEOMORPHOLOGYCAL SETTING

In the lower valley of the Guadalquivir on its left bank and to the northeast of the city of Seville, the municipality of La Rinconada (Fig. 1) contains the last five terrace levels (T10 to T14) that make up the General Sequence of the Guadalquivir terraces (SGTG). The highest levels

correspond to the Middle terraces T10 ("Saltillo") and T11 ("Tarazona"), located in the south-eastern area, with relative heights of +65-71 and +45-60 m with respect to the riverbed. The palaeomagnetic analyses to date provide normal polarity (Brunhes epoch) for these terraces, after the Bhunhes/Matuyama transit of the last high terrace (T9) at +80-85 m (Baena et al., 2017), which contains the first evidence of lithic industry of Acheulean ascription ("Tambor site"), in the Campana sector. They are followed by T12 at +29-35 m, the most extensive, with a sedimentary fill exceeding 18 m and where palaeomagnetic analyses detect small magnetic reversals within the normal Brunhes epoch (Baena and Guerrero, 2011), attributed to excursions (Blake, Biwa). TL and OSL dating performed so far on the upper third of the stratigraphy provided a numerical age of more than 150 ka, in the first case for the upper third (Baena et al., 2014) and >100 ka (OSL Quartz) and >240 Ka (OSL pIRIR) in the second case on the central part of the alluvium (Fig. 3). Finally, the low terrace (T13) at +13-18 m and the floodplain (T14) at +8-9 m are characterised by fills higher than 8 m composed of gravels overlain by sands and fine flood sediments. T13 may overlap the upper level in its proximity, containing Middle Palaeolithic industry in its gravels. Of the upper sands and silts (2 to 4 m), palaeomagnetic analyses provide normal polarity and numerical dating of the sands whith chronologies between 59.7±8.5-6.7 ka (TL), 74±7 ka (quartz-OSL) and 76±5 Ka (post-IRIR feldspar). The floodplain (T14) has a predominance of normal polarity flood fines with frequent meanders and abandoned channels of Holocene and historical age (Baena et al., 2019).

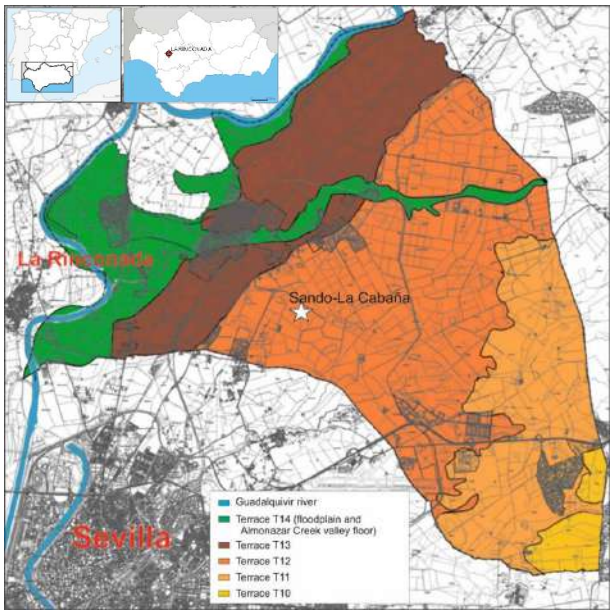


FIGURE 1. Location of the Sando-La Cabaña site in the territory of La Rinconada (Seville) and main geomorphological features.

METHODS

Based on the systematic geomorphological, archaeological, and palaeontological monitoring of each of the exploitation squares (C1 to C21) of the Sando-La Cabaña gravel quarry (Fig. 2), complemented with the corresponding geomorphological studies of the region and the stratigraphic correlation of the sedimentary units. The positioning of the lithic and paleontological remains recovered was carried out by means of general and detailed profiles of the grids, with determination of the alluvial facies (Miall, 1977) and the representative lithostratigraphic units to be dated by luminescense dating: TL, quartz-OSL and K-feldspart post-IRIR$_{290}$ (Murray and Olley, 2002).



FIGURE 2. Numbered mining grids in the Sando-La Cabaña gravel pit. Location in Figure 1.

STRATIGRAPHY AND LITHIC TOOLS

The model stratigraphy of this terrace at the SANDO La Cabaña site shows a sequence composed of six lithostratigraphic units (Fig. 3) with the following development (Baena et al., 2014; 2019):

USLC-1: Submerged in the aquifer, it is erosively disposed, by a net and undulating boundary (2-3 m), on the Miocene blue marls. It is made up of coarse gravels (Gm) of quartzite, flint, porphyry, sandstones, slates, and massive fine sands (Sh) which alternate in their upper part with levels of gravels and sands (Sp and Sr), culminating in centimetric and discontinuous sandy-loamy or clayey-loamy flood levels (Fm). From it, the excavating machines extract gravels and coarse sands together with remains of *Elephas (Palaeloxodon) antiquus*, *Hippopotamus amphibius*, *Hippopotamus* sp. and other undetermined megaherbivores, as well as numerous lithic pieces from the Acheulean (lithic assemblage **CAB-I**).

USLC-2: Integrated at the base by massive medium gravels (Gm) of the same lithology as the lower unit, it gives way, through a net boundary, to a mixed deposit 3-3.5 m thick in which gravels and sands alternate. In the upper part there are undulations and intercalated centimetric levels of massive sandy-loamy silt (2-10 cm). The remains of equids (*Equus ferus* and *Equus* sp) and bovids (cf. *Bos primigenius*) have been obtained from the base of the unit (facies Gm and Sp) and of elephants (*Elephas antiquus*) and hippopotamus cf. *amphibius* (C19) in the facies St and Sr of the whole unit, as well as lithic industry (**CAB-II**).

USLC-3: With medium and small quartzite and flint gravels at the base in the position of the channel bottom, upwards alternating with sand and sandy siltstones.

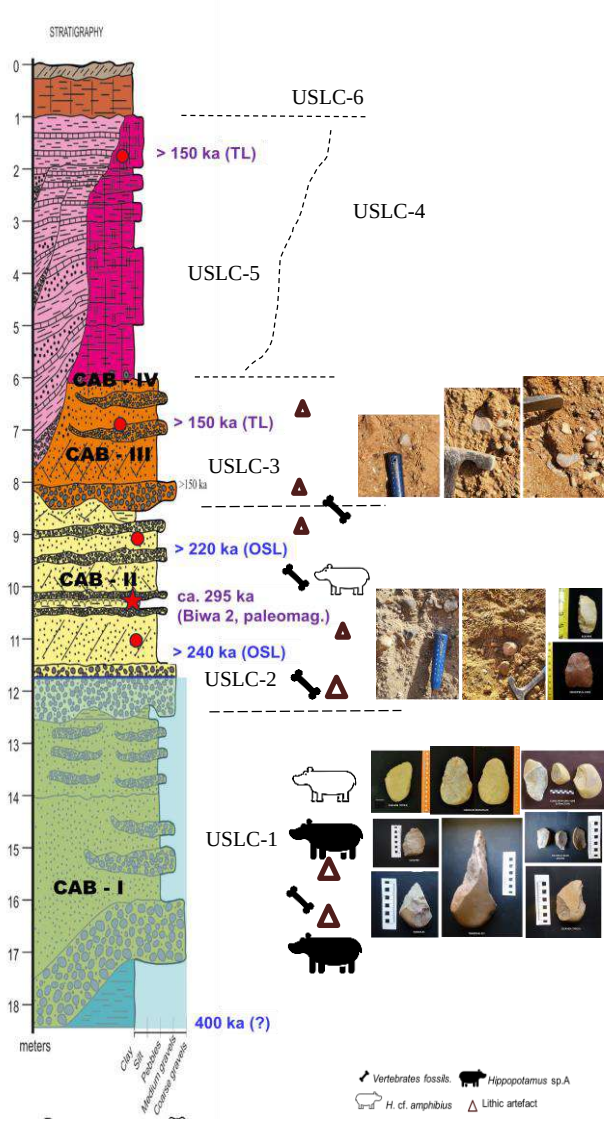


FIGURA 3. Model lithostratigraphic column based on squares C1 to C4 and C19 to C21 of the Sando-La Cabaña quarry. The available numerical dating (TL, OSL and palaeomagnetism), the position of the lithic assemblages recovered (CAB-I, II and III) and the location of the remains of Hippopotamus cf. amphibius and Hippopotamus sp.A. have been entered.

The whole unit has yielded undefined fragmentary palaeontological remains and lithic industry (**CAB-III**).

USLC-4: Composed of silts and clays with carbonates, it is up to 5 m thick and contains an important development of soils with Bta/Bca horizons.

USLC-5: Up to 7 m thick, it overlaps with a net boundary and laterally to units USLC-4 and USLC-3, presenting alternations of gravels, sands, silts and clays with abundant laminated carbonates and in several overlapping and erosive sequences one on top of the other, as corresponds to an abandoned channel.

USLC-6: The sequence is closed by a level of massive flood silts and clays (Fm) up to 1 m thick with brown-phersialytic soil (2.5 YR 3/6).

HIPPOTAMUS TOOTH REMAINS

The palaeontological remains collected during the survey of USLC-1 and USLC-2, belonging to hippopotamuses, include cranial fragments and a single postcranial remains corresponding to a distal radial epiphysis. There are eleven canine fragments, four almost complete; four incisor fragments; one indeterminate tooth fragment and one palate fragment. From the underwater unit USLC-1, squares C1, C2, C20 and C21, seven fragments or slices of large lower canines have been obtained (Fig. 4), corresponding to six individuals (Table 1). One of them comes from the Museum's deposit (MU1) and was found in the lower part of a nearby gravel pit which has disappeared ("Antiguas Jarillas"). The remains were found isolated and scattered within USLC-1 but in three different squares (C1, C19 and C21). With the exception of SE1-IACT and SE1', which were found together and belong to a single specimen, the others belong to different specimens.

The morphology of the teeth is compatible with the two European continental Pleistocene hippopotamus species, *H. antiquus* (Early Pleistocene-Early Middle Pleistocene) and *H. amphibius* (Late Middle Pleistocene-Late Pleistocene).

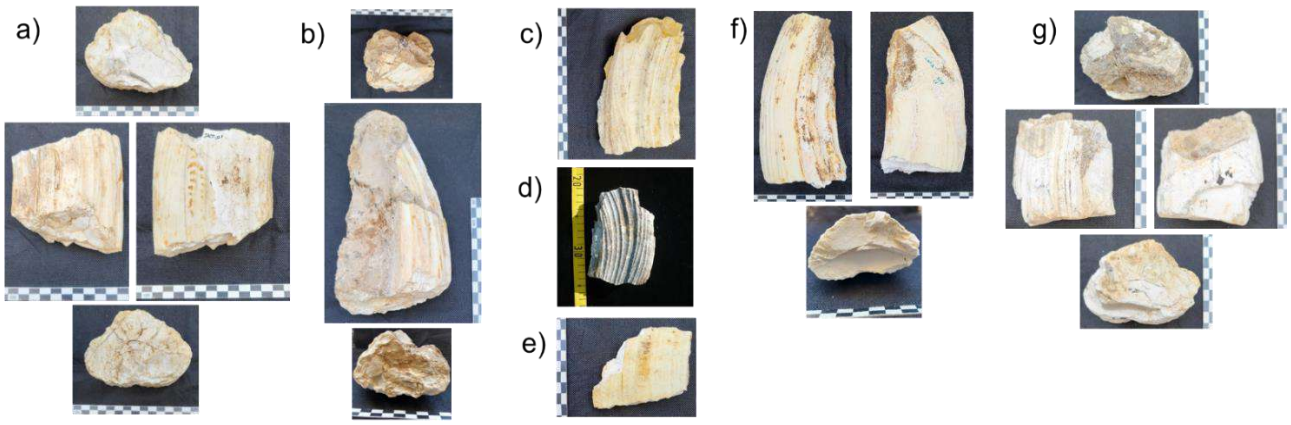


FIGURE 4. Remains of lower canines of H. sp.A from unit USLC-1 in the Sando-La Cabaña gravel quarry: (a) SE1-IACT slice with mesial, lingual and upper and lower cross-section views; (b) SE1' slice with mesial and upper and lower cross-section views; (c) SE2 lateral fragment with lingual view; (d) SE3 fragment with lingual view; (e) SE5 fragment with lingual view; (f) SE4 slice with mesial, lingual and lower cross-section view; (g) MU1 slice with mesial, lingual and upper and lower cross-section views.

Specimen	IACT-SE1	SE1´	SE2	SE3	SE4	SE5	MU1
Site	SLC	SLC	SLC	SLC	SLC	SLC	AJ
Prospected trench	C21	C21	C19	C1	C1	C19	-
Bon evidence	lower right	lower right	lower left	lower right	lower left	lower right	lower right
W (mm)	95.8	92.7	79.1	85	79.3	76.4	78.1
L (mm)	58.4	58.1	-	-	47.5	-	54.1

TABLE I. Measurements of lower canines from fragments of Hippopotamus sp.A recovered from unit USLC-1 at Sando-La Cabaña. Measurements represent the highest value of the parameter. Abbreviations: SLC, Sando La Cabaña; AJ, Antiguas Jarillas; W, linguo-labial diameter; L, mesio-distal diameter.

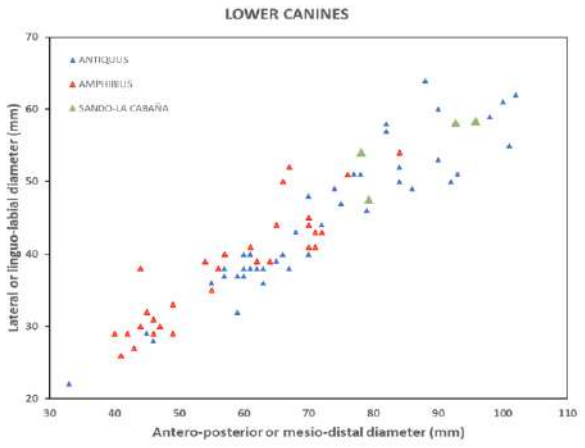


FIGURE 5. Graph comparing lower canines of Hippopotamus from various localities in relation to H. sp.A specimens (SE1, SE1´, SE4 and MU1) from the Guadalquivir River, modified from Mazza (1995).

Therefore, we focus our comparisons on the crown dimension of the lower canine (Fig. 5), which is distinguished from *H. amphibius* by its large dimensions and falls within the *H. antiquus* sample (data from Mazza, 1995). Based on its large dental dimensions, we attribute the IACT-SE1, SE1´, SE4 and MU1 Hippopotamus to the large-sized *H. antiquus*. All lower canines from USLC-1 are also clearly larger than the left lower canines from the Middle and Lower Pleistocene of the Spanish sites of Arganda I (50.1x37.2 mm) and Huéscar 1 (55x42 mm), attributed to *H. amphibius* and *H. antiquus* respectively.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

During the monitoring of the SANDO-La Cabaña aggregate exploitation in the Las Jarillas terrace (T12) of the Guadalquivir River in La Rinconada, more than a hundred bone and dental fragments have been collected and identified from USLC-1 and USLC-2 units, as well as a large amount of Lower Palaeolithic lithic industry. Palaeontological remains include *elephants (Palaeoloxodon*), hippopotamuses and other large herbivores such as *Bos primigenius*, *cervus elaphus* or *equus* (cf. *ferus* and sp.). Hippopotamuses have been collected both in USLC-2 cf. *amphibius* (>0.22-0.3 Ma) and in USLC-1 (0.4-0.38 Ma?), where large dental remains (*Hippopotamus* sp.A) are frequent. A first comparison of these lower canines with those of other localities (Mazza, 1995), brings them closer to those of *H. antiquus*.

The results of this study contribute to contextualize the transition between the presence of *H. antiquus* and *H. amphibius* populations in Europe between 0.3 and 0.4 Ma, not ruling out their possible brief coexistence in the southern Iberian Peninsula. Furthermore, the presence of numerous Acheulean lithic industries associated with the palaeontological remains provides valuable information for the environmental reconstruction of the environment of the human populations of the southern Iberian Peninsula during the MIS11 climatic optimum, when all this megafauna must have represented an attractive food target for the Palaeolithic hominids of the Guadalquivir valley.

ACKNOWLEDGMENTS

Work funded by the I+D+i Projects: US-1381157 US/JUNTA/FEDER, UE and PID2021-123510OB-I00 (USAL) of the MICIN AEI/10.13039/501100011033/.

REFERENCES

Baena, R. y Guerrero, I.C. (2011): Aproximación a la magneto-estratigrafía de la última terraza Media del Guadalquivir (T12) en “las Jarillas” (La Rinconada, Sevilla). En: El Cuaternario en España y Áreas Afines. (V. Turu y; A. Constante, eds.). AEQUA-Fundación M. Chevalier. Andorra, 191-195.

Baena, R., Fernández, J.J., Guerrero, I.C. y Posada, J.C. (2014): La Terraza Compleja del río Guadalquivir en “Las Jarillas” (La Rinconada, Sevilla. SW Spain): cronoestratigrafía, industria lítica y macrofauna asociada. *Cuaternario y Geomorfología*, 28 (3-4), 7-26.

Baena, R., Guerrero, I.C. y Fernández, J.J. (2017): Paleomagnetismo en terrazas altas del Guadalquivir (sectores Campana y Carmona, Sevilla). En: Cambios en sistemas ambientales y sus escalas temporales. (A. Gómez, C. Gonçalves, L. André y N. Bicho, eds.). Univ. do Algarve, Faro. 37-40.

Baena; R., Cunha, P.P, Guerrero, I.C., Fernández, J.J., Cortés, M., Silva, P.G., Simón, M., Murray, A.S. y Buylaert, J.P. (2019): El Pleistoceno Medio y Superior en la secuencia general de las terrazas del Guadalquivir (SGTG): Nuevas dataciones por luminiscencia de la T12 y T13 en La Rinconada (SW de España). En: V Reunión Nacional de Cuaternario. AEQUA-Universidad del País Vasco, Bilbao. 369-372.

Mazza, P. (1995): New evidence on the Pleistocene hippopotamuses of Western Europe. *Geol. Rom.* 31, 61-241.

Miall, A. D. (1977): A review of the braided-river depositional environment. *Earth Science Review*, 13, 1-62.

Murray, A.S. and Olley, J.M. (2002): Precision and accuracy in the optically simulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria*, 21,1-16.

Subsidencia tectónica cuaternaria de la costa de Granada (sur de España) mediante el estudio de cuevas kársticas.

Quaternary tectonic subsidence in Granada coast (southern Spain) through karst cave studies.

D. Ballesteros[1], C. Pérez-Mejías[2], D. Moreno[3], M. Moreno-Sánchez[4], C. Reyes-Carmona[5], D. Alfonso-Jorde[4], J.M. Azañón[4,6], G. Booth-Rea[4,6], D. Torre[7], P.S. Jerez-Longres[4], J.V. Pérez-Peña[4], A. González-Ramón[8], H. Cheng[2], J.P. Galve[4] y P. Ruano[4,6]

1 Dpto. Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad Cantabria 39005 Santander. ballesterosd@unican.es
2 Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University 710049 Xi'an. perezmegias@xjtu.edu.cn, cheng021@xjtu.edu.cn
3 Agencia de Medio Ambiente y Agua, Junta de Andalucía, 04007 Almería. dmorenolampreave@yahoo.es
4 Dpto. Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada. marcosms@ugr.es, david.alfonso117@gmail.com, jazanon@ugr.es, gbooth@ugr.es, psjerezlongres@ugr.es, vperez@ugr.es, jpgalve@ugr.es, pruano@ugr.es.
5 Dpto. Scienze dell'Ambiente e della Terra, Università di Milano-Bicocca, 20126 Milano. cristirecar@gmail.com
6 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR, 18100 Armilla.
7 Dpto. Scienze Pure e Applicate, Università di Urbino "Carlo Bo", 61029 Urbino. d.torre@campus.uniurb.it
8 Instituto Geológico y Minero de España – CSIC, 18006 Granada. antonio.gonzalez@igme.es

Palabras clave: cueva, datación, espeleotema, karst, subsidencia.

Resumen

La costa de Granada destaca en el sur de España por sus escasos depósitos cuaternarios, en contraste con las abundantes evidencias de levantamiento cuaternario observadas en las adyacentes costas de Málaga y Almería. Para conocer la evolución cuaternaria de la costa granadina, hemos investigado los registros de cuevas kársticas, incluyendo sus formas y depósitos vadosos, bioestratigrafía y la datación U/Th de 22 espeleotemas. La investigación reveló que la costa de Granada emergió hace entre 3,5/2,4 Ma y >650 ka y no muestra evidencias de levantamiento tras ese periodo, mientras que las costas de Málaga y Almería experimentaron levantamiento en los últimos 200-180 ka según trabajos previos. Estas disparidades temporales no pueden atribuirse únicamente a las fluctuaciones del nivel del mar, lo que sugiere que estructuras tectónicas como la falla de Balanegra causaron el hundimiento de la costa de Granada. Este estudio introduce una aplicación de las investigaciones kársticas clásicas para comprender la subsidencia costera debido la a tectónica reciente comparando edades de las cuevas vadosas con cronologías establecidas en áreas costeras adyacentes.

Abstract

In Southern Spain, the Granada coast stands out by its limited Quaternary deposits, a contrast to the abundant evidence of Quaternary uplift observed in the nearby Málaga and Almería coasts. To unveil the Quaternary evolution of the Granada coast, we investigated karst cave records, relying on vadose features, its biostratigraphy, and the U/Th dating of 22 speleothems. The investigation revealed the emersion of the Granada coast between 3.5/2.4 Ma and >650 ka ago and no evidence of uplift have been registered after this period, while the Málaga and Almería shores experienced uplifting within the last 200-180 ka according to previous works. These temporal disparities cannot be solely attributed to sea-level oscillations, suggesting that geological structures such as the Balanegra fault caused the subsidence of the Granada coast. This study introduces an innovative application of classical karst investigations to comprehend coastal subsidence by recent tectonics by comparing vadose cave ages with established chronologies in adjacent coastal areas.

Registro de los cambios del nivel del mar de los últimos 450ka en el litoral mediterráneo peninsular (España).

The record of sea-level changes during the last 450ka in the Mediterranean peninsular coasts of Spain.

T. Bardají[1], C. Zazo[2], J.L. Goy[3], C.J. Dabrio[4] y J. Lario[5].

1 Dpto. Geología, Geografía y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá 28871 Madrid. teresa.bardaji@uah.es
2 Dpto. de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. 28006-Madrid. carizazocardena@gmail.com; carizazo@mncn.csic.es
3 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca. 37008-Salamanca. joselgoy@usal.es
4 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Geología, Universidad Complutense. 28840-Madrid. dabrio@ucm.es
5 Dpto. de Ciencias Analíticas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED. 28040-Madrid. javier.lario@ccia.uned.es

Palabras clave: Períodos interglaciares, terrazas marinas, Alicante-Murcia-Almería, MIS5, MIS11.

Resumen

El registro isotópico de los últimos 450ka muestra cuatro interglaciares (MIS5, MIS7, MIS9 y MIS11) además del actual (MIS1), de los cuales tan solo dos (MIS5 y MIS11) han sido considerados globalmente posibles análogos del presente interglaciar, y, por tanto, de su evolución futura. Aunque el MIS5 presenta claras ventajas en cuanto a datación y conservación, es el MIS11 el que presenta una mayor similitud en cuanto al grado de insolación y configuración orbital (Loutre y Berger, 2003). Este trabajo se fundamenta en los estudios realizados a lo largo de las últimas décadas de los depósitos marinos cuaternarios de los litorales de Almería, Murcia y Alicante (Zazo *et al.*, 2003, 2013). El registro geomorfológico y estratigráfico de los interglaciares más recientes (MIS11 a MIS5) nos permite analizar cambios en amplitud, duración y frecuencia, y relacionarlos con el registro isotópico global.

Abstract

The isotopic record of the last 450ka shows four interglacials (MIS5, MIS7, MIS9 and MIS11) besides the current one (MIS1), with only two (MIS5 and MIS11) having been globally considered as possible analogues of the present interglacial, and therefore of its future evolution. Although MIS5 presents clear advantages in terms of dating and conservation, it is MIS11 that presents the greatest similarity in terms of insolation and orbital configuration (Loutre and Berger, 2003). This work is based on the studies carried out over the last decades on Quaternary marine deposits along the coasts of Almería, Murcia and Alicante (Zazo *et al.*, 2003, 2013). The geomorphological and stratigraphic record of the most recent interglacials (MIS11 to MIS5) allows us to analyse changes in amplitude, duration and frequency, and relate them to the global isotopic record.

Referencias

Loutre, M.F. y Berger, A. (2003). *Global and Planetary Change* 36, 209-217

Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Lario, J., González-Delgado, A., Bardají, T., Hillaire-Marcel, C., Cabero, A., Ghaleb, B., Borja, F., Silva, P.G., Roquero, E., Soler, V. (2013). *Geomorphology* 196, 36-49

Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Bardají, T., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., González-Delgado, A., Soler, V. (2003). *Marine Geology* 194, 103-303.

Registro de las inundaciones de los últimos 19.000 años a partir de espelotemas (Navarra).

Speleothem record of paleofloods during last 19,000-years (Navarre).

M. Bartolomé[1,2,3], J.L. Bernal-Wormull[4], M. Arriolabengoa[5], R. Giménez[4], J.M. Iturralde[6], R.L. Edwards[7], H. Cheng[8], M. Luetscher[2], H. Stoll[3], A. Moreno[4] y G. Benito[1]

1 Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, 28006, Madrid. mbart@mncn.csic.es, benito@mncn.csic.es
2 Swiss Institute for Speleology and Karst Studies (SISKA), CH-2301 La Chaux-de-Fonds, Switzerland marc.luetscher@isska.ch
3 Department of Earth Sciences, ETH Zürich, Zürich, Switzerland heather.stoll@erdw.ethz.ch
4 Instituto Pirenaico de Ecología - CSIC, Zaragoza 50016 amoreno@ipe.csic.es, jluis.wormull@ipe.csic.es, rgimenez@ipe.csic.es
5 Departamento de Geología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 48940 Leioa. martin.arriolabengoa@ehu.eus
6 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50009, Zaragoza. jonmariturramen@gmail.com,
7 University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA edwar001@umn.edu
8 Institute for Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China cheng021@xjtu.edu.cn

Palabras clave: Espeleotemas, paleoinudnaciones, depósitos detríticos, Navarra, Pirineo occidental,

Resumen

La cueva de Ostolo en Navarra presenta un río en su interior y una extensa variedad de secuencias detríticas y espeleotemas. La cartografía geomorfológica revela múltiples etapas de sedimentación y erosión, incluyendo terrazas de gravas polimícticas, depósitos de slackwater, y secuencias rítmicas arena-limo, probablemente introducidos por las dolinas ubicadas sobre la cueva. Los sedimentos alcanzan el techo de la cavidad en varios puntos, indicando su llenado completo. Se seleccionaron 7 estalagmitas que cubren los últimos 19 ka, ubicadas a diferentes alturas respecto a la surgencia de la cueva. Estas estalagmitas muestran capas detríticas individuales y zonas marronáceas relacionadas a inundaciones en la cueva. Mediante dataciones de U-Th y el examen visual de las láminas, se identificaron 7 períodos con mayor frecuencia de inundaciones, ocurriendo entre hace 19-17,4 ka, 15,9-14,7 ka, 13,8-12,6 ka, 11,7-9,3 ka, 8,4-7,2 ka, 6,6-4,5 ka y 3,3-2,7 ka. La monitorización hidrológica actual muestra que lluvias superiores a 100 mm apenas incrementan el nivel de agua unos pocos milímetros debido a la configuración geomorfológica de la cueva. Estas observaciones sugieren, por tanto, que los cambios en la geomorfología de la cueva producidos por la sedimentación/erosión de los rellenos sedimentarios pudieron estar relacionados con el bloqueo/apertura de la surgencia en la entrada de la cueva. Esos cambios quedarían reflejados en el registro de inundaciones en las estalagmitas, marcando eventos de agradación sedimentaria y cambios en la geomorfología de la cueva, relacionados a su vez con fases de erosión/degradación de suelos en el exterior.

Abstract

The Ostolo Cave in Navarra has an underground river and a wide variety of detrital sequences and speleothems. Geomorphological mapping reveals multiple stages of sedimentation, including polymictic gravel terraces, slackwater deposits, and sand-silt rhythms, likely introduced through dolines located above the cave. Sediments reach the ceiling of the cave at some points, indicating its complete filling. Seven stalagmites covering the last 19 ka located at different heights relative to the cave spring were selected. These stalagmites show individual detrital layers and brownish zones related to floods. Through U-Th dating and visual observation of laminae, seven periods with a higher frequency of floods were identified, occurring between 19-17.4 ka, 15.9-14.7 ka, 13.8-12.6 ka, 11.7-9.3 ka, 8.4-7.2 ka, 6.6-4.5 ka, and 3.3-2.7 ka. Current hydrological monitoring shows that rainfall exceeding 100 mm barely increases the water level by a few millimeters due to the geomorphological configuration of the cave. These observations suggest that changes in geomorphology caused by sedimentation/erosion of sedimentary fillings could be related to the blockage/opening of the spring and the record of floods in stalagmites. Thus, we interpret the sandy layers in the stalagmites as reflecting changes in the cave geomorphology in relation to soil erosion/degradation in the outside environment.

Primeros datos de inclusiones fluidas de espeleotemas en cuevas del Pirineo Occidental: reconstrucción de temperatura desde la última deglaciación.

First fluid inclusion results in stalagmites from Western Pyrenean caves: Temperature abrupt changes since last deglaciation

J.L. Bernal-Wormull[1], A. Moreno[1], Y. Dublyansky[2], C. Spötl[2], R. Giménez[1], C. Pérez-Mejías[3], M. Bartolomé[4], M. Arriolabengoa[5], E. Iriarte[6], I. Cacho[7], L. R. Edwards[8] y H. Cheng[3,9]

1 Instituto Pirenaico de Ecología – CSIC, 50059 Zaragoza, España. jbernawo7@gmail.com, amoreno@ipe.csic.es, reiesgimenez@gmail.com
2 Instituto de Geología, Universidad de Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Austria. yuri.dublyansky@uibk.ac.at, christoph.spoetl@uibk.ac.at
3 Instituto de Cambio Ambiental Global, Universidad de Xi'an Jiaotong, 710054 Xi'an, China. perezmegias@xjtu.edu.cn
4 Museo Nacional de Ciencias Naturales - CSIC, 28006 Madrid, España. mbart@mncn.csic.es
5 Universidad del País Vasco, Leioa, España. martin.arriolabengoa@ehu.eus
6 Universidad de Burgos, 09001 Burgos, España. eiriarte@ubu.es
7 GRC Geociències Marines, Universitat de Barcelona, 28080 Barcelona, España. icacho@ub.edu
8 Universidad de Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA. edwar001@umn.edu
9 Instituto de Medio Ambiente de la Tierra, Academia China de Ciencias, Xi'an, China. cheng021@xjtu.edu.cn

Resumen: Se comparan los valores isotópicos del oxígeno ($\delta^{18}O$) con los nuevos datos obtenidos a través del análisis de deuterio en inclusiones fluidas (δD_{FI}) de cinco estalagmitas extraídas de las cuevas de Ostolo y Mendukilo (Navarra, España), cuyas edades U/Th de alta precisión indican que crecieron durante la última deglaciación y el Holoceno. Los valores de $\delta^{18}O$ y δD_{FI} son más ligeros durante los estadiales GS-2.1a y GS-1 que durante el interestadial GI-1 y el Holoceno, corroborando así la identificación de oscilaciones muy rápidas en la temperatura de la deglaciación. Sin embargo, la variabilidad del registro de δD_{FI} a lo largo del Holoceno no es relevante a escalas milenarias, aunque sí que permite identificar eventos abruptos como el ocurrido hace 8200 años.

Palabras clave: Ultima deglaciación, Holoceno, estalagmitas, inclusiones fluidas, isótopos estables.

Abstract: *The isotopic values of oxygen ($\delta^{18}O$) are compared with the new data obtained through the analysis of deuterium in fluid inclusions (δD_{FI}) of five stalagmites extracted from the Ostolo and Mendukilo caves (Navarra, Spain), whose high precision U/Th ages indicate that they grew during the last deglaciation and the Holocene. The $\delta^{18}O$ and δD_{FI} values are lighter during the stadials GS-2.1a and GS-1 than during the interstadial GI-1 and the Holocene supporting rapid temperature changes during last deglaciation. Nevertheless, the variability of the δD_{FI} record throughout the Holocene is not relevant at millennial scales but it allows detecting rapid temperature changes, such as the event occurred 8200 years ago.*

Key words: *Last deglaciation, Holocene, stalagmites, fluid inclusions, stable isotopes.*

INTRODUCCIÓN

El clima en el hemisferio norte durante la última deglaciación (ca. 16,5 - 11,7 mil años [ka]) estuvo marcado por una serie de cambios abruptos asociados con variaciones en la extensión de las capas de hielo continentales, cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero y oscilaciones en la formación de agua profunda en el Atlántico norte y, por tanto, modificaciones sustanciales en la circulación oceánica (Clark *et al.*, 2012). Por otro lado, el Holoceno también presenta variabilidad en términos de cambios de temperatura, estacionalidad de las precipitaciones y extensión de los glaciares. Desafortunadamente, surgen muchos problemas al reconstruir paleotemperaturas de forma cuantitativa debido a la escasez de técnicas sólidas y la influencia de diferentes señales en la variación de los distintos indicadores paleoclimáticos, especialmente en registros terrestres, lo que impide una comprensión precisa de las variaciones de temperatura pasadas (Heiri *et al.*, 2014).

La última deglaciación en el hemisferio norte implicó grandes cambios en el clima asociados con los estadiales (GS-2.1a y GS-1) e interestadiales (GI-1 y el inicio del Holoceno) de Groenlandia. El impacto de estos rápidos cambios paleoclimáticos en los entornos del suroeste de Europa se registra mediante indicadores de temperatura, p. ej. polen, foraminíferos planctónicos y quironómidos (Heiri *et al.*, 2014; González-Sampériz *et al.*, 2017; Tarrats *et al.*, 2018). Sin embargo, las reconstrucciones de temperatura disponibles muestran discrepancias significativas y diferencias climáticas regionales en comparación con otras partes de Europa (Heiri *et al.*, 2014). Lo mismo ocurre con el Holoceno, donde la evolución a largo plazo de las variaciones de las

temperaturas globales y hemisféricas sigue siendo un tema de debate y los modelos climáticos y registros indirectos muestran diferentes tendencias (Affolter *et al.*, 2019). Dadas estas incertidumbres, los estudios de registros inorgánicos como las inclusiones fluidas (IF) en espeleotemas están ganando cada vez más relevancia (Affolter *et al.*, 2019) con el fin de complementar los estudios existentes basados en gran medida en registros biológicos. Los puntos fuertes de este método incluyen: (a) la cronología exacta y precisa proporcionada por los espeleotemas; (b) el vínculo bien establecido entre la temperatura interior de la cueva y la temperatura media del aire exterior; y (c) la relación entre la temperatura y los isótopos del agua, que es controlado por procesos físicos más que biológicos.

Aquí, evaluamos la evolución de la temperatura en el noreste de Iberia durante los últimos 16,5 ka utilizando un registro a partir IF de cinco estalagmitas y con una cronología de alta resolución (OST1, OST2, OST3, MEN-2 y MEN-5) (Fig. 1). Estas estalagmitas fueron obtenidas de la cueva de Ostolo (OST; 43°11'16"N, 1°43'56"W) y Mendukilo (MEN; 42º58'25"N, 1º53'45"W) (Fig. 1); sus cronologías y los isótopos estables del carbonato fueron previamente publicados (Bernal-Wormull *et al.*, 2021, 2023). Este registro de IF permitirá comprender mejor la evolución de las variaciones de temperatura en el sur de Europa durante la última desglaciación y el Holoceno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estalagmitas de Ostolo cubren cronológicamente gran parte de la última deglaciación con alta precisión y los perfiles de $\delta^{18}O$ muestran un alto grado de correlación entre las tres estalagmitas (Fig. 2). Por otro lado, las estalagmitas de Mendukilo muestran modelos de edad robustos que cubren diferentes intervalos del Holoceno y el GS-1 con una buena superposición en sus valores de $\delta^{18}O$ (Fig. 2): (i) MEN-2 creció hace 12,8 y 6,3 ka, y (ii) MEN-5 abarca los últimos 8,8 ka. Bernal-Wormull *et al.* (2021, 2023) proporciona más detalles sobre la cronología y los datos isotópicos de estos espeleotemas. El análisis de IF se realizó en la Universidad de Innsbruck, en donde se trituraron y analizaron un total de 356 submuestras de carbonato (incluidos duplicados) para determinar los valores isotópicos de deuterio de estas inclusiones (δD_{FI}). Se utilizaron entre 0,3 y 2,5 g de calcita cada uno para garantizar un rendimiento de agua suficientemente alto (entre 0,2 y 1 µl).

Las muestras para el estudio de IF se caracterizan por contener cantidades variables de agua por lo que es fundamental realizar diversos análisis y así calcular mejor la incertidumbre asociada al método. En este caso, las réplicas arrojaron una desviación estándar media de ±2,4 ‰ para el δD_{FI}. Asignamos este valor a mediciones individuales y lo utilizamos como estimación de incertidumbre. Todas las muestras de MEN se duplicaron, triplicaron o incluso cuadruplicaron. Sin embargo, no todas las muestras de OST pudieron duplicarse debido a las bajas cantidades de agua y la falta de material suficiente para submuestrear varias veces las

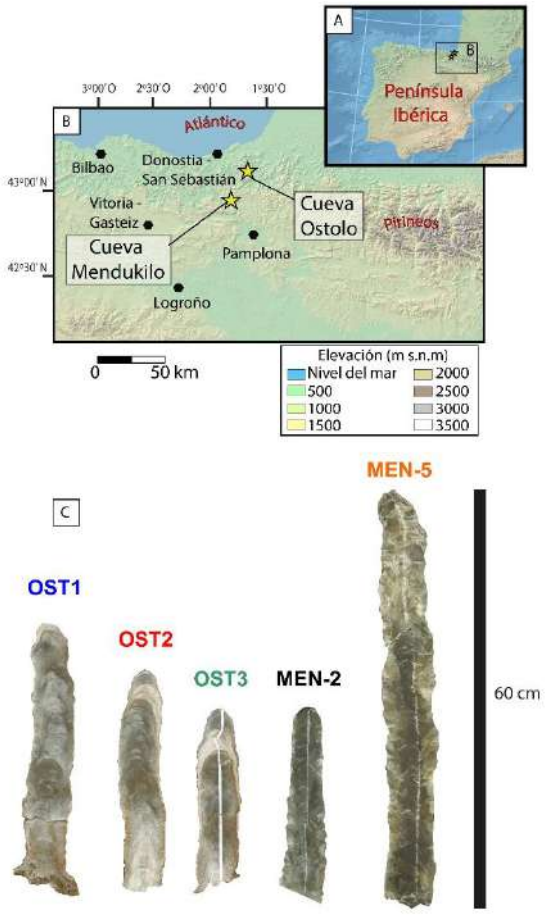


FIGURA 1. A) Mapa de elevación de la Península Ibérica que muestra B) la ubicación del área de estudio en el NE de España. Las estrellas amarillas indican la ubicación de las dos cuevas estudiadas. C) Estalagmitas de la cueva de Mendukilo y Ostolo analizadas isotópicamente a partir de muestras de carbonato e inclusiones fluidas.

capas de crecimiento individuales. Los valores δD_{FI} de las submuestras de MEN-2 y MEN-5 (entre -34 y -61 ‰) poseen contenidos de agua de 0,2 a 1 µL.

Los valores de δD_{FI} para el Holoceno y el GI-1 son comparables a los obtenidos hoy en día en aguas de goteo en el interior de las cuevas de Mendukilo y Ostolo. Por otro lado, los valores son más negativos durante los periodos fríos de la deglaciación, como el GS-1 y GS-2.1a (Fig. 2). En concreto, el periodo GS-2.1a está representado por un valor medio de δD_{FI} de -58 ‰, con un valor extremo de -66,8 ± 2,4 ‰ alcanzado hace 15,80 ± 0,05 ka. Los valores rápidamente se vuelven menos negativos hace 14,57 ± 0,05 ka (Fig. 2; media durante el GI-1: -40 ‰). Esta tendencia se interrumpe en las tres estalagmitas de Ostolo hace 14,13 ± 0,09 ka, lo que lleva a valores más negativos (entre -40 y -56 ‰). Durante el GS-1 los valores de δD_{FI} vuelven a disminuir (Fig. 2), alcanzando un promedio de -51 ‰ y mostrando un rápido aumento al inicio del Holoceno (-36 ‰).

Los registros $\delta^{18}O$ y δD_{FI} de la cueva OST (Fig. 2) muestran evidencia clara de cambios rápidos de temperatura durante las transiciones del GS-2.1a, GI-1, GS-1 y el inicio del Holoceno (Fig. 2). Su sincronización y amplitud concuerdan excelentemente con otros registros europeos de espeleotemas (Affolter *et al.*,

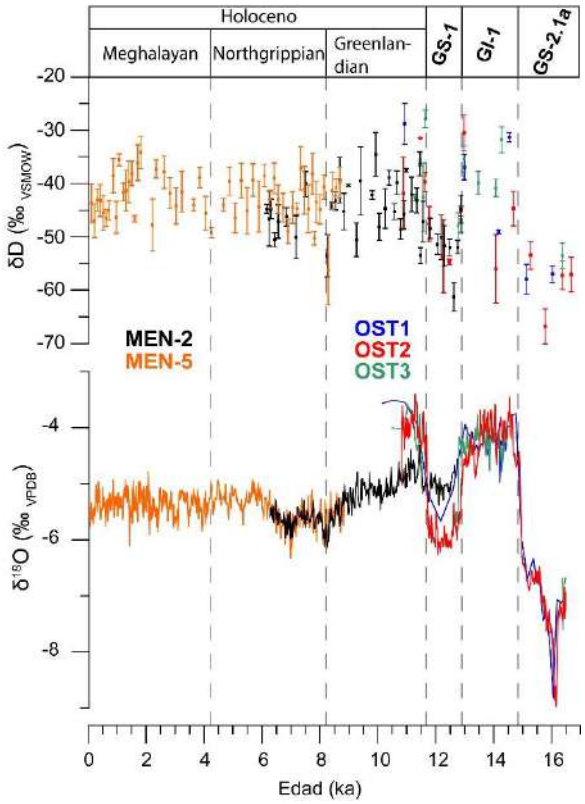


FIGURA 2. Valores corregidos de δD del agua de las inclusiones fluidas (arriba) y de $\delta^{18}O$ de la calcita en estalagmitas de Mendukilo (MEN 5 en naranja y MEN 2 en negro) y Ostolo (OST 1 en azul, OST 2 en rojo y OST3 en verde) a lo largo de la última desglaciación y el Holoceno (abajo).

2019). El alto grado de similitud de estos registros y el NGRIP (Rasmussen *et al.*, 2014) es un fuerte argumento a favor de un forzamiento climático común en el Atlántico Norte durante la última desglaciación en escalas de tiempo de milenios a décadas. El registro de IF en Ostolo sugiere que la temperatura media anual del aire regional durante el GS-2.1a fue ligeramente menor que durante el GS-1 y estuvo marcado por una excursión negativa hace 15,8 ± 0,1 ka en comparación con la temperatura media para el GS-2.1a (Fig. 2). Esta anomalía concuerda con la última fase del Evento Heinrich 1 (HE1), relacionada con descargas masivas de icebergs de la capa de hielo Laurentino, que colapsó hace 16,2 ± 0,3 ka (Landais *et al.*, 2018). Esta anomalía isotópica en las estalagmitas parece responder a los cambios en la composición isotópica de la superficie marina como consecuencia de la entrada de agua dulce procedente de los icebergs ya que se modificaría la fuente de humedad de la lluvia que influye en estas cuevas. Esto confirma que este registro de IF no sólo capturó la historia de la temperatura en escalas de tiempo milenarias, sino también eventos climáticos abruptos en una escala centenaria.

Se produjo un rápido aumento de temperatura al inicio de la GI-1 (Fig. 2). Durante GI-1, el registro de δDFI está marcado por valores de δD más altos en comparación con el inicio del Holoceno (Fig. 2). Al igual que en el registro de δ18O en Ostolo, los valores de δDFI siguen una tendencia negativa hacia el final de GI-1. Durante este interestadial se produce un punto de inflexión significativo con una anomalía negativa hace 14,1 ± 0,1 ka. Esta anomalía más fría registrada en los valores de δD_{FI} en Ostolo es contemporánea con las expansiones de los glaciares en los Pirineos (García-Ruiz *et al.*, 2023) y de un enfriamiento a escala centenaria en reconstrucciones de temperatura europeas (Heiri *et al.*, 2014). Esto sugiere que este mínimo de temperatura durante el GI-1, también registrado hace 14,10 ± 0,03 ka en el registro de $\delta^{18}O$ en Ostolo y equivalente a GI-1d, implicó el enfriamiento más pronunciado del GI-1.

Entre 12,9 y 12,6 ka, la disminución del δD_{FI} en OST y MEN (Fig. 2) resultó en un descenso de temperatura en el registro de IF en ambas cuevas (Fig. 2) que marca la primera parte del GS-1. El registro MEN-2 muestra una media de -51 ‰ durante GS-1, pero el cambio al inicio del Holoceno no es brusco. La variabilidad de los datos de $\delta^{18}O$ en las estalagmitas de MEN durante las transiciones del GI-1/GS-1 y GS-1/Holoceno es pequeña en comparación con los valores de $\delta^{18}O$ en OST. Esto podría explicarse por el hecho de que la cueva Mendukilo se encuentra más cerca de la costa atlántica, siendo los valores $\delta^{18}O$ influenciados no sólo por la temperatura sino también por el efecto de la cantidad de lluvia. Esto conduce a una señal de temperatura "suavizada" en comparación con el registro de $\delta^{18}O$ en OST durante el GS-1, un intervalo frío y seco (Clark et al., 2012). Sin embargo, los registros de δD_{FI} en MEN muestran cambios importantes durante las transiciones GI-1/GS-1 y GS-1/Holoceno y se correlacionan bastante bien con los valores de δD_{FI} en OST (Fig. 2).

Entre 8,7 y 6,3 ka, los valores de MEN-2 y MEN-5 δD_{FI} muestran una excelente correlación (Fig. 2). No hay variación significativa entre el Greenlandian (-44 ‰, hace 11,7-8,2 ka), el Northgrippian (-43 ‰, hace 8,2-4,2 ka) y el Meghalayan (-42 ‰, desde hace 4,2 ka hasta el presente). A pesar de estos valores de δD_{FI} bastante constantes, se identificaron cambios negativos en cortos intervalos de tiempo, hace: 11,37 ± 0,08 (-53,4 ± 2,4 ‰), 9,29 ± 0,08 (-50,5 ± 3,2 ‰) y 8,29 ± 0,07 (-54,9 ± 6,5 ‰) ka. El evento del 8,2 ka registrado en los valores de δD_{FI} de la cueva de MEN se correlaciona cronológicamente bastante bien con el obtenido a partir de $\delta^{18}O$ (entre 8.29 y 8,10 ± 0,04 ka) en estos espeleotemas.

CONCLUSIONES

Los espeleotemas de Ostolo y Mendukilo proporcionan un registro bien replicado y datado con precisión de las variaciones controladas por cambios en la temperatura en la región NE de Iberia durante los últimos 16,5 ka. El registro de IF de ambas cuevas añade nueva y primera evidencia no biogénica de rápidas transiciones de temperatura durante la última deglaciación y el Holoceno, acompañado de la identificación de eventos abruptos. Las temperaturas para el GS-2.1a fueron más bajas que durante el GI-1 y el presente. Este registro de IF permite además datar la respuesta regional del HE1 entre hace 16,2 ka y 15,8 ka. Las temperaturas durante GI-1 fueron equivalentes a las del Holoceno y alcanzan un mínimo durante el GI-1d, el cual ocurrió hace 14,1 ± 0,1 ka. Es posible identificar una rápida variabilidad de temperatura durante el comienzo

del GS-1 y el inicio del Holoceno registrados por las IF. El registro de $\delta^{18}O$ y de δD_{FI} no muestran cambios significativos durante el Holoceno a escala milenaria. Gracias a la combinación de ambos registros, $\delta^{18}O$ y δD_{FI}, ha sido posible datar a una muy alta resolución eventos climáticos abruptos, p. ej. el evento del 8,2 ka (entre hace 8,29 ka y 8,10 ± 0,04 ka).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los proyectos españoles PID2019–106050RB-I00 (PYCACHU) y PID2022-139101OB-I00 (TEMPURA) por su financiación. J.L. Bernal-Wormull recibió el apoyo de una subvención del FPI (ref. BES-2017–081125). I. Cacho agradece el programa académico de la Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados (ICREA) de la Generalitat de Catalunya.

REFERENCIAS

Affolter, S., Häuselmann, A., Fleitmann, D., Edwards, R.L., Cheng, H. y Leuenberger, M. (2019): Central Europe temperature constrained by speleothem fluid inclusion water isotopes over the past 14,000 years. *Science Advances*, 5: eaav3809.

Bernal-Wormull, J.L., Moreno, A., Pérez-Mejías, C., Bartolomé, M., Aranburu, A., Arriolabengoa, M., Iriarte, E., Cacho, I., Spötl, C., Edwards, R.L. y Cheng, H. (2021): Immediate temperature response in northern Iberia to last deglacial changes in the North Atlantic. *Geology*, 49:-999–1003.

Bernal-Wormull, J.L., Moreno, A., Bartolomé, M., Arriolabengoa, M., Pérez-Mejías, C., Iriarte, E., Osácar, C., Spötl, C., Stoll, H., Cacho, I., Edwards, R.L. y Cheng, H. (2023): New insights into the climate of northern Iberia during the Younger Dryas and Holocene: The Mendukilo multi-speleothem record. *Quaternary Science Reviews*, 305, 108006.

Clark, P.U. Shakun, J., Baker, P., Bartlein, P., Brewer, S., Brook, E., Carlson, A., Cheng, H., Kaufman, D., Liu, Z., Marchitto, T., Mixa, A., Morrill, C., Otto-Bliesner, B., Pahnkeo, K., Russell, J., Whitlock, C., Adkins, J., Blois, J., Clark, J., Colman, S., Curry, W., Flower, B., He, F., Johnson, T., Lynch-Stieglitz, J., Markgraf, V., McManus, J., Mitrovica, J., Moreno, P. y Williams, J. (2012): Global climate evolution during the last deglaciation. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109, E1134–E1142.

García-Ruiz, J.M., Hughes, P.D., Palacios, D. y Andrés, N. (2023): The European glacial landscapes from the main deglaciation, En: *European Glacial Landscapes*. Elsevier, 243–259.

González-Sampériz, P., Aranbarri, J., Pérez-Sanz, A., Gil-Romera, G., Moreno, A., Leunda, M., Sevilla-Callejo, M., Corella, J.P., Morellón, M., Oliva, B. y Valero-Garcés, B. (2017): Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. *CATENA*, 149, 668–688.

Heiri, O., Brooks, S., Renssen, H., Bedford, A., Hazekamp, M., Ilyashuk, B., Jeffers, E., Lang, B., Kirilova, E., Kuiper, S., Millet, L., Samartin, S., Toth, M., Verbruggen, F., Watson, J., van Asch, N., Lammertsma, E., Amon, L., Birks, H., Birks, H.J., Mortensen, M., Hoek, W., Magyari, E., Muñoz Sobrino, C., Seppä, H., Tinner, W., Tonkov, S., Veski, S. y Lotter, A. (2014): Validation of climate model-inferred regional temperature change for late-glacial Europe. *Nature Communications*, 5, 4914.

Landais, A., Capron, E., Masson-Delmotte, V., Toucanne, S., Rhodes, R., Popp, T., Vinther, B., Minster, B. y Prié, F. (2018): Ice core evidence for decoupling between midlatitude atmospheric water cycle and Greenland temperature during the last deglaciation. Climate of the Past, 14, 1405–1415.

Rasmussen, S.O., Bigler, M., Blockley, S., Blunier, T., Buchardt, S., Clausen, H., Cvijanovic, I., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S., Fischer, H., Gkinis, V., Guillevic, M., Hoek, W., Lowe, J.J., Pedro, J., Popp, T., Seierstad, I., Steffensen, J.P., Svensson, A., Vallelonga, P., Vinther, B., Walker, M., Wheatley, J. y Winstrup, M. (2014): A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 106, 14–28.

Tarrats, P., Heiri, O., Valero-Garcés, B., Cañedo-Argüelles, M., Prat, N., Rieradevall, M. y González-Sampériz, P. (2018): Chironomid-inferred Holocene temperature reconstruction in Basa de la Mora Lake (Central Pyrenees). *The Holocene*, 28, 1685–1696.

Registro de un evento de alta energía en la planicie costera de Guardamar de Segura (Alicante, SE España).

Record of a high energy event in the coastal plain of Guardamar de Segura (Alicante, SE España).

D. Bonomo[1], J. E. Tent-Manclús[1,2], J. Alcántara-Carrió[1,3], R. Portantiolo Manzolli[3], J. Jordá Guijarro[1,4], C. Arteaga Cardineau[5], J. Navarro Pedreño[6], M. Jordan[6], Carlos R. Narváez[5]

1 Instituto Multidisciplinar para el Estudios del Medio "Ramón Margalef", Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig. davide.bonomo@ua.es
2 Dpto. Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig (España).; je.tent@ua.es
3 Dpto. Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid, 28049-Madrid (España). javier.alcantara@uam.es; rogerio.manzolli@uam.es
4 Dpto. Bioquímica y Biología Molecular y Edafología. Universidad de Alicante, 03690-San Vicente del Raspeig (España). juana.jorda@ua.es
5 Dpto. de Geografía de la Facultad Filosofía y Letras. Universidad Autónoma de Madrid, 28049-Madrid (España). carlos.arteaga@uam.es; carlosr.narvaez@estudiante.uam.es
6 Dpto. Agroquímica y Medio Ambiente. Universidad Miguel Hernández de Elche, 03202 Elche, Alicante (España). jonavar@umh.es; manuel.jordan@umh.es

Resumen: Los eventos de alta energía (tempestades/tsunamis/inundaciones) quedan normalmente registrados como niveles de sedimentos más gruesos y mal seleccionados. Este trabajo busca identificar posibles eventos de alta energía en el registro sedimentario litoral del Holoceno de Guardamar del Segura en las proximidades del yacimiento fenicio de Cabezo Pequeño del Estaño del siglo VIII a.C. La granulometría por difracción laser del sondeo de 5,50 m de profundidad, muestra predominio de limo fino. A la profundidad de 3,80 m el sondeo contiene un nivel de sedimentos bimodales (arena fina y limo grueso) muy mal seleccionados. La asimetría positiva de la moda de arenas indica que podrían ser sedimentos dunares transportadas por un desbordamiento costero de olas de tempestad o tsunami hacia el antiguo entrante marino, hoy soterrado. Sin embargo, el resultado del análisis FTIR (Reflectancia total atenuada de Espectroscopía Infrarroja) indica alrededor de 4,00 m de profundidad un predominio de carbonatos, correspondiente a dolomías ricas en hierro, de procedencia continental, el cual puede deberse a un evento de alta energía que llegó desde el interior. Al no ser posible la datación por falta de preservación de material datable, se ha considerado una tasa de sedimentación ya descrita en la bibliografía de 1,9 mm/año, con la cual se deduce que el evento de inundación de alta energía ocurrió alrededor de hace 2000 años.

Palabras clave: Inundación fluvial, FTIR, Cabezo Pequeño del Estaño, Guardamar, Bajo Segura.

Abstract *High-energy events (storms/tsunamis/floods) are recorded as thicker, poorly sorted sediment levels. This work seeks to identify possible high-energy events in the Holocene sedimentary record of Guardamar del Segura in the vicinity of the Phoenician site of Cabezo Pequeño del Estaño from the 8th century BC. The laser diffraction granulometry of the 5.50 m deep borehole shows a predominance of fine silt. At a depth of 3.80 m, the borehole contains a level of bimodal sediments (fine sand and coarse silt) that are very poorly selected. The positive asymmetry of the sand pattern indicates that they could be dune sediments transported by a coastal overflow by storm waves or tsunamis towards the ancient marine inlet, now buried. However, the result of the FTIR analysis indicates around 4.00 m depth a predominance of iron-rich dolomites, from inland, thus could indicate the high energy event that arrived from the interior. Since dating is not possible due to lack of preservation of datable material, a sedimentation rate already described in the bibliography of 1.9 mm/year has been considered, from which it is deduced that the high-energy event occurred around 2000 years ago.*

Key words: *River flooding, FTIR, Cabezo Pequeño del Estaño, Guardamar, Bajo Segura*

INTRODUCCIÓN

La configuración actual de la desembocadura del Río Segura en Guardamar del Segura es relativamente reciente. Anteriormente, dicho río desembocaba en el *sinus ilicitanus* (Golfo de Elche) que alcanzaba desde Guardamar del Segura hasta Orihuela, y desde ahí a Elche y Santa Pola (Tent-Manclús, 2013). En dicho golfo desembocaban los ríos Segura por el W y Vinalopó por el N, los cuales fueron progresivamente colmatándolo. El primero trasladó su desembocadura a Guardamar del Segura y el segundo, se infiltra en la llanura al sur de Elche abriendo sólo su desembocadura al mar en las grandes crecidas, como ocurrió en 1982 (Bru, 1992). El *sinus* en épocas ibero-romanas y anteriores sería navegable y los antiguos puertos se localizarían en sus

márgenes, su colmatación final fue antrópica debido al relleno artificial y desecación impulsados por el Cardenal Belluga, obispo de Cartagena que adquirió los terrenos para ponerlo en cultivos. (Silva *et al.,* 2019).

En el término municipal de Guardamar del Segura hay un puerto fenicio localizado en el asentamiento de "La Fonteta", no muy lejos de otro enclave también fenicio, formado por un poblado fortificado del siglo VIII a. C. en el denominado Cabezo Pequeño del Estaño (Fig.1). Se da la circunstancia que dicho asentamiento fue destruido por eventos sísmicos que lo llevaron a su destrucción y abandono (Arteaga Cardineau *et al.,* 2016). Este asentamiento se encuentra fortificado y probablemente se protegerían de la población local. Al ser los fenicios un pueblo marinero y comerciante, es fácil pensar que en las proximidades podría estar un puerto o fondeadero, reuniendo el paleovalle oriental más inmediato, actualmente colmatado, características afines para ser acreedor de tal infraestructura. Así pues, este trabajo surge en parte con el objeto de analizar esta posibilidad de refugio marino potencialmente aprovechable, la caracterización sedimentaria de relleno de la llanura de inundación fluvial próxima, donde previsiblemente se encontraba el puerto fenicio original y la identificación de posibles eventos de alta energía.



FIGURA 1. *Situación del sondeo de Cabezo Pequeño del Estaño, localización dentro de la provincia de Alicante al Oeste de pueblo de Guardamar.*

MATERIALES Y METODOS

El 23 de enero 2023 se realizó un sondeo manual de 5,50 m de longitud localizado al oeste del casco urbano de Guardamar del Segura, sobre la margen derecha del río Segura, a unos 3,5 kilómetros de su actual desembocadura en el mar Mediterráneo (Fig.1). Dicho sondeo se localiza en la llanura de inundación fluvial próxima a la base del cerro donde se ubica el yacimiento fenicio Cabezo Pequeño del Estaño, el cual está constituido principalmente por un conjunto de calcarenitas y areniscas pliocenas, de textura muy fina, y con cierta riqueza en fósiles. (Arteaga Cardineau *et al*., 2016). La localización del sondeo (huso 30; 703880, 4218524) ha sido elegida en base a los estudios previos de reconstrucción del *sinus ilicitanus* y con la experiencia arqueológica previa en la zona. Situado en el centro un valle colmatado perpendicular al Río Segura (Fig.2).



FIGURA 2. *Ortofoto del Cabezo Pequeño del Estaño, margen derecho del Rio Segura. El circulo negro marca la localización del sondeo.*

El sondeo fue muestreado cada 10 cm, excluyendo los 145 cm más superficiales, por tratarse de un suelo agrícola mezclado por las labores, con raíces y restos de plástico. El nivel piezométrico fue encontrado a 2,6 m de profundidad. La granulometría fue obtenida mediante difractómetria laser con el equipo Microtrac SYNC, llevado a cabo en los Servicios Técnicos de Investigación de la Universidad de Alicante. Los resultados obtenidos han sido procesados siguiendo la metodología de Folk y Ward (1957), empleando el software GRADISTAT (Blott y Pye, 2001) para el cálculo de los parámetros granulométricos y los valores obtenidos del tamaño de grano medio D50 (percentil 50, en µm), a lo largo del sondeo (Fig. 3).

La mineralogía se ha determinado mediante análisis ATR FTIR (Reflectancia total atenuada de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier), que permite el análisis de formas cristalinas y amorfas. Los espectros se analizan entre 500 y 4000 cm^{-1}, con medidas en intervalos de cada cm^{-1}. Los análisis se realizaron en la unidad de rayos X de monocristal y espectroscopias vibracional y óptica de los Servicios Técnicos de Investigación de la Universidad de Alicante, usando el equipo Jasco FTIR 4700 IRT 5200. La muestra se analizó en seco, tamizada a 0,2 mm, se calculó la derivada segunda del espectro. De esta forma se consigue afinar las señales y se pueden detectar diferentes tipos de carbonatos (Sánchez-Sánchez *et al.,* 2019). Para la representación de los espectros y para poder comparar se

han normalizado respecto a la señal a 1000 cm^{-1}. En la representación de la Fig. 3, se ha dividido el número de onda por 10 para una mejor visualización.

RESULTADOS

En el análisis granulométrico del sondeo (Fig. 3) predomina el tamaño de grano de limo fino (D50), desde los 1,80 a 5,50 m de profundidad. En la parte superior estudiada, de 1,45 a 1,80 m es de limo grueso probablemente porque puede tener aún algo de mezcla del suelo agrícola. A la profundidad de 2,45 a 2,85 m se localiza un intervalo más arenoso. A 3,80 m de profundidad, se ha identificado una muestra de sedimento bimodal más grueso (D50 = 99 µm) compuesto de arena muy fina y limo grueso muy mal seleccionados (Fig. 3). La curva granulométrica de esta muestra presenta asimetría positiva, con una cola de sedimento muy fino, y según la kurtosis es platikurtica. A unos 4,65 m aparece un intervalo más arcilloso de color oscuro.

Los resultados del análisis FTIR, son muy homogéneos tal como se muestran en la Fig. 3. Sólo aparece una anomalía entre 3,5 y 4,5 m de profundidad donde el pico a 1400 cm^{-1} está más marcado. Esa señal es de carbonatos. La señal a 728-730 cm^{1} en la derivada segunda del espectro, nos permite detectar una presencia de dolomitas-sideritas, además de la abundante calcita presente en todo el perfil. Las dolomías son abundantes aguas arriba del río Segura en las Sierras de Callosa y Orihuela (Montenat et al., 1972).

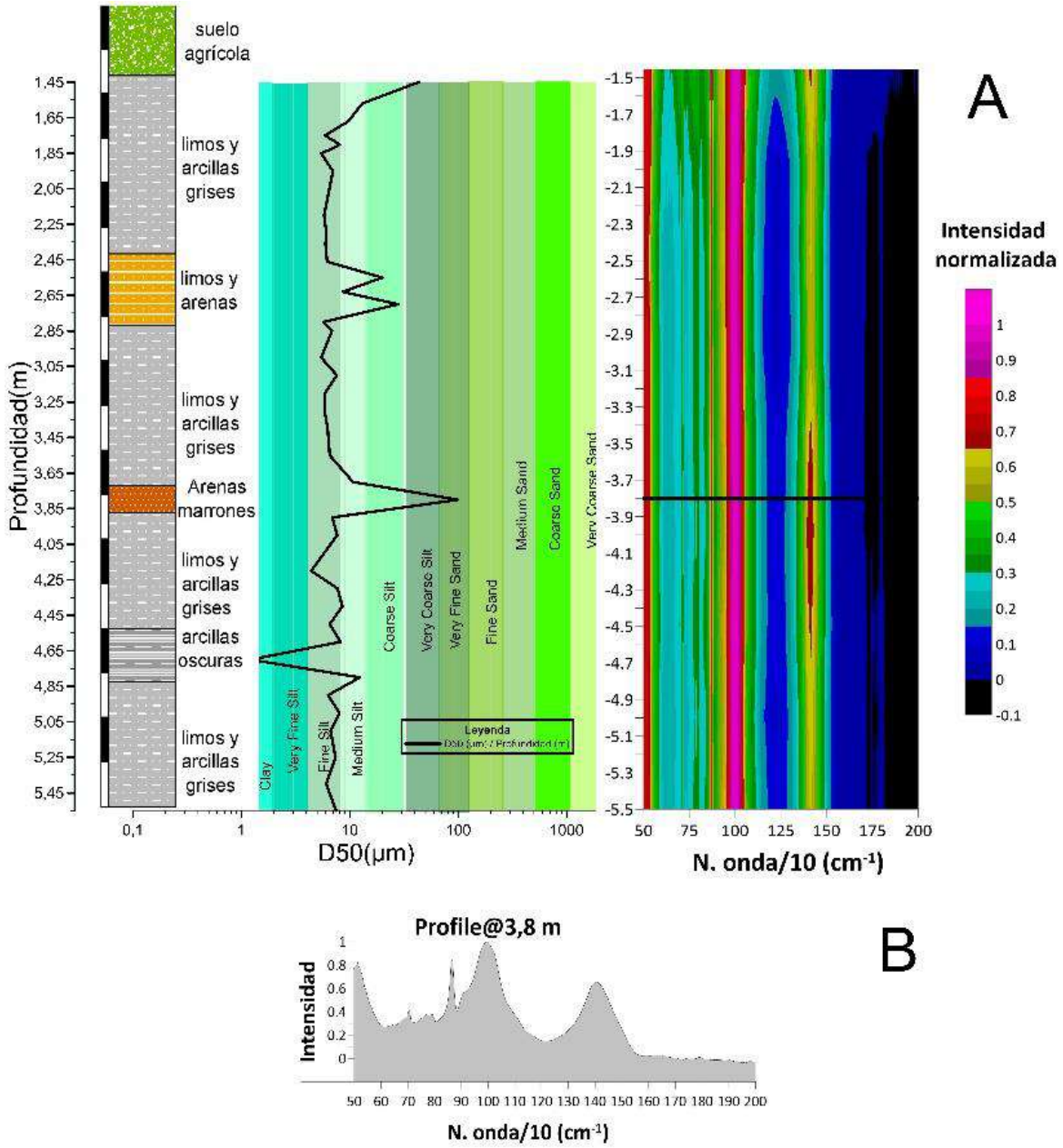


FIGURA 3. *Arriba (A), se muestra la columna estratigráfica, la variación del parámetro D50(µm) a lo largo del sondeo. A 3,8 m de profundidad se localiza una muestra. El D50 es el tamaño medio o promedio de partícula. Variación del espectro FTIR N onda/10 (cm^{-1}) vs Profundidad(m). (B) El perfil a 3,8 m de profundidad muestra el N. onda y la Intensidad normalizada entre -0.1 y 1 en valor absoluto.*

DISCUSIÓN

Los fenicios abandonaron el asentamiento de Cabezo Pequeño del Estaño, tras un importante evento sísmico (Arteaga Cardineau *et al.,* 2016). Se trasladaron hacia el mar en el yacimiento de La Fonteta (García Menárguez, y Prados Martínez, 2014).

Los eventos extremos de inundación pudieron causar un aterramiento de la ensenada portuaria. A pesar de las múltiples alteraciones de los cursos fluviales de la zona en los últimos siglos (Tent-Manclús, 2013), las inundaciones siguen ocurriendo y representan eventos que la población local conoce bien, poco frecuente, pero de gran energía, provocando pérdida de vidas y daños materiales enormes como las riadas de 1982 y 1997 (Archivo Confederación Hidrográfica del Segura, 2020). Es fácil imaginar que los eventos pasados ocurrían sin la regulación actual del régimen fluvial por lo que llegarían al tramo final del río con mayor energía que en la actualidad.

A 3,80 m de profundidad se ha identificado un evento de alta energía (Fig. 3). La asimetría positiva en la moda de las arenas, debido a una posible influencia de un patrón de corriente cíclico, indicaría un entorno de alta energía (Duane, 1964) y que este sedimento puede ser dunar, transportados por eventos como olas de tempestad, tsunami, o un evento de inundación, proveniente de la costa hacia el interior hacia la ensenada, hoy soterrada. Cabe destacar el carácter bimodal de la curva granulométrica de la muestra, lo cual indica que dos procesos de transporte actuaron al mismo tiempo sobre el sedimento. Sin embargo, en el sondeo no se han encontrado restos marinos arrastrados, lo que hace pensar que este sedimento ha sido removido y transportado desde zonas emergida, como una zona de dunas. Al no encontrarse ni restos de conchas marinas ni restos de madera, no ha sido posible realizar una datación. Para establecer una edad se ha considerado, una tasa de sedimentación de 1,9 mm/año, publicada en Soria *et al.,* (1999) para la zona de la desembocadura del Segura. Considerando esta tasa, dicho nivel de arenas tendría una edad aproximada de hace 2000 años.

CONCLUSIÓN

La zona ha estado afectada por eventos extremos sísmicos y de inundación fluvial, pero no parece que haya registro de un evento de tsunamis en al menos los últimos 2000 años. Se ha observado un nivel producido por un evento de alta energía correspondiente a hace 2000 años, el cual podría estar relacionado a un evento de inundación del Río Segura. Este tipo de eventos, en siglos anteriores, pudieron afectar a la colmatación del entrante marino adyacente al asentamiento fenicio del Cabezo Pequeño del Estaño y provocar su abandono definitivo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al proyecto MOLICO/CV con fondos del programa Think in Azul Next Generation EU (PRTR-C17.I1) de la Unión Europea. Proyecto de la Generalitat Valenciana GVA-THINKINAZUL/2021/039.

REFERENCIAS

Archivo de la Confederación Hidrográfica del Segura O.A, (2020): Cronología de riadas en la cuenca del Segura, *Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*, www.chsegura.es/es/confederacion/unpocodehistoria/cronologia-de-riadas-en-la-cuenca-del Segura/

Arteaga Cardineau, C., García Menárguez, A., Prados, F. y Baudot, E. (2016): El Cabezo del Estaño de Guardamar (Alicante, España): Avance preliminar de Evidencias Arqueosísmicas en un asentamiento Fenicio del Siglo VIII aC. *Revista Mundo Investigación*, 2 (1), 145-155.

Blott, S. J. y Pye, K. (2001): Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 1237-1248.

Bru, C. (1992*):* Los caminos del agua El Vinalopó, *Confederación Hidrográfica del Júcar*, 257 p.

Duane D.B. (1964): Significance of skewness in recent sediments, western Pamlico Sound, North Carolina. *Journal of Sedimentary Research*, 34 (4): 864–874.

Folk, R.L. y Ward, W.C. (1957): Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research;* 27 (1): 3–26.

García Menárguez, A. y Prados Martínez, F. (2014): La presencia fenicia en la península Ibérica: El Cabezo Pequeño del Estaño (Guardamar del Segura, Alicante). *Trabajos de Prehistoria* 71: 113-133.

Montenat, Ch., Egeler, C. G., Rondeel, H. E., Simon, O. J., Van Winkoop, A. A., De Boer, A. y Kampschuur, W**.** (1972): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 913 (Orihuela)*. IGME, Madrid.

Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Elez, J., Roquero, E., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Bardají, T. y Perucha M.A. (2019): Historical earthquakes in the Lower Segura basin (SE Spain): geological and archaeological evidence from pre-roman to modern times. Z. F. Geomorphologie, 62 (2): 247–269.

Soria, J. M., Alfaro, P., Estevez, A., Delgado, J. y Duran, J. J. (1999): The Holocene sedimentation rates in the lower Segura Basin (eastern Betic Cordillera, Spain); eustatic implications. *Bulletin de la Société géologique de France*, 170(3), 349-354.

Sánchez-Sánchez, A., Cerdán, M., Jordá, J.D.; Amat, B.; Cortina, J. (2019). Characterization of soil mineralogy by FTIR: application to the analysis of mineralogical changes in soils affected by vegetation patches. *Plant Soil* 439, 447–458.

Tent-Manclús, J. E. (2013): Cambio de la línea de costa en el Bajo Segura (Sur de Alicante) en los últimos 15.000 años. *Estudios geográficos*, 74(275): 683-702.

Mejora de la gestión de un ecosistema agrícola semiárido mediante el mapeo digital de las propiedades del suelo: el caso de Salamanca (España)

Improving the management of a semi-arid agricultural ecosystem using digital mapping of soil properties: the case of Salamanca (Spain)

M. Criado[1], L. Merchán[1] y A. Martínez-Graña[2]

1 Área de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Universidad de Salamanca. 37007 Salamanca
marcocn@usal.es leticiamerchan@usal.es
2 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. 37008 Salamanca. amgranna@usal.es

Resumen: La disponibilidad de información edáfica es imprescindible para garantizar una adecuada gestión de los ecosistemas agrícolas y con ello evitar problemas relacionados con las malas prácticas como el calentamiento global, la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad o la contaminación de suelos agrícolas y aguas. Existen herramientas geoestadísticas como el *kriging* que, ayudadas por los Sistemas de Información Geográfica, permiten proporcionar de manera rápida y barata información de los parámetros edáficos a partir de un muestreo de suelos. En el presente trabajo, se establece la metodología para realizar interpolaciones con *kriging* a partir de datos puntuales medidos de diferentes propiedades edáficas de relevancia para la gestión de los suelos, confeccionándose mapas con la distribución y variación de las propiedades en un sistema agrícola semiárido del entorno de Salamanca. Los resultados muestran que el *kriging* es una buena herramienta para explicar la distribución de las propiedades del suelo en lugares no muestreados a partir de la interpolación de los datos muestreados.

Palabras clave: Ecosistema agrario, SIG, Geoestadística, Kriging, Cartografía del suelo.

Abstract: *The availability of soil information is essential to ensure proper management of agricultural ecosystems and thus avoid problems related to bad practices such as global warming, soil erosion, loss of biodiversity or contamination of agricultural soils and water. Geostatistical tools such as kriging, aided by Geographic Information Systems, can quickly and cheaply provide information on soil parameters from soil sampling. In the present work, the methodology to perform kriging interpolations from point data measured for different soil properties of relevance for soil management is established, producing maps with the distribution and variation of the properties in a semi-arid agricultural system in the area of Salamanca. The results show that kriging is a good tool to explain the distribution of soil properties in unsampled sites by interpolating sampled data.*

Key words: *Agrarian ecosystem, GIS, Geostatistics, Kriging, Soil mapping*

INTRODUCCIÓN

El mapeo digital de suelos usando inferencia estadística y Sistemas de Información Geográfica (SIG), es una técnica que permite a los investigadores interpolar con precisión patrones espaciales de las propiedades del suelo, reduciendo los costos de muestreo de campo y análisis de laboratorio, y permite acelerar el proceso de mapeo de suelos. Sin embargo, la fiabilidad de los mapas de variabilidad espacial depende de unos datos de muestreo adecuados (número de muestras o la distancia entre ellas) y de la precisión de la interpolación espacial. Existen diversos métodos de interpolación, entre ellos, el *kriging* ha demostrado ser lo suficientemente robusto para estimar valores en ubicaciones no muestreadas a partir del estudio de ubicaciones concretas muestreadas, proporcionando las mejores estimaciones lineales insesgadas e información sobre la distribución del error de estimación y muestra fuertes ventajas estadísticas respecto a otros métodos (Myers, 1994; Kravchenco, 2003). Diversos autores ya emplearon esta técnica en el mapeo predictivo de suelos estudiando factores edáficos como distribución de nutrientes, estimación de erosión, carbono orgánico, materia orgánica; metales pesados, propiedades químicas con importancia en la agricultura, o índices de calidad del suelo (Santos-Francés et al., 2017; Panday et al., 2018; Santos-Francés et al., 2019).

A pesar de la buena adaptación de estas técnicas de interpolación al mapeo predictivo de suelos, no existen estudios que representen la variabilidad de las principales propiedades edáficas en el sector de estudio. Esto se traduce en la proliferación de prácticas agrícolas inadecuadas a las necesidades de los suelos. Por ello, el objetivo del trabajo es predecir la distribución de las propiedades del suelo que tienen una mayor relevancia en el desarrollo agrícola a partir de los suelos muestreados y de la técnica geoestadística de interpolación *kriging* ordinario; mejorando así el conocimiento agronómico de los suelos de la zona, estableciendo una metodología que pueda ser replicada.

La región estudiada se encuentra en la Meseta Norte, con topografía plana a suavemente ondulada, con escaso desnivel (182 m) entre cotas máximas (Los Montalvos, 942 m s.n.m., modelado sobre un sinclinorio formado por cuarcita armoricana y pizarra del zócalo de edad Ordovícico-Silúrico) y mínimas (vega del río Tormes, sobre depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno con alturas de 760 m), predominando en cotas intermedias llanuras labradas sobre sedimentos horizontales del Paleógeno y Neógeno. Los suelos, clasificados según el método de taxonomía de suelos *World Reference Base for Soil Resources* de la FAO, son Luvisoles y Cambisoles mayoritariamente y, en menor medida, Fluvisoles, Regosoles y Leptosoles (Criado, 2020).

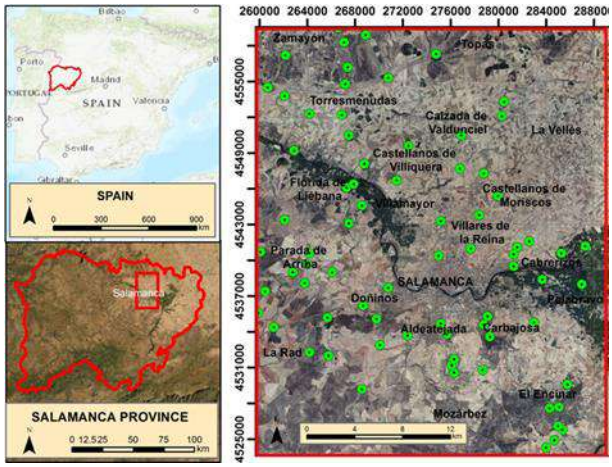


FIGURA 1. *Localización del área de estudio.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la caracterización general de los suelos de la región se estudiaron 76 suelos distribuidos por las distintas litologías y posiciones fisiográficas. Una vez localizados los puntos de estudio se tomó una muestra del horizonte superficial (0-25 cm), correspondiente con la capa arable y con gran importancia en el desarrollo de los cultivos. Posteriormente, se secaron al aire, se desmenuzaron y se tamizaron en un tamiz de 2 mm, antes de realizar una analítica físico-química completa.

Del total de propiedades analizadas disponibles para toda el área, se eligieron para el estudio un conjunto representativo de 12 que aglutinan a los parámetros de mayor importancia para determinar las condiciones agrícolas del suelo (Santos-Francés et al., 2019): nitrógeno (N), fósforo asimilable (P), potasio asimilable (K), textura (contenido de arena y arcilla), capacidad de intercambio catiónico (CIC), carbono orgánico (CO), pH, contenido en carbonatos (CaCO3), COLE y retención de agua a 33 y 1500 kPa (RA).

Respecto al procedimiento estadístico, inicialmente se calcularon estadísticas descriptivas de las propiedades estudiadas (media, mediana, desviación estándar, máximo, mínimo, curtosis y coeficiente de variación) para ampliar y complementar el conocimiento de los suelos del entorno, para lo cual se empleó el software estadístico SPSS v.25. Tras esto, a partir de los datos muestrales, se procede a realizar la interpolación, para lo cual se emplea el método *kriging* ordinario.

Previamente, la normalidad de los datos de todos los parámetros fue estudiada mediante el programa SPSS v.25 utilizando el método visual (histogramas, box-plots y Q-Q plots). Esto fue refutado mediante la realización del test Kolmogorov-Smirnov al 0.01 % de probabilidad. El método de *kriging* utiliza la semivarianza para estimar la estructura de la distribución espacial de las propiedades del suelo. El modelado y la estimación de semivariogramas son esenciales para el análisis estructural y la interpolación espacial (Panday, 2018), por lo que se estudiaron los parámetros geoestadísticos principales para cada propiedad: tipo de modelo, rango (R), *nugget* o pepita (N), estructura, *sill* o umbral (S) y rango. Además, la dependencia espacial (Sp. D), también conocida como RD (ratio de dependencia), se determinó a partir de la relación entre la pepita y las variaciones del umbral (Omran, 2012). Para asegurar la dependencia espacial, como regla general, el intervalo de muestreo o lag (I) debe ser inferior a la mitad del rango de la variación espacial. Si la relación entre la pepita y el Sill (Sp. D) es menor que 0,25, la varianza tiene una fuerte dependencia espacial, si la relación oscila entre 0,25 y 0,75, la varianza tiene una dependencia espacial moderada, y si es mayor a 0.75 se considera como ligera.

Para realizar la interpolación, se insertó el fichero .dbf en ArcMap con las coordenadas y datos muestrales relativos a cada propiedad en los 76 perfiles estudiados, y se elaboraron empleando el método *kriging* ordinario y el módulo *Geostatistical Analyst* de ArcMap v.10.5 (ESRI) las capas digitales con la estimación de la distribución de cada propiedad. Para cada parámetro, se establecieron 5 tipos de distribución: muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo. Para ello, el rango de cada propiedad se dividió por el número de intervalos (5), y el resultado se usó como el ancho de cada intervalo. Al agregar este valor al valor más bajo de la correspondiente propiedad se obtuvo el límite superior del primer intervalo, y así sucesivamente, hasta que se alcanzó el rango superior de la propiedad. Estas subdivisiones no indican una aptitud o carencia para un determinado fin, sino una menor o mayor separación de la media regional.

Finalmente, los resultados de la interpolación fueron chequeados con validación cruzada, para lo cual se empleó la extensión *Geostatistical Analyst* de ArcMap. Este método consiste en la eliminación de una ubicación de datos y luego en la predicción de los valores en dicho punto utilizando los datos del resto de ubicaciones, de manera que se comparan el valor predicho con el valor observado. De esta validación cruzada se estimaron para verificar la idoneidad de la precisión efectuada por *kriging* el *Mean Standardized Error* (MSE), el *Root Mean Square Error* (RMSE), normalmente el más empleado, y el *Root Mean Square Standardized Error* (RMSSE). Un valor de MSE cercano a cero indica que el método de interpolación es insesgado. Si el valor de RMSE está cerca de la desviación estándar de los datos, entonces el modelo ha realizado una adecuada predicción. El RMSSE debe ser cercano a uno si los errores estándar de predicción son válidos y si es mayor o menor que uno está subestimando o sobrestimando, respectivamente, la variabilidad en sus predicciones.

RESULTADOS

La recopilación de los principales estadísticos descriptivos para cada parámetro edáfico se presenta en la Tabla 1. El coeficiente de variación (CV) refleja la variabilidad de las propiedades edáficas. Se observa que los datos del CV son elevados, lo que significa que existe gran diversidad edáfica en la zona muestreada (ligadas a la diversidad litológica y geomorfológica del sector). Además, el estudio de la normalidad de los datos determinó que los parámetros arena, pH y retención de agua a 33 kPa mostraban distribuciones normales. Para el resto de parámetros se precisó la transformación logarítmica para poder efectuar la interpolación. Los resultados de las interpolaciones de cada propiedad se agruparon en 5 rangos de valores muy bajos, bajos, moderados, altos y muy altos.

Propiedad	Media	*St. Desv.*	Max.	Min	CV
Arena	58.19	19.40	95.34	1.04	33.34
Arcilla	16.76	13.59	76.11	0.67	81.09
Carbono	1.47	1.32	7.32	0.25	89.80
N	0.10	0.10	0.61	0.01	100.0
P	4.23	3.55	15.2	0.50	83.93
K	10.06	7.42	58.4	3.00	73.76
$RA_{33\ kPa}$	16.70	8.67	54.61	4.36	51.92
$RA_{1500\ kPa}$	7.89	6.02	32.21	0.96	76.30
COLE	0.03	0.04	0.26	0.00	133.33
pH	5.91	0.86	7.9	4.30	14.55
CIC	11.82	8.84	46.05	1.74	74.79
$CaCO_3$	1.37	3.13	24.17	0.00	228.46

TABLA I. *Estadísticas descriptivas de los parámetros edáficos estudiados.*

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran la distribución de las propiedades físico-químicas del suelo en el sector de estudio, las cuales ayudan a los gestores a tomar mejores decisiones en cuanto al manejo de las tierras agrícolas.

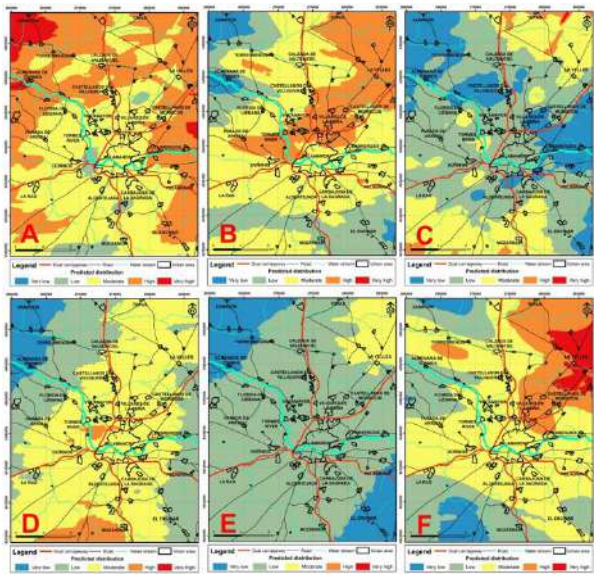


FIGURA 2. *Distribución de las propiedades físicas con mayor impronta en el desempeño agrícola en los suelos estudiados: A) Arena; B) Arcilla; C) Carbono orgánico; D) Retención de agua a 33 kPa; E) Retención de agua a 1500 kPa; F) COLE.*

El modelo de semivariograma y los principales parámetros geoestadísticos de las propiedades del suelo estudiadas se muestran en la Tabla II. Se eligió el modelo de semivariagrama para cada propiedad en función del que presentara menor RMSE.

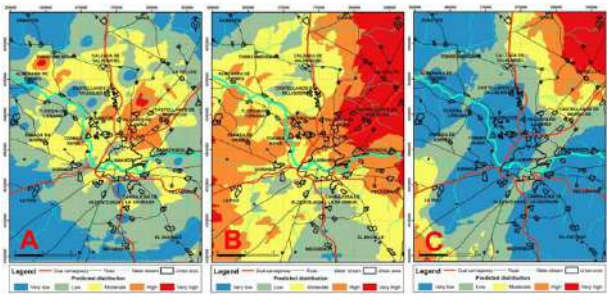


FIGURA 3. *Distribución de las propiedades químicas con mayor impronta en el desempeño agrícola en los suelos estudiados: A) CEC; B) pH; C) CaCO3 equivalente.*

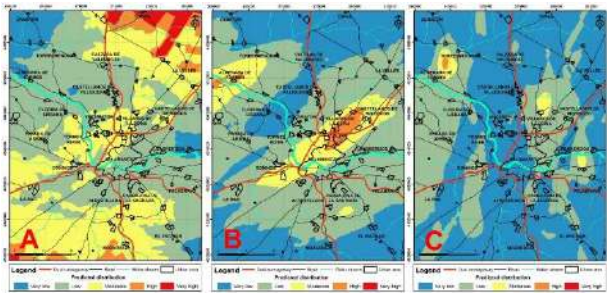


FIGURA 4. *Distribución de los principales nutrientes del suelo en la zona: A) Nitrógeno; B) Fósforo asimilable; C) Potasio asimilable*

P	M	R	I	N	P	S	N/S	D
Arena	G	4236	353	0.21	0.16	0.37	0.57	M
Arcilla	G	6510	542	0.33	0.22	0.55	0.60	M
CO	G	3001	250	0.16	0.29	0.45	0.36	M
N	C	2947	245	0.24	0.18	0.42	0.57	M
P	G	10565	880	0.48	0.30	0.78	0.62	M
K	C	4639	386	0.12	0.25	0.37	0.32	M
RA_{33}	E	44607	3717	0.20	0.02	0.22	0.91	L
RA_{1500}	E	44607	3717	0.29	0.10	0.39	0.74	M
COLE	E	8918	743	0.88	0.81	1.69	0.52	M
pH	E	3730	311	0.01	0.00	0.02	0.74	M
CIC	C	2982	248	0.04	1.63	1.67	0.02	H
$CaCO_3$	G	8811	734	7.26	2.61	9.87	0.74	M

TABLA II. *Análisis de semivarianza de la estructura espacial de los parámetros del suelo. P=Parámetro; M= Modelo (G-Gausiano; C-Circular; E-Exponencial); R= Rango; I= Intervalo; N=Pepita; P=Partial; S=Umbral; D=Dependencia espacial.*

Para los parámetros RA, pH y COLE el modelo exponencial proporcionó el mejor ajuste al semivariograma, siendo el modelo circular el que mejor se ajustó al semivariograma de los parámetros N, K y CEC, mientras que el gaussiano fue el que mejor se ajustó para el resto. En relación a la Sp. D de los parámetros del suelo, osciló entre 0,02 (en CIC) y 0,91 (en RA_{33kPa}), siendo alta (en CIC), moderada (en Arena, Arcilla, CO, N, P, K, $RA_{1500kPa}$, COLE, pH y CaCO3) o débil (en RA_{33kPa}). Los rangos de dependencias espaciales fueron grandes y varían normalmente entre los 2947 m para N y los 10565 m para P, lo que indica que el intervalo de muestreo óptimo varía mucho entre las diferentes propiedades del suelo. Un valor anormalmente alto se obtuvo para los parámetros de retención de agua RA con

un valor de 44607 m. En cuanto al efecto pepita, el valor más alto observado se corresponde con el $CaCO_3$ (7.26), lo que indica discontinuidad entre las muestras y está en consonancia al tratarse del parámetro con el peor ajuste, mientras que el valor más bajo resultó para el pH y CIC (0.02 y 0.04).

Respecto a la validación cruzada, los resultados se resumen en la Tabla III. Los MSE obtenidos pueden considerarse, globalmente, como aceptables, debido a su cercanía a 0. Respecto al RMSS, los parámetros con valores cercanos a 1 como arena, COLE y pH (0.9<RMSS<1.1) presentan muy buena precisión. Con alta precisión se obtuvieron los parámetros arcilla, fósforo, retención a agua a 1/3 atm. y calcio, ya que presentan valores próximos a 1 (0.8<RMSS<0.9 y 1.1<RMSS<1.2). Las propiedades carbono orgánico, nitrógeno, potasio, retención de agua a 15 atm., magnesio y capacidad de cambio mostraron precisiones aceptables (0.5<RMSS<0.8 y 1.2<RMSS<1.6). Por último, los carbonatos presentan una muy baja precisión (RMSS cercano a 0), lo que se relaciona con las dos poblaciones claramente diferenciadas que existen en los suelos: los suelos sobre materiales antiguos ácidos no presentan carbonatos, mientras que en el caso de los materiales terciarios la presencia es usual. Además, el valor RMSS muestra que el modelo ha subestimado los valores para los parámetros arcilla, carbono orgánico, nitrógeno, potasio, retención de agua a 1/3 y 15 atm., COLE, pH, conductividad y densidad aparente (RMSSE >1), mientras que para los restantes los ha sobreestimado, si bien estos errores no son elevados debido a su cercanía a 1 (excepto para los carbonatos). Por último, el RSME, el medidor más empleado, confirma estas buenas precisiones obtenidas para la mayor parte de los parámetros, debido a la cercanía de su valor respecto a la desviación estándar de cada parámetro, reflejada en la Tabla I.

Parámetro	MSE	RMSE	RMSSE
Arena	0.0266	18.8581	0.9640
Arcilla	-0.1050	14.1105	1.1391
Carbono orgánico	-0.1376	1.3265	1.2204
Nitrógeno	-0.1236	0.1001	1.2902
Fósforo disponible	-0.0699	3.4521	0.8164
Potasio disponible	-0.1036	8.3775	1.3638
Retención agua (33 kPa)	-0.0753	8.6836	1.1145
Retención agua (1500 kPa)	-0.1635	6.0435	1.5121
COLE	-0.1384	0.0446	1.0133
pH	-0.0031	0.8596	1.0221
Capacidad Cambio Cationes	-0.0095	12.5947	0.6881
$CaCO_3$ equivalente	0.0019	5.3464	0.0062

TABLA III. *Errores obtenidos de la validación cruzada para estimar la precisión de la interpolación.*

CONCLUSIONES

El conocimiento de las distribuciones de las propiedades físico-químicas principales de los suelos de un entorno es esencial para poder ejecutar en la misma una adecuada gestión agrícola. La aplicación de Sistemas de Información Geográfica y métodos geoestadísticos, incluida la estadística descriptiva y el análisis de semivariogramas, permite mejorar la descripción de la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas de la capa arable del suelo. Las estadísticas descriptivas permiten conocer las distribuciones de los datos y sentar las bases para el análisis geoestadístico. La interpolación geoestadística identificó que el mejor ajuste del semivariograma para cada propiedad edáfica se puede alcanzar mediante distintos modelos (exponenciales, esféricos, circulares o gaussianos) y, en general, mostraron una dependencia espacial moderada. Además, se pudieron validar los resultados mediante la validación cruzada, arrojando en general las interpolaciones buenas precisiones. Los mapas *kriging* de las propiedades estudiadas resultaron eficaces para explicar la distribución de las propiedades del suelo en lugares no muestreados con base en datos muestreados. Estos mapas ayudarán a los agricultores a tomar decisiones de manejo eficientes basadas en el conocimiento adecuado de las condiciones de los suelos agrícolas existentes. Por tanto, estos resultados muestran que el análisis geoestadístico utilizando la técnica *kriging* es una herramienta de predicción efectiva, rápida y barata para explorar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, por lo que recomendamos esta herramienta para futuras campañas de muestreo en otras regiones agrícolas mediterráneas.

REFERENCIAS

Criado, M. (2020): *Análisis geoambiental aplicado a la evaluación estratégica de la ciudad de Salamanca y alrededores. Cartografías temáticas mediante SIG*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 417 p.

Kravchenko, A.N. (2003): Influence of Spatial Structure on Accuracy of Interpolation Methods, *Soil Science Society of America Journal*, 67 (5): 1564-1571

Myers, DE. (1994): Spatial interpolation: an overview. *Geoderma*, 62(1–3): 17–28

Omran, EE. (2012): Improving the prediction accuracy of soil mapping through geostatistics. *International Journal of Geosciences*, 3:574–590

Panday, D., Maharjan, B., Chalise, D., Shrestha, R. y Twanabasu, B. (2018): Digital soil mapping in the Bara district of Nepal using kriging tool in ArcGIS. *PLoS ONE,* 13(10): e0206350

Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Zarza, C.A., Sánchez, A.G. y Rojo, P.A. (2017): Spatial Distribution of Heavy Metals and the Environmental Quality of Soil in the Northern Plateau of Spain by Geostatistical Methods. *International journal of environmental research and public health*, 14(6): 568

Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Ávila-Zarza, C., Criado, M. y Sánchez-Sánchez, Y. (2019): Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain). *Geoderma*, 354: 113872.

Datación mediante OSL de depósitos marinos Cuaternarios emergidos en la costa Cantábrica oriental.

OSL dating of emerged Quaternary marine deposits in the Eastern Cantabrian margin.

M. del Val[1,2], P. Bilbao-Lasa[2], M. Arriolabengoa[2], I. Álvarez[3], E. Iriarte[4] y A. Aranburu[2]

1 Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos. miren.delval@cenieh.es
2 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, UPV/EHU, Bº Sarriena s/n, 48940 Leioa, Bizkaia. peru_bl@hotmail.com, martin.arriolabengoa@ehu.eus, arantza.aranburu@ehu.eus
3 Dpto. de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería, UPV/EHU, Rafael Moreno "Pitxitxi" 3, 48013 Bilbao, irantzu.alvarez@ehu.eus
4 Laboratorio de Evolución Humana, Universidad de Burgos, Edificio de I+D+i, Pl. Misael Bañuelos s/n, 09001 Burgos, eiriarte@ubu.es

Palabras clave: Optically Stimulated Luminescence dating, Sea level, Quaternary, Cantabrian coast.

Resumen

Las fluctuaciones del nivel del mar a lo largo del Cuaternario han modelado el paisaje costero, generando elementos geomorfológicos a diferentes alturas, que resultan excelentes indicadores de la posición y altitud del nivel del mar en distintos momentos del Cuaternario. Por tanto, el estudio de estas morfologías y sedimentos marinos asociados permiten reconstruir la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo. En el marco de un proyecto en el que se estudia la evolución del nivel del mar en la costa del Cantábrico oriental (Bilbao-Lasa *et al.,* 2023), se ha realizado una amplia batería de dataciones numéricas utilizando los métodos de Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL) y Series de Uranio (U/Th) sobre depósitos costeros ubicados aproximadamente a +5 m sobre el nivel del mar actual. Los resultados obtenidos sugieren la formación de estos depósitos durante el MIS 5e (Marine Isotope Stage 5e). En este trabajo se presentan en detalle los resultados de las dataciones por OSL y se discuten las ventajas e inconvenientes del método para la datación de depósitos costeros.

Abstract

Quaternary sea-level fluctuations have a significant effect on the restructuration of coastal landscapes, shaping geomorphological features at variable elevations relative to the current coastline. These features serve as valuable indicators of past sea-level position and elevation. Therefore, the study of these coastal landforms has a significant value for the reconstruction of coastal evolution. Within the framework of a research project on sea-level dynamics along the eastern Cantabrian coast (Bilbao-Lasa *et al.*, 2023), several numerical dating analyses have been conducted using Optically Stimulated Luminescence (OSL) and Uranium Series (U/Th) methods. Coastal deposits at approximately +5 meters above present sea-level have been sampled for sedimentological characterization and dating purposes. The obtained results suggest the formation of these deposits during Marine Isotope Stage 5e (MIS 5e). This work provides a detailed explanation of the OSL dating results and discusses the advantages and limitations of the method for dating coastal deposits.

Referencias

Bilbao-Lasa, P., Aranburu, A., Álvarez, I., del Val, M., Cheng, H., Arriolabengoa, M., Iriarte, E., (2023). Record of the last interglacial sea level highstand based on new coastal deposits in the Cantabrian margin (Northern Iberian Peninsula), *Continental Shelf Research,* 266, 105096. https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105096.

Variación de la tasa de incisión fluvial en la sub-cuenca central del Nalón, vertiente septentrional de la Cordillera Cantábrica

Variation on the fluvial incision rate through the central Nalón sub-catchment, northern Cantabrian Mountains

FJ. Fernández[1], R. Menéndez-Duarte[1], D. Vázquez-Tarrío[2] and A. Medialdea[3]

1 Dpto. Geología, Universidad de Oviedo, C/Jesús Arias de Velasco sn, 33005 Oviedo. *fjfernandez@uniovi.es*
rmenendez@uniovi.es
2 Dpto. de Riesgos Geológicos y Cambio Climático, C.N. Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC),
dvazqu04@ucm.es
3 Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo Sierra Atapuerca 3, Burgos.
alicia.medialdea@cenieh.es

Palabras clave: geomorfología fluvial, tasas de incisión, geocronología, Cordillera Cantábrica

Resumen

Se han calculado tasas de incisión del curso fluvial principal en tres localidades de los tramos alto, medio y desembocadura, en una sub-cuenca del Río Nalón. En el tramo alto (640 m.s.n.m.), el Río Páramo excava en calizas karstificadas una terraza epifreática. El intervalo de sedimentación se acotó entre 134,8±10 y 108,9±7 ka (OSL) e indican una tasa de incisión de 0,28±0,07 mm/a. A una cota de 415 m, la avalancha rocosa del Entrago embalsó temporalmente el Río Teverga. Posteriormente, el río cortó el depósito de acumulación e incidió en el sustrato rocoso calizo. El nuevo depósito fue datado con dos técnicas que reportaron ocho dataciones. De entre estas muestras, la edad U/Th 278,3±70 ka obtenida en un cemento carbonatado es la más antigua (Muestra RB-06; Fernández *et al.*, 2021). Esta datación permite estimar una tasa de incisión máxima de 0,20±0,12 mm/a. En la desembocadura, el cauce actual incide una antigua superficie de abrasión marina que deja expuestas las cuarcitas ordovícicas en una amplia superficie plana a una cota de 100 m. La terraza está datada con cosmo-nucleidos (muestras 03S6 y 03S7; Álvarez-Marrón *et al.*, 2008) que permiten evaluar una tasa de incisión de 0,06±0,02 mm/a. A pesar de que la tasa de incisión varía condicionada por aspectos locales y el efecto del intervalo de tiempo medido, este resultado preliminar es coherente y puede ser usado como aproximación a las tasas de incisión fluvial en la vertiente septentrional de la Cordillera Cantábrica.

Abstract

Incision rates were calculated for the main fluvial course in three locations of the high, middle, and river mouth, within a sub-catchment of Nalón River. In the high course at 640 m.a.s.l., the Páramo River eroded an epi-phreatic terrace into karstified limestone. The sedimentation interval was constrained to 134.8±10 and 108.9±7 ka through OSL ages and yielded an incision rate of 0.28±0.07 mm/a. At an elevation of 415 m.a.s.l, the Teverga River was temporarily blocked by the Entrago rock avalanche. Afterward, the stream cut the accumulation deposit and incised into the limestone bedrock. Eight samples were used to date the deposit using two different methods. Among these samples, the U/Th age of 278.3±70 ka for a carbonate cement is revealed the oldest (Sample RB-06; Fernández *et al.* in 2021). This age determination enabled us to calculate an incision rate of 0.20±0.12 mm/a. At the mouth of the Nalón River, the current course has cut an old wave-cut platform at 100 m.a.s.l., exposing the Ordovician quartzites on a wide, flat, erosive surface 100 m.a.s.l. The terrace was dated with cosmonucleids (samples 03S6 and 03S7; Álvarez-Marrón *et al.*, 2008), yielding an incision rate of 0.06 ± 0.02 mm/a. Although incision rates vary conditioned by local factors and effects of measured time interval, this preliminary result is consistent and can be used as a proxy for fluvial incision rates in the northern slope of the Cantabrian Mountains.

Referencias

Fernández, F. J., Menéndez-Duarte, R., Pando, L., Rodríguez-Rodríguez, L. y Iglesias, M. (2021). *Geomorphology*, 390, 107867. doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107867

Álvarez-Marrón, J., Hetzel, R., Niedermann, S., Menéndez, R., and Marquínez, J. (2007) *Geomorphology*, 93, 316-334. doi: 10.1016/j.geomorph.2007.03.005

Monitorización morfoestructural y térmica del hidrolacolito de Las Calderuelas (Parque Nacional de Guadarrama, Sistema Central)

Morphostructural and thermal monitoring of the Calderuelas hydrolaccolith (Guadarrama National Park, Central System)

J. Fernández-Lozano[1], M. A. de Pablo-Hernández[2], R. M. Carrasco[3], V. Turú[4], R. L. Soteres[5,6], T. Karampaglidis[3], X. Ros[4], J.L. Granja-Bruña[7], F.J. Martínez-Moreno[7], A. Muñoz-Martín[7] y J. Pedraza[7]

1 Dpto. de Tecnología Minera, Topografía y Estructuras. ESTI Minas, Universidad de León, 24071, León. jferl@unileon.es
2 Dpto. Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá, 28801, Alcalá de Henares. miguelangel.depablo@uah.es
3 Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera. Universidad de Castilla-La Mancha, 45071, Toledo. rosa.carrasco@uclm.es y theo.karampaglidis@uclm.es
4 Fundació Marcel Chevallier, AD500, Andorra la Vella, Principado de Andorra. vturu@andorra.ad y xros@icog.es
5 Centro de Investigación GAIA-Antártica, Universidad de Magallanes, 01855, Punta Arenas, Chile. rodrigo.soteres@umag.cl
6 Centro Internacional Cabo de Hornos (CHIC), Universidad de Magallanes, Puerto Williams, Chile.
7 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid. jlgranja@geo.ucm.es, fmarti18@ucm.es, amunoz@geo.ucm.es y javierp@ucm.es

Palabras clave: Hidrolacolito, Monitorización, Parque Nacional de Guadarrama, temperatura, drones.

Resumen

El hidrolacolito de Las Calderuelas, situado en pleno corazón del Parque Nacional de Guadarrama (Sistema Central), es una estructura de excepcional valor científico y natural, cuyo comportamiento y evolución están condicionados por las características estratigráficas de su estructura interna y las variaciones climáticas del entorno en el que se ubica. Una de las mayores incógnitas en su evolución y preservación es la posibilidad de que el sistema pueda estar controlado por la formación de permafrost. Aunque los datos existentes hasta la fecha no permiten esclarecer este aspecto, una monitorización de la topografía y las temperaturas, permitirá establecer su evolución y condiciones de preservación. Para ello, se ha llevado a cabo un estudio de los cambios morfológicos estacionales mediante fotogrametría con drones y un registro anual de temperaturas. El objetivo es determinar los periodos de actividad del hielo-deshielo, responsables de los procesos de hinchamiento que controlan su topografía. La generación de modelos digitales y ortomosaicos de diferentes periodos permite observar su morfología y desarrollo asociado a cambios en el drenaje y a procesos de reptación, aún activos desde su formación como consecuencia de la inestabilidad de la ladera. Los resultados mejorarán el conocimiento de su génesis y evolución, proporcionando nuevos datos que garanticen su preservación futura bajo un contexto de calentamiento global.

Abstract

The Las Calderuelas hydrolacolith, located in the core of the Guadarrama National Park (Central System), is an exceptional structure of scientific and natural value. Its behavior and evolution are conditioned by the stratigraphic characteristics of its internal structure and the environmental climatic variations of the area. One of the major uncertainties in its evolution and preservation is the possibility that the system may be controlled by the formation of permafrost. Although there is no existing data to support the presence of frozen soil, an integrated study of the topographic variations and the interior and exterior temperatures will allow us to determine the mechanism of evolution and its possibilities of preservation. To this end, seasonal morphological changes have been monitored using drone photogrammetry and an annual record of temperatures. The main target is to determine the periods of ice-thaw activity, as a responsible factor for the swelling processes that control its topography. The generation of detailed digital models and orthoimages for the different seasons of the year allows the observation of morphological variations and the development of structures associated with changes in drainage and reptation processes, still active since their formation due to slope instabilities. The results will improve the knowledge of involved processes in its genesis and evolution, providing new data that will contribute to guarantee its future preservation in a context of global warming.

Cambios ambientales e impacto humano durante el Holoceno Superior en el Malpaís de la Rasca, Tenerife (Islas Canarias): integrando registros sedimentarios arqueológicos y naturales

Holocene environmental changes and human impact in the Malpaís de la Rasca, Tenerife (Canary Islands), integrating archaeological and natural sedimentary records

E. Fernández-Palacios[1,2], N. Égüez[1,2], R. Casillas-Ruiz[3], B. Valero-Garcés[4], P. Cruzado-Caballero[3,5], I. Armenteros-Armenteros[6], M.C. Martín-Luis[3], A.V. Herrera-Herrera[7,1], C. M. Hernández[1,2], C. Mallol[1,2] y M. Jambrina-Enríquez[3,1]

1 Archaeological Micromorphology and Biomarkers (AMBI Lab) Universidad de La Laguna, 38200, Tenerife, efernand@ull.edu.es; neguezgo@ull.edu.es, cherngom@ull.edu.es, cmallol@ull.edu.es
2 Departamento de Geografía e Historia, Universidad de La Laguna, 38200, Tenerife.
3 Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, 38200, Tenerife. mjambrin@ull.edu.es, rcasilla@ull.edu.es, pcruzado@ull.edu.es, mcmartin@ull.edu.es
4 Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), 50059, Zaragoza. blas@ipe.csic.es
5 Grupo Aragosaurus-IUCA, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza.
6 Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008, Salamanca. ilde@usal.es
7 Departamento de Química. Universidad de La Laguna, 38200, Tenerife. avherrer@ull.edu.es

Palabras clave: Paleoambiente, biomarcadores, geoquímica, microvertebrados, Islas Canarias.

Resumen

La Reserva Natural Especial del Malpaís de la Rasca en el Sur de Tenerife (Islas Canarias) se caracteriza por una extraordinaria riqueza de elementos singulares arqueológicos, etnográficos y geomorfológicos. En este trabajo presentamos los resultados preliminares del estudio multi-indicador en una selección de registros sedimentarios procedentes de los conjuntos de cabañas y rediles (aborígenes e históricas), y depósitos naturales con acumulación arcillosa de los llanos endorreicos (maretas) y en el edificio hidromagmático de La Laguneta.

La combinación de análisis de biomarcadores fecales y lipídicos, sedimentológicos, geoquímicos y de microvertebrados nos ha permitido identificar las actividades humanas y las condiciones ambientales particulares de esta zona durante el Holoceno Superior. Nuevas dataciones C^{14} nos permitirán vincular la historia de asentamiento humano con la evolución socio-ecológica del paisaje.

Esta investigación se enmarca en el proyecto IMPACT (2022CLISA04) financiado por la Fundación CajaCanarias y Fundación “La Caixa”.

Abstract

The Malpaís de la Rasca Special Nature Reserve in southern Tenerife (Canary Islands) is characterized by an extraordinary wealth of unique archaeological, ethnographic and geomorphological elements. This work presents the preliminary results of a multi-proxy study of a selection of sedimentary records from the livestock and sheepfold assemblages and natural deposits with clay accumulations from the local endorheic basins (maretas) and the hydromagmatic vent of La Laguneta.

The combination of faecal and lipid biomarkers, sedimentological, geochemical and micropalaeontological analyses has allowed us to identify human activities and the environmental conditions within this area during the Late Holocene. New radiocarbon dating will allow us to link the history of human occupation to the socio-ecological evolution of the landscape.

This research is part of the IMPACT project (2022CLISA04), funded by the Fundación CajaCanarias and the Fundación "La Caixa".

La falla activa de la Solana del Zamborino (Cuenca de Guadix-Baza, S España)

The Solana del Zamborino active fault (Guadix-Baza Basin, S Spain)

F.J. García-Tortosa[1], I. Medina-Cascales[2], I. Martin –Rojas I., P. Alfaro, J. Ronda-Palacio, C. Duross [3]

1 Departamento de Geología, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071, Jaén, Spain; gtortosa@ujaen.es
2 Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03080, Alicante, Spain; ivan.medina@ua.es, pedro.alfaro@ua.es, ivan.martin@ua.es
3 U.S. Geological Survey, Golden, Colorado 80401, USA; cduross@usgs.gov

Palabras clave: Falla activa, Cuaternario, Cuenca de Guadix-Baza, Granada, España.

Resumen

En la actualidad la Cordillera Bética Central está sometida a una extensión OSO-ENE de 2,0 ± 0,3 mm/año (Martin-Rojas *et al*., 2023), acomodada principalmente por fallas normales activas NNO-SSE. En la cuenca de Guadix-Baza estas estructuras son la falla de Baza (0,7 ± 0,4 mm/año; Alfaro *et al*., 2021) y la falla de la Solana del Zamborino (0,1 ± 0,4 mm/año; Martín-Rojas *et al*. 2023). En este trabajo se presenta por vez primera una descripción detallada de la falla de la Solana del Zamborino (FSZ), una falla normal intracuencal buzante al oeste, de más de 20 km de longitud. La falla presenta una marcada expresión geomorfológica, especialmente en su zona central donde se observa que desplaza el glacis de la cuenca varias decenas de metros. En su zona septentrional esta expresión geomorfológica es menos evidente, ya que la superficie de glacis está parcialmente desmantelada por la incisión de la red fluvial actual. La FSZ controla en parte la sedimentación endorreica durante el Cuaternario, de modo que aparecen niveles lacustres más desarrollados en el bloque hundido. Además, la caracterización de la falla permite mejorar el conocimiento sobre el contexto geológico y sedimentológico del yacimiento arqueo-paleontológico de la Solana del Zamborino, uno de los lugares con presencia humana más antiguos de la península.

Abstract

The Central Betic Cordillera is undergoing 2.0 ± 0.3 mm/yr of WSW-ENE (Martin-Rojas *et al*., 2023). This extension is accommodated by normal active faults striking NNW-SSE. Active faults in the Guadix-Baza Basin are the Baza Fault (0.7 ± 0.4 mm/año, Alfaro *et al*., 2021). and the Solana del Zamborino Fault (0.1 ± 0.4 mm/año, Martin-Rojas *et al*. 2023). A detailed description of the Solana del Zamborino Fault (SZF) is presented for first time in this work. This fault is a W dipping intrabasinal normal fault, more than 20 km long. The geomorphic expression of the fault is especially clear in the central part, where the fault offsets the glacis of the basin several tens of meters. In the northern sector the geomorphic expression of the fault is subtle because it the glacis has been partially eroded by the recent fluvial network. The SZF partially controls the endorheic Quaternary fluvial sedimentation, as lacustrine levels are more abundant in the downthrow. Besides, the SZF characterization permit to better understand the geological context of the Solana del Zamborino palaeo-archeological site, including some of the oldest human fossils in Spain.

Referencias

Alfaro, P., Delgado, J., Sanz de Galdeano, C. Galindo-Zaldivar, J., Garcia-Tortosa, F. J., Lopez-Garrido, A. C., Lopez-Casado, C., Marin-Lechado, C., Gil, A., Borque, M. J. (2008). *International Journal of Earth Sciences.* doi: 10.1007/s00531-007-0213-z

Martin-Rojas, I., Alfaro, P., Galindo-Zaldívar, J.; Borque, M.J., García-Tortosa, F.J., Sanz de Galdeano, C., Aviles, M., Sanchez-Alzola, A., Gonzalez-Castillo, L., Ruano, P., Medina-Cascales, I., Tendero-Salmeron, V., Madarieta-Txurruka, A., Pedrosa-Gonzalez, M. T., Gil-Cruz, A. J. (2023). *Tectonics*. doi: 10.1029/2022TC007723

Reconstruyendo los cambios recientes submareales en la zona interior de la Ría de Vigo (NO España) mediante foraminíferos bentónicos y geoquímica orgánica

Reconstructing recent subtidal changes in the inner Ría of Vigo (NW Spain) through benthic foraminifera and organic geochemistry

J. Gardoki[1], A. Cearreta[1], A. García-Artola[1], J. Gómez-Arozamena[2] y V. Villasante-Marcos[3]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, 48940 Leioa. jon.gardoqui@ehu.eus, alejandro.cearreta@ehu.eus, ane.garcia@ehu.eus
2 Dpto. Ciencias Médicas y Quirúrgicas, Facultad de Medicina, Universidad de Cantabria, 39011 Santander. jose.gomez@unican.es
3 Laboratorio de Magnetismo de Materiales y Magnetismo Ambiental, Instituto Geográfico Nacional, 28014 Madrid. vvillasante@mitma.es

Palabras clave: foraminíferos, geoquímica, radionucleidos, materia orgánica, ría

Resumen

La Ría de Vigo (NO España) es un sistema costero con una elevada productividad primaria y que está sometida a importantes presiones antropogénicas. En este trabajo se ha reconstruido la evolución ambiental reciente de las áreas submareales internas de la Ría de Vigo. Para ello, se recogieron dos sondeos cortos (longitud 22 y 24 cm) y se analizaron desde una perspectiva micropaleontológica y geoquímico-orgánica. El registro sedimentario, datado mediante radionucleidos (^{210}Pb, ^{137}Cs, $^{239+240}$Pu), revela que al inicio del siglo XX las asociaciones estaban formadas por las especies *Haynesina germanica, Ammonia* morfogrupo *tepida, Nonion commune* y *Elphidium gerthi*, representando el 83-91% de la microfauna e indicando un ambiente de ría interna influenciado por procesos oceánicos. Sin embargo, desde mediados del siglo XX, se observa un incremento en la abundancia de taxones tolerantes a condiciones ambientales pobres en oxígeno y ricas en materia orgánica (i.e., *Eggerelloides scabrum, Buliminella elegantissima* y *Bulimmina gibba*, constituyendo el 14-36%), acompañado por un aumento del carbono orgánico y nitrógeno total y una disminución del δ^{13}C. Estos cambios sugieren un ascenso en el aporte de nutrientes al medio, posiblemente de origen antrópico.

Abstract

The Ría of Vigo (NW Spain) is a coastal system with a high primary productivity and is subject to remarkable anthropogenic pressures. Here, we reconstructed the recent environmental evolution of the subtidal areas in the inner Ría of Vigo. Two subtidal short cores (22 and 24 cm long) were drilled and analysed from a micropaleontological and geochemical-organic perspective. The sedimentary record, dated by radionuclides (^{210}Pb, ^{137}Cs, $^{239+240}$Pu), revealed that in the early 1900s the benthic foraminiferal assemblages consisted of the species *Haynesina germanica*, *Ammonia* morphogroup *tepida*, *Nonion commune* and *Elphidium gerthi*, which together represent 83-91% of the microfauna and indicate an inner ría environment influenced by oceanic processes. However, since the mid-20th century, an increase in the abundances of typical low-oxygen and organic matter-rich conditions taxa (i.e., *Eggerelloides scabrum, Buliminella elegantissima, Bulimmina gibba*, account for 14-36% of the assemblage), accompanied by an increase in total organic carbon and nitrogen and a decrease in δ^{13}C, is observed. These changes suggest a rise in the nutrient supply to the environment, possibly of anthropogenic origin.

Acknowledgements

Research funded by the projects RTI2018-095678-B-C21, MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and ERDF A way of making Europe and European Union (MINECO) and IT1616-22 (EJ/GV). Jon Gardoki received a predoctoral fellowship from the Basque Government (PRE_2020_1_0035). Ana Bernabéu (University of Vigo) kindly provided the sediment cores.

Posible licuefacción inducida por actividad explosiva freatomagmática en el Valle del Júcar (Cofrentes, Valencia).

A possible liquefaction induced by phreatomagmatic explosive activity in the Júcar Valley (Cofrentes, Valencia).

J.L. Giner Robles[1], J. Elez[2], P.G. Silva[3], R. Pérez-López[4], M.A. Rodríguez-Pascua[4], F. Tapias[3], E. Roquero[5], Y. Sánchez-Sánchez[2]

1 Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid 28049 Madrid. jorge.giner@uam.es
2 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca. jelez@usal.es, yolanda.ss@usal.es
3 Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, 05003 Ávila. pgsilva@usal.es
4 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC), 28003, Madrid. r.perez@igme.es, ma.rodriguez@igme.es
5 Dpto. Edafología, E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid elvira.roquero@upm.es

Palabras clave: Licuefacción, actividad volcánica explosiva, terrazas fluviales, Júcar, Cofrentes

Resumen

En las proximidades de la confluencia de los ríos Júcar y Cabriel entorno a la Población de Cofrentes (Valencia) se localiza afloramientos de rocas volcánicas que definen una actividad volcánica cuaternaria. Se diferencian dos edificios volcánicos: el volcán de Agrás (1,8–2 Ma) y otro más reciente denominado Pico del Fraile. Ambos volcanes se encuentran en el interior del Valle del Cabriel interaccionando con su sistema de terrazas. Los afloramientos analizados muestran una importante actividad explosiva con brechas freatomagmáticas emitidas por el Pico del Fraile que interaccionan con las terrazas de +50 m (ESR 388,5 ± 32 ka) y +35-40 m (OSL 177,9 ± 9,7 k) del Río Cabriel (Silva *et al.*, 2024). Estas nuevas dataciones indican una actividad volcánica pleistocena que podría situarse en torno al estadio isotópico MIS7 con relación al depósito de la terraza de +35-40 m que muestra importantes interacciones entre los productos volcánicos y las gravas fluviales (peperitas, pillows breccias etc.; Silva *et al.*, 2024). En otro afloramiento de la misma terraza en el Valle del Júcar situado a menos de 1km de los afloramientos volcánicos del Cabriel, se observan claras evidencias de flujos internos de arena fina dentro de los sedimentos, produciendo varias estructuras de licuefacción a escala centimétrica. Dado que tanto la emisión de los materiales volcánicos y las licuefacciones observadas se encuentran en el mismo nivel de terrazas (+35-40) y ambos afloramientos están muy próximos entre sí, en este trabajo se propone que el origen de las licuefacciones observadas, pueden tener su origen en la actividad explosiva freatomagmática asociada a la erupción del Pico del Fraile que pudo alcanzar un índice de explosividad IEV 3.

Abstract

In the proximities of the confluence of the Júcar and Cabriel rivers around the town of Cofrentes (Valencia) there are outcrops of volcanic rocks that define a quaternary volcanic activity. Two volcanic edifices can be distinguished: the Agrás volcano (1.8 - 2 Ma) and another more recent one called Pico del Fraile. Both volcanoes are in the interior of the Cabriel Valley interacting with its terrace system. The analyzed outcrops show significant explosive activity with phreatomagmatic breccias emitted by Pico del Fraile interacting with the +50 m (ESR 388.5 + 32 ka) and +35-40 m (OSL 177.9 + 9.7 k) terraces of the Cabriel River (Silva et al., 2024). These new dates indicate a Pleistocene volcanic activity that could be placed around isotopic stage MIS7 in relation to the +35-40 m terrace deposit showing important interactions between volcanic products and fluvial gravels (peperites, pillows breccias etc.; Silva et al., 2024). In another outcrop of the same terrace in the Júcar Valley located less than 1 km from the Cabriel volcanic outcrops, there is clear evidence of internal flows of fine sand within the sediments, producing several centimeter-scale liquefaction structures. Given that both the emission of volcanic materials and the observed liquefactions are at the same terrace level (+35-40) and both outcrops are very close to each other (< 1 km), this work proposes that the origin of the observed liquefactions may have its origin in the important phreatomagmatic explosive activity associated with the eruption of Pico del Fraile that could have reached an explosivity index IEV 3.

This research is part of the Spanish Research Project I +D + i PID2021-123510OB-I00 (QTECIBERIA-USAL) funded by the MICIN/ AEI/10.13039/501100011033/

Referencias

Silva, P.G., Tapias. F., Elez, J., Roquero, E., Gutierrez, F., del Val, M., Perez Torrado, F.J. Giner-Robles, J.L., Moreno, D. (2024) *Geomorphology.* doi:doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.10906.

Geomorfología Tectónica de la Falla de Lobios-Gerês (Ourense)

Tectonic Geomorphology of the Lobios-Gerês Fault (Ourense, NW Spain)

Y. Gonzalez-Conde[1], P.G. Silva[2], J. Elez[1]

1 Dpto. Geología. Facultad de Ciencias. Universidad Salamanca.37008 Salamanca. España. yolandagonzalezconde@usal.es , j.elez@usal.es

2 Dpto. Geología. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad Salamanca. 05003 Ávila. España. pgsilva@usal.es

Resumen: El presente trabajo se localiza en el sur de la provincia de Ourense, dentro del Parque Natural transfronterizo Xurés-Gerês y geológicamente dentro de la Zona Gallega del Macizo Ibérico de Tras-Os-Montes. La falla de Lobios-Gerês, figura principal de este estudio, forma parte de la zona de falla Guimarães-Ourense. Su trazado se puede seguir hasta la costa Cantábrica. A ella se encuentran asociadas importantes surgencias termales (p.ej. Lobios, Bande, As Burgas) y enjambres sísmicos significativos, como el asociado al mayor terremoto ocurrido en Galicia en periodo instrumental (Becerreá, 1997; 5.1 Mw). El estudio realizado revela la existencia de diferentes anomalías geomorfológicas indicadoras de actividad tectónica como son valles lineales de fractura de longitud kilométrica, facetas triangulares de falla, valles decapitados, codos de captura, desnivelación de superficies de erosión y afección a morfologías glaciares. Todo ello desvela la ocurrencia de actividad tectónica cuaternaria en este sector del Macizo Ibérico.

Palabras clave: Geomorfología tectónica, Modelado Glaciar, Cartografía geomorfológica, Termalismo, Sismicidad.

Abstract: *This work is located in the south of the Ourense Province within the Xurés-Gerês Cross-border Natural Park and geologically within the Tras-Os-Montes Zone of the Paleozoic Iberian Massif in Galicia (NW Spain). The Lobios-Gerês Fault, the objective of this study, is part of the Guimarães-Ourense Fault Zone, which trace can be outlined to the Cantabrian littoral. Several thermal springs (for instance Lobios, Bande, As Burgas), relevant seismic swarms and the most important instrumental earthquake registered (Becerreá, 1997; 5.1 Mw) are associated to this large tectonic structure. The study reveals the occurrence of relevant geomorphic anomalies indicative of tectonic activity along the analysed fault segment, such as lineal fault-valleys of kilometric length, fault triangular facets, beheaded valleys, anomalous capture processes, unlevelling of planation surfaces and affection to glacial landforms. All these features are indicative of relevant Quaternary tectonics in this sector of the Palaeozoic Iberian Massif in NW Spain.*

Key words: *Tectonic Geomorphology, Glacial landforms, Geomorphological mapping, Hydro-thermalism, Seismicity.*

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca al sur de la provincia de Ourense (Galicia) dentro del Parque Natural transfronterizo Xurés-Gerês, reserva de la biodiversidad por la UNESCO desde 2001. Geológicamente se encuadra en la Zona de Galicia-Tras-Os-Montes del Macizo Paleozoico Ibérico (Martín-González, 2009). Las litologías dominantes, como en la mayor parte del territorio gallego, son rocas ígneas y metamórficas variscas, aunque destacan dos cuencas sedimentarias con rellenos cenozoicos, como la de Xinzo de Limia (Fig. 1). En la zona de estudio las litologías dominantes son los granitos y granodioritas del denominado Batolito de Lobios (Fernández Tomás y Mateos, 1974). Este estudio se centra en el análisis geomorfológico de la tectónica cuaternaria asociada a la Falla de Lobios-Gerês (LGF). Esta se sitúa en el segmento más meridional de la Zona de Falla Guimarães-Ourense, un gran accidente tectónico que cruza Galicia en dirección NE-SW y al que se encuentra asociada una importante actividad termal y sísmica (Crespo-Martín y Martín-González, 2021; Corral Lledó et al., 2010). Se encuentra catalogada como una de las fallas tectónicamente activas de Galicia y en su zona más septentrional tuvo lugar el terremoto de Becerreá en 1997 de magnitud 5,1 Mw (Martín-González et al., 2012). En su zona más meridional se registran varios clusters sísmicos (≤ 3,5 mb) en periodo instrumental (Crespo-Martín et al., 2022).

El Estudio se encuentra centrado en el valle del Río Caldo, afluente del Río Limia. El valle puede considerarse un valle de fractura desarrollado a favor de la LGF en dirección NNE-SSO, y se asocia a dos de los manantiales termales de mayor temperatura de España: Lobios (77ºC) y Bande (51º). Este último relacionado con un asentamiento romano del siglo I d.C (*Aquis Querquenis*) que atestiguan su uso termal en la antigüedad (Corral Lledó et al., 2010). La zona de falla presenta importantes anomalías geomorfológicas que afectan al modelado granítico y glaciar de la Serra do Xurés. El valle de fractura de Lobios-Gerês es un ejemplo espectacular de la confluencia de procesos tectónicos y geomorfológicos, en el que existe un fuerte control

estructural de la erosión y el relieve en zonas graníticas y glaciares.

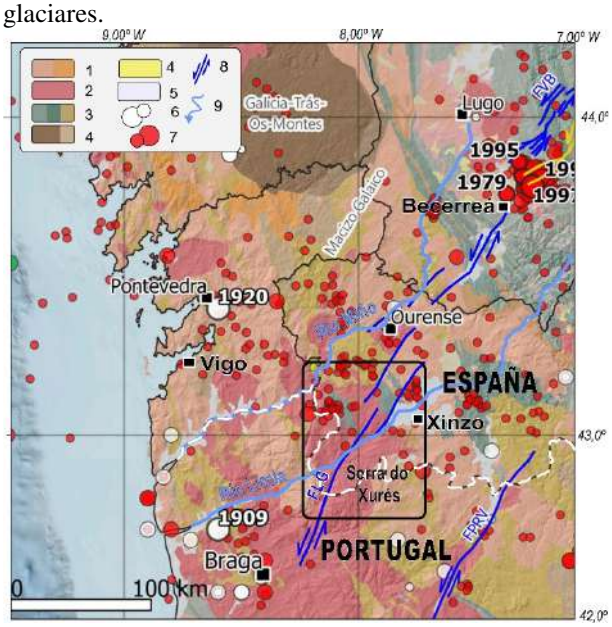


FIGURA 1. Esquema Geológico del NW de la Península, mostrando la situación de la zona de estudio (recuadro). (1) Granitos y migmatitas sinorogénicos; (2) Granitoides post y tardi-orogénicos; (3) Rocas metamórficas paleozoicas; (4) Unidades alóctonas ofiolíticas; (5) Neógeno; (5) Cuaternario; (6) Terremotos históricos intensidad VII-IV; (7) Terremotos instrumentales magnitud 3,5 – 5,1 Mw; (8) Red de drenaje; (9) Principales Zonas de fractura activas: FLG (Falla Lobios Gêreis); Falla de Becerreá (FBE), Falla de Penacova-Régua-Verín (FPRV); Falla de Manteigas-Vilariça-Bragança (FMVB).

SISTEMAS DE FRACTURACIÓN Y DRENAJE

La mayor parte de las fallas que atraviesan el NO peninsular datan de la orogenia Varisca (250 Ma), pero experimentan un episodio de reactivación durante la orogenia Alpina (66 Ma) a favor de las cuales se estructuran los relieves que encontramos actualmente en esta región (Martín-González, 2009; Martín-González et al., 2012). Según estos autores los grandes sistemas de falla que actúan durante el Neógeno y Cuaternario en esta zona del Macizo Ibérico tienen tres direcciones predominantes: **(1)** ONO-ESE a NO-SE; **(2)** E-O a OSO-ENE y **(3)** N-S a NE-SO. En la zona analizada aparecen los tres sistemas de fracturación, pero es el tercero a favor del cual se vertebra el paisaje alrededor del Valle del Caldo. Los otros dos sistemas y sus intersecciones condicionan el marcado patrón angular del drenaje (en enrejado) en el conjunto del batolito, así como drenajes subparalelos a favor de las estructuras NO-SE del interior de este (González-Conde, 2023).

A gran escala el drenaje se vertebra entorno al rio Limia que atraviesa la zona en dirección NE-SO en el cual desembocan los ríos Caldo (Sur) y Fragoso (Norte) de dirección NNE-SSO (N30ºE) que se alinean a favor de la FLG. Como se observa en la Figura 1, la FLG junto con las Fallas de Becerreá y Ourense conforman la gran zona de fractura sinestral que atraviesa Galicia en dirección NNE-SSO, además de otras fallas como las de Manteiga o Verín (FPRV), todas ellas con actividad sísmica. El drenaje se encaja en una gran superficie de erosión en los materiales graníticos que se sitúa entre 900-1000 m situándose en las zonas de divisoria de los valles. Estas superficies albergan relieves graníticos en bloques muy residuales y se encuentran desniveladas o escalonadas a favor de la LGF. Hacia el norte esta superficie desarrolla un *"gran altiplano"* que separa los valles de los ríos Limia y Miño. Estos con dirección NE-SO albergan hasta trece niveles de terrazas fluviales (Yepes Temiño y Vidal Romaní, 2004). Dataciones IRSL y cosmogénicos en el Río Miño indican que los niveles por encima de los +100 m presentan edades superiores a 1 Ma (Méndez-Quintas et al., 2021), aunque muchos autores consideran el carácter epigenético heredado más antiguo del drenaje en Galicia (Yepes Temiño y Vidal Romaní, 2004).

EL GLACIARISMO DE LA SERRA DE XURÉS.

Como se ha comentado la zona estudio posee un relieve granítico epigenético muy evolucionado, caracterizado por la existencia de superficies de arrasamiento (900-1.000 m) y relieves graníticos en bloques de diferentes dimensiones. Solo en la zona más meridional posee las cotas más elevadas, representadas por líneas de cumbres y divisorias en torno a los 1.400-1.500m, alrededor de la cual se instalan los sistemas glaciares de la Serra do Xurés (Vidal Romaní et al., 1990), y que conforma el límite topográfico entre España y Portugal en la zona (Fig. 1 y 2). Esta sierra fue afectada por (al menos) un episodio glaciar durante la última glaciación europea (Würm). Las morfologías glaciares presentan circos, cordones morrénicos y tills glaciares en general, así como diferentes superficies pulidas y estriadas. Estas morfologías delimitan la existencia de un pequeño glaciar de casquete (ice-cap) de 64 km^2 que vertía hacia España (valles del Vilameá, Fecha y Curro) y Portugal (Valle del Río Homem y sus afluentes). Dataciones por isótopos cosmogénicos (^{10}Be y ^{21}Ne) de las superficies glaciadas indican dos momentos de máxima extensión de los hielos en 238 ka y 130 ka (Vidal Romaní et al., 1990). Estas, son edades muy antiguas comparadas con el Último Máximo Glaciar (22–18 ka) y se propone que las trazas glaciares más recientes en la zona de estudio corresponderían con este último episodio (LGM) en el que los aparatos glaciares se encajarían en las superficies glaciadas datadas en 238 ka y 130 ka.

GEOMORFOLOGÍA TECTÓNICA

Los rasgos tectónicos más relevantes de la zona de estudio aparecen a lo largo del Valle del Río Caldo, el cual sigue el trazado de la **Falla de Lobios-Gerês**, generando un valle de fractura o de falla. Posee un perfil en V muy marcado y en su entorno próximo aparecen un par de hombreras erosivas a aproximadamente +200 m y +120-110 m de altura relativa sobre el actual cauce del río (Fig. 3) que delinean un valle anterior de fondo plano de alrededor de kilómetro y medio de anchura, sobre el que se produce el encajamiento actual. Estos últimos valores altimétricos, indican que este posterior encajamiento se ha producido durante el periodo Cuaternario.

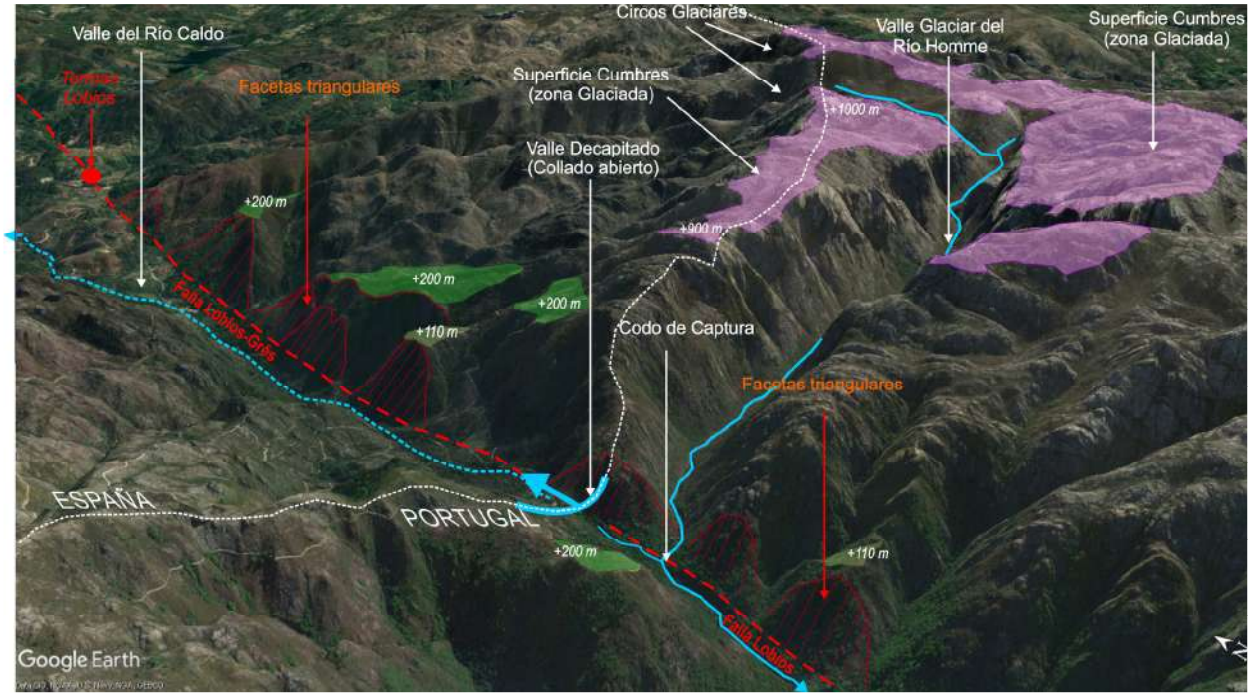


FIGURA 2. Esquema del encajamiento del río Caldo. Se observa además el bloque occidental de la falla de Lobios-Gerês, donde se desarrolla la superficie glaciada y los elementos tectónicos más característicos, las facetas triangulares de falla

Por debajo de estas superficies a lo largo de la margen derecha del valle (bloque occidental) se desarrollan una serie de espectaculares **facetas triangulares de falla** (Fig. 2). Estas poseen entre 100 y 120 metros de altura y una longitud de entre 0,8 a 1,3 km que se desarrollan a lo largo de la margen derecha (bloque occidental) del Valle del río Caldo a lo largo de unos 12 km entre los valles del Homem (Sur) y Limia (Norte). Estas enormes facetas triangulares corresponden a la erosión del plano de falla exhumado de Lobios-Gerês. Su posición orientación y pendiente general, hacia el Oeste, nos indican que se trata de una falla normal con el bloque levantado hacia el Este (Sierra de Xurés) y el hundido hacia el valle del río Caldo. Estas se continúan hacia Portugal 13 km más, a lo largo de la margen derecha (Este) de otro gran valle de fractura ocupado por dos ríos divergentes el Geiras (hacia el Norte) y Gerês hacia el Sur (Fig. 3). En total se completan unos 26 km de línea de fractura con un drenaje lineal definido por los ríos Caldo, Geiras y Gerês que atraviesan y desplazan en dirección NNE-SSW el Batolito de Lobios (González-Conde et al., 2023).

Otra anomalía importante que registra este valle del Río Caldo es que no tiene cabecera s.s. Culmina en un collado abierto colgado unos 60 m sobre el valle glaciar del río Homem (*Portela do Homem*) que se dirige hacia el Sur (Fig. 3). Esta particularidad indica que se trata de un **valle decapitado**, generado por un importante proceso de **captura fluvial** por parte del valle del río Homem que incorporó la antigua cabecera del río Caldo definida por el río Gerês y sus afluentes que drenan el cuadrante SE del Batolito de Lobios. Los datos recogidos en este estudio no permiten situar cronológicamente la captura fluvial, pero esta corta la hombrera erosiva de los +120-110m. Teniendo en cuenta las cronologías recientemente aportadas para las terrazas del Miño (Méndez-Quintas et al., 2021), estas alturas relativas nos situarían dentro del periodo Cuaternario, seguramente en el Pleistoceno inferior alrededor de 1,0 Ma.

Desde un punto de vista regional, se observa que la falla de Lobios-Gerês se prolonga bastantes kilómetros hacia el sur (Portugal) y norte de la zona estudiada a lo largo del río Fragoso, alcanzando una longitud total de 49 km. La falla atraviesa de sur a norte el Batolito de Lobios afectando a su geometría (Fig. 3), con la parte más ancha (c. 950 km^2) del Batolito en su bloque occidental, siendo la del bloque oriental mucho menor (c. 350 km^2). Esta geometría es la que permite suponer que el bloque occidental constituye el bloque levantado de una falla de componente principal normal exponiendo los niveles estructurales más basales de la intrusión granítica (Fig. 3). Este bloque presenta un dominio de drenaje paralelo-subparalelo concéntrico siguiendo líneas estructurales que continúan la morfología subcircular de la intrusión. Por el contrario, en la zona oeste domina un drenaje dendrítico y/o subangular que se adapta a las zonas más metorizadas y líneas de fracturación ortogonales típicas de los materiales graníticos. A su vez, la mayor elevación del bloque oeste favorecería la glaciación de sus zonas de cumbres durante las fases más frías del Pleistoceno. Por el contrario, el bloque occidental funcionaría como bloque hundido, con menor exposición a la erosión, permitiendo el desarrollo y preservación de zonas arenizadas y relieves graníticos en bloques consecuencia de amplios periodos de alteración en niveles más superficiales y, por tanto, más expuestos, de la intrusión granítica (Fig. 3).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis realizado, permite clasificar la zona de falla de Lobios-Gerês como un accidente tectónicamente activo durante el periodo Cuaternario, con un impacto en el paisaje actual determinante. A lo largo del mismo se desarrollan importantes valles de fractura alineados

NNE-SSO como son los valles de los ríos Gerês y Geiras en Portugal y los ríos Caldo y Fragoso en Galicia, completando un total de 49 km (Fig. 3). La margen oriental del Río Caldo presenta gigantescas facetas triangulares de falla, que representan el plano de falla exhumado de la falla analizada. Por otra parte, otra importante anomalía geomorfológica es la captura de la cabecera del río Caldo por parte del río Homem, quedando este como un valle decapitado (Fig. 2) que termina en un portillo abierto colgado sobre el río Homem unos 60 m (Portela do Homem). Las relaciones entre el valle actual con superficies previas a su encajamiento y a las morfologías glaciares de las zonas de cumbres permiten proponer que la formación del valle de falla que se observa hoy día, y su proceso de captura, se producirían a partir del Pleistoceno medio.

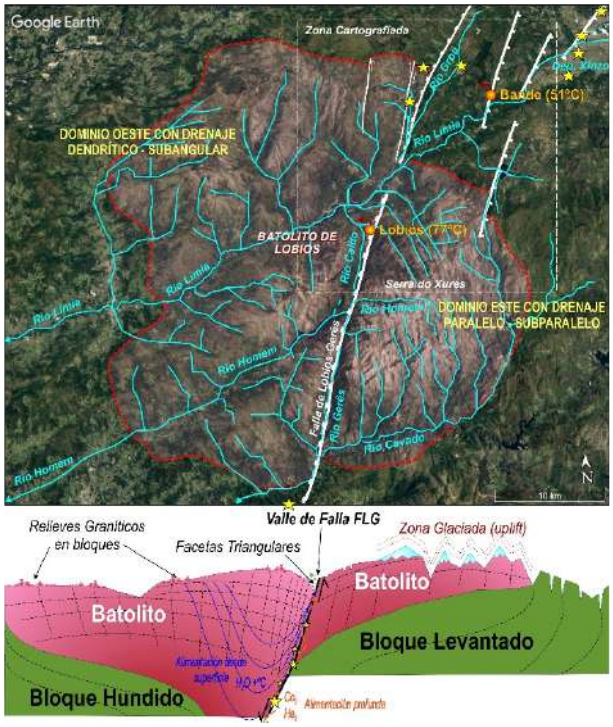


FIGURA 3. Vista Regional del Batolíto de Lobios y su red de drenaje interna y su afección por la zona de Falla de Lobio-Gerês. Abajo corte sintético regional E-W mostrando las relaciones de la falla FLG con la estructura del Batolíto y posible relación con la sismicidad (estrellas mb ≤ 3,5) y circulación profunda de fluidos y gases relacionados con surgencias termales (Lobios y Bande).

Aunque en la zona de estudio no se registra sismicidad relevante, sí que ocurre al norte y al sur de esta. A lo largo de la gran zona de cizalla NNE-SSO (Guimarães-Ourense) de la que forma parte (Fig. 4). Esta se encuentra caracterizada por terremotos de magnitud ≤ 3,5 mb de carácter somero (< 10 km) aunque más al norte (Becerreá, Lugo) pueden alcanzar hasta los 18 km de profundidad. Por el contrario, si se registra actividad hidrotermal, como la del manantial de Lobios con una temperatura de 77ºC y con una cantidad significativa presencia de CO^2 y He^3 de origen mantélico (Martín-González et al., 2022). La surgencia de Bande (51ºC) se registra en una falla subparalela que controla el borde occidental de la Depresión Cuaternaria de Xinzo de Limia (Fig. 3). Estas surgencias termales indican una circulación profunda de fluidos que algunos autores relacionan con el *"triggering"* de enjambres o secuencias sísmicas como las relacionadas con el terremoto de Becerreá de 1997 (5,1 Mw) al norte de la zona estudiada (Martín-González et al., 2022). El análisis sugiere la existencia de una importante actividad geodinámica interna y externa cuaternaria que ha controlado el desarrollo del drenaje y paisaje del Sur de Galicia sobreimpuesta a los antiguos relieves y superficies graníticas. De esta forma, se caracteriza geológica y geomorfológicamente por vez primera una falla sismotectónicamente activa dentro del sector NW del Macizo Paleozoico Ibérico.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto de investigación I+D+i PID2021-123510OB-I00 (USAL) del MICIN AEI/10.13039/501100011033/

REFERENCIAS

Crespo-Martín, C., Martín-González, F. (2021): Statistical analysis of intraplate seismic clusters: the case of the NW Iberian Peninsula. *Pure and Applied Geophysics* 178: 3355–3374.

Corral Lledó, Mª. M., López-Geta, J.A., Fernández Portal, J.M., Mijares Coto, Mª. J., Eds. (2010): GALICIA: *Historia y evolución científica y técnica del conocimiento de las aguas minerales*. IGME, Madrid. 232 pp.

Fernández Tomás J., Piles Mateos E., (1974): *Mapa Geológico de España 1:50000, hoja nº 301 (Lovios).* 2ª Serie (MAGNA). IGME, Madrid.

González-Conde (2023): *Geomorfología Tectónica de la Falla de Lobios-Gerês (Ourense).* Trabajo Fin de Grado, USAL 36 pp.

Martín-González, F. (2009): Cenozoic tectonic activity in a Variscan basement: Evidence from geomorphological markers and structural mapping (NW Iberian Massif). *Geomorphology* 107: 210-225.

Martín-González, F., Antón, J., Insua-Arévalo, J. M., De Vicente, G., Martínez-Díaz, J.J., Muñoz-Martín, A., Heredia, C., Olaiz, A. (2012): Seismicity and potencially active faults in the Northwest and Central-West Iberian Peninsula. *Journal of Iberian Geology* 38 (1): 52-69.

Martín-González, F., Crespo-Martín, C., González-Muñoz, S. (2022): ¿Se puede asociar la sismicidad con las fallas en el NO Peninsular?, *En; Abstracts IBERFAULT 4:* 35-38.

Méndez-Quintas, E., Santoja, M., Pérez-González, A., Arnold, L.J., Demuro, M., Duval, M., (2021): A multidisciplinary overview of the lower Miño River terrace system (NW Iberian Peninsula). *Quaternary International* 566-567: 57-77.

Vidal Romaní, J.R., Villaplana, J.M., De Brum Ferreira, A., Zezere J.L., Rodrigues L., Monge, C. (1990): Los tills de la Serra de Gêres-Xurés y la glaciación Pleistocena (Minho, Portugal-Ourense, Galicia). *Cuaternario y Geomorfología* 4: 13-25.

Yepes Temiño J., Vidal Romaní J.R. (2004): Indicios de antecedencia en la red fluvial del sureste de Galicia. Estudios Geológicos, 60: 21-35.

La cueva de Ostolo (Navarra): 19.000 años de historia climática

Ostolo cave (Navarre): 19,000 years of climate history

J. M. Iturralde[1], J. L. Bernal-Wormull[2], A. Moreno[2], M. Arriolabengoa[3], C. Spötl[4], E. Iriarte[5], B. Oliva-Urcia[1], H. Cheng[6], R.L Edwards[7] y M. Bartolomé[8]

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50009, Zaragoza. jonmariturramen@gmail.com, Geotransfer-IUCA. boliva@unizar.es
2 Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, 50059 Zaragoza. jluis.wormull@ipe.csic.es, amoreno@ipe.csic.es
3 Departamento de Geología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 48940 Leioa. martin.arriolabengoa@ehu.eus
4 Institute of Geology, University of Innsbruck, 6020 Innsbruck, Austria. christoph.spoetl@uibk.ac.at
5 Laboratorio de Evolución Humana-IsoTOPIK Laboratorio de Isótopos Estables. Universidad de Burgos, 09001, Burgos. eiriarte@ubu.es
6 Institute for Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China cheng021@xjtu.edu.cn
7 University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA edwar001@umn.edu
8 Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, 28006, Madrid. mbart@mncn.csic.es

Palabras clave: Bølling–Allerød, Younger Dryas, dataciones de U-Th, isótopos estables

Resumen

Las estalagmitas de la cueva de Ostolo (Arantza, Navarra) proporcionan un registro climático de los últimos 19 ka para los Pirineos Occidentales. La cueva, formada en mármol Devónico-Carbonífero, contiene espeleotemas y rellenos detríticos. La formación de espeleotemas en periodos fríos podría estar favorecida por una mayor disolución del mármol debido a la formación de agua sulfúrica por la oxidación de la pirita presente en las rocas encajantes.

El $\delta^{18}O$ en los espeleotemas indica cambios de temperatura significativos durante la deglaciación, notablemente en HE1, B-A, YD y al inicio del Holoceno. Durante el Holoceno, los valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ muestran un patrón similar, probablemente relacionado con cambios en la lluvia y la vegetación, indicando un Holoceno Temprano más lluvioso y un aumento de la aridez en torno a 5 ka. Durante la deglaciación, el $\delta^{13}C$ muestra un patrón complejo, con oscilaciones bruscas que no parecen estar relacionadas con cambios climáticos o del desarrollo de la vegetación. Así, alcanza valores de +4‰ entre 19 y 16.5 ka, similares al $\delta^{13}C$ de la roca encajante, que cambian a valores negativos (-4 a -6‰) entre 16.5 y 14.8 ka y se enriquecen nuevamente hasta el Holoceno (0-+2‰). Estas oscilaciones pueden estar relacionadas con cambios en la ventilación causados por el bloqueo/apertura de la entrada de la cueva. El aporte de sedimentos detríticos por el río que circula por la cueva de Ostolo sería responsable de esos bloqueos de la entrada y de los cambios asociados en la ventilación.

Abstract

The stalagmites of the Ostolo Cave (Arantza, Navarra) provide a climatic record of the last 19 ka for the Western Pyrenees. The cave, formed in Devonian-Carboniferous marble, contains speleothems and clastic fillings. The formation of speleothems in cold periods could be favored by increased marble dissolution due to the formation of sulfuric water through the oxidation of pyrite present in the host rocks.

The $\delta^{18}O$ in the speleothems indicates significant temperature changes during last deglaciation, notably in HE1, B-A, YD, and the onset of the Holocene. During the Holocene, $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ values show a similar pattern, probably related to changes in rainfall and vegetation, indicating a rainy Early Holocene and an increase in aridity afterwards, ca. 5 ka. During last deglaciation, $\delta^{13}C$ record shows a complex pattern, with abrupt oscillations that do not seem to be related to climatic changes or vegetation development. Thus, it reaches values of +4‰ between 19 and 16.5 ka, similar to the $\delta^{13}C$ of the marbles, which change to negative values (-4 to -6‰) between 16.5 and 14.8 ka and enrich again up to the Holocene (0-+2‰). These oscillations may be related to changes in cave ventilation caused by the blocking/opening of the cave entrance. The input of clastic sediments by the river flowing through the Ostolo Cave would be responsible for these cave blockage and associated ventilation changes.

El registro lacustre Holoceno en La Vega Lagunera (Tenerife, Islas Canarias).

The Holocene record from La Vega Lagunera (Tenerife Island, Canary Islands).

M. Jambrina-Enríquez[1], I. Armenteros-Armenteros[2], M.C. Martín-Luis[1], R. Casillas Ruiz[1] y B. Valero-Garces[3]

1. Dpto. de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, Tenerife, Spain. mjambrin@ull.edu.es, mcmartin@ull.edu.es, rcasilla@ull.edu.es
2. Dpto. de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca, Spain, ilde@usal.es
3. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), 50059, Zaragoza. blas@ipe.csic.es

Palabras clave: Paleoclima, Pleistoceno, Rellenos lacustres, La Laguna, Islas Canarias.

Resumen

Dos nuevos sondeos en las zonas proximales y distales de La Vega Lagunera (La Laguna, Tenerife) permiten mejorar la caracterización del registro Holoceno de esta cuenca pleistocena. La Vega Lagunera es un valle de orientación NE-SW formado por la erosión fluvial de los basaltos miocenos y pliocenos del macizo de Anaga y bloqueado por lavas del Plioceno tardío y Pleistoceno emitidas desde la Dorsal NE de la isla. El Holoceno en las zonas del NE más proximales (sondeo de Decroly, Formación Las Mercedes) tiene una potencia de 9 metros, mientras que en las zonas distales del SW (sondeo Buen Consejo, Formación San Diego) se reduce a unos 4 m. Los resultados preliminares incluyendo sedimentología, scanner de FRX, propiedades magnéticas y las dataciones disponibles (OSL, C^{14}) muestran una sedimentación clástica durante el Pleistoceno y una transición rápida al Holoceno con ambientes poco profundos dominantes desde el Holoceno Medio. Esta investigación se lleva a cabo como parte del proyecto CCR-CAN (TED2021-129695A-I00) apoyado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y NextGenerationEU/ PRTR.

Abstract

Two new cores in the proximal and distal zones of Vega Lagunera (La Laguna, Tenerife) allow improving the characterization of the Holocene record of this Pleistocene basin. Vega Lagunera is a NE-SW oriented valley formed by fluvial erosion of the Mio-Pliocene basalts of the Anaga massif subsequently blocked by late Pliocene and Pleistocene lavas coming from the NE volcanic ridge of the island. The Holocene thickness in the NE most proximal areas (Decroly site, Las Mercedes Formation) is of 9 m thick, whilst in the distal SW areas (Buen Consejo site, San Diego Formation) it is only 4 m thick. Preliminary results, including sedimentology, XRF scanner, magnetic properties and available dating (OSL, ^{14}C) indicate a clastic sedimentation during the Pleistocene and a rapid transition to the Holocene with dominant shallow environments since the Middle-Holocene. This research is conducted as a part of the CCR-CAN project (TED2021-129695A-I00) supported by MCIN/AEI /10.13039/501100011033 and NextGenerationEU/ PRTR.

El registro lacustre Holoceno en la Playa de Taburiente (P.N. Caldera de Taburiente, La Palma, Islas Canarias).

The Holocene lacustrine record at Playa de Taburiente (P.N. Caldera de Taburiente, La Palma, Canary Islands).

M. Jambrina-Enríquez[1,4], J. Vegas[2], R. Casillas Ruiz[1], A. Diez-Herrero[2], M.C. Martín-Luis[1], A. Herrera-Herrera[3,4], N. Egüez[4], B. Valero-Garces[5]

1. Dpto. de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, Tenerife. mjambrin@ull.edu.es, rcasilla@ull.edu.es, mcmartin@ull.edu.es
2. Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Ríos Rosas 23, 28003, Madrid. j.vegas@igme.es, andres.diez@igme.es
3. Departamento de Química. Universidad de La Laguna, Tenerife. avherrer@ull.edu.es
4. Archaeological Micromorphology and Biomarkers (AMBI Lab) Universidad de La Laguna, Tenerife, neguezgo@ull.edu.es
5. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), 50059, Zaragoza. blas@ipe.csic.es

Palabras clave: Paleoambiente, Megalayense, Caldera de Taburiente, La Palma, Islas Canarias.

Resumen

Un nuevo estudio multi-indicador realizado en la secuencia sedimentaria de la Playa de Taburiente (P.N. Caldera de Taburiente, La Palma, Islas Canarias) ha proporcionado la reconstrucción paleoambiental del Holoceno Superior (Megalayense). El depósito lacustre-palustre de 1,20 m de potencia se localiza en el margen derecho del amplio valle aluvial del barranco de Taburiente y la correlación con un registro previo con datación basal de unos 3,5 ka BP (Díez-Herrero et al. 2014), sugiere que la nueva secuencia incluye los últimos 4 ka BP. Los resultados preliminares incluyendo FRX, contenido orgánico elemental, mineralogía y biomarcadores lipídicos han permitido definir las facies sedimentarias y caracterizar la variabilidad de aportes sedimentarios en un ambiente lacustre-palustre poco profundo, con contribución de materia orgánica de plantas acuáticas no vasculares y aportes aluviales a techo de la secuencia. Nuevas dataciones (^{14}C) nos permitirán caracterizar la evolución temporal de estos procesos en el sistema lacustre-palustre de la Playa de Taburiente durante el Holoceno, así como las respuestas a los eventos climáticos globales.

Esta investigación se enmarca en el proyecto PALEOMOL (2915/2022) y el proyecto IVRIPARC (2779/2021) financiados por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

Abstract

A new multi-proxy study of the sedimentary sequence at Playa de Taburiente (N. P. Caldera de Taburiente, La Palma, Canary Islands) has provided a palaeoenvironmental reconstruction of the Late Holocene (Meghalayan Stage). The 1.20 m lacustrine-marsh deposit is located on the right margin of the wide alluvial valley of Taburiente ravine and the correlation with previous records (Díez-Herrero et al. 2014) suggests a basal age of about 4 ka BP. Preliminary results, including XRF, elemental organic content, mineralogy and lipid biomarkers, have allowed us to define the sedimentary facies and identify a shallow lacustrine-palustrine environment with a variable contribution of organic matter from non-vascular aquatic plants and more dominant alluvial influence at the top of the sequence. Age models (^{14}C) are in progress to characterise the processes and evolution of the lacustrine-palustrine system of Playa de Taburiente during the Holocene, as well as the responses to global climatic events.

This research is part of the PALEOMOL project (2915/2022) and the IVRIPARC project (2779/2021) both funded by the Spanish National Parks Organism.

Referencias

Díez-Herrero, A., Perucha, M., García-Oteyza, J., Rodriguez-Pascua, M., Mayer, P., Génova, M., Vegas, J., Baeza, E., Salazar, Á. (2014). En: *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014* (S. Schnabel y Á. Gómez Gutiérrez, Eds.). Universidad de Extremadura, Cáceres, España, 44-47.

El yacimiento paleolítico del Pleistoceno superior de la sala de la Natividad de la cueva de El Cierro (Fresnu, Ribadesella, Asturias): primeros datos

The Paleolithic site of the Natividad room of El Cierro cave (Fresnu, Ribadesella, Asturias): first data

J. F. Jordá Pardo[1], E. Álvarez-Fernández[2], L. Cabello[3], P. Carral[4], M. Cubas[5], F. Cuartero[5], C. Díez [6], M. García-Capín[1], C. López-Tascón[7], A. Marchán[2], A. Martínez-Villa[8], C. Martínez-Varea[2], A. Maximiano[1], J. Molina[1], R. Obeso[9], J. Santa Eugenia[9], S. Vallejo[10] y J.M. Vázquez-Rodríguez[10]

1 Dpto. de Prehistoria y Arqueología, UNED E-28040 Madrid (España). jjorda@geo.uned.es; amaximiano@geo.uned.es; jmolina@geo.uned.es
2 Dpto. de Prehistoria, Hª Antigua y Arqueología, Universidad de Salamanca E-37002 Salamanca. epanik@usal.es, marchan@usal.es, carmarv@usal.es
3 Dpto. de Ciencias Históricas. Universidad de Málaga E-29071 Málaga. lidiacabello@uma.es
4 Dpto. de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid E-28049 Madrid. pilar.carral@uam.es
5 Dpto. de Historia y Filosofía, Universidad de Alcalá de Henares E-28801 Alcalá de Henares (Madrid). miriam.cubas@uah.es, felipe.cuartero@uah.es
6 Dpto. de Historia, Geografía y Comunicación, Universidad de Burgos E-09001 Burgos. clomana@ubu.es
7 Dpto. de Ciencias de la Antigüedad, Universidad de Zaragoza E-50009 Zaragoza. c.lopeztascon@gmail.com
8 Abamia Arkeos y Centro Ecomuseo Fauna Glacial E-33556 Avín, Onís, Asturias (España). abamiaarkeos@gmail.com
9 L'Esperteyu Espeleológico. ramonobeso@gmail.com, javisem@gmail.com
10 Investigador en formación, Escuela Internacional de Doctorado, UNED. svallejo2@alumno.uned.es, jmvr.preh@gmail.com

Palabras clave: Magdaleniense, Solutrense, karst, cronoestratigrafía, cornisa cantábrica.

Resumen

La cueva de El Cierro contiene un yacimiento en su sala de entrada que fue descubierto a la comunidad científica por Francisco Jordá Cerdá a finales de los años cincuenta del siglo pasado. Desde 2014 hemos venido realizando nuevas investigaciones en esta zona que nos han permitido conocer mejor su registro. En el marco del proyecto CantabricOIS2, en los años 2022 y 2023, hemos llevado a cabo un sondeo en la sala de la Natividad, en este caso en la zona interior de la cueva, a la que no llega la luz solar, que nos han permitido localizar una secuencia arqueosedimentaria constituida por una unidad superior con materiales diversos, un espeleotema y dos unidades ricas en materiales del Paleolítico superior. En este trabajo presentamos los primeros datos obtenidos en estas excavaciones.

Abstract

El Cierro cave contains an archaeological site in its entrance room that was discovered to the scientific community by Francisco Jordá Cerdá at the end of the 1950s. Since 2014 we have been carrying out new research in this area that has allowed us to better understand its record. Within the framework of the CantabricOIS2 project, in the years 2022 and 2023, we have carried out a survey in the Natividad room, in this case in the interior area of the cave, where sunlight does not reach, which we have allowed us to locate an archaeo-sedimentary sequence consisting of an upper unit with diverse materials, a speleothem and two units rich in materials from the Upper Paleolithic (Magdalenian and Solutrean). In this work we present the first data obtained in these excavations.

Referencias

Álvarez-Fernández, E., Bécares, J., Jordá Pardo, J.F., Aguirre-Uribesalgo, A., Álvarez-Alonso, D., Aparicio, M.T., Barreda, I., Carral, P., Carrol, R.P., Cubas, M., Cueto, M., Douka, K., Elorza, M., Fernández-Gómez, M.J., Gabriel, S. García-Ibaibarriaga, N., Iriarte, M.J., Llave, C., Maestro, A., Martín-Jarque, S., Portero, R., Suárez-Bilbao, A., Tarriño, A., Teira, L.C., Uzquiano, P., Arias. P. (2020). *Journal of Archaeological Sciences Reports* 29, 102138.

Jordá Pardo, J.F., Carral, P., Álvarez-Alonso, D., Arias, P., Bécares, J., Cubas, M., Martín-Jarque, S., Portero, R., Teira, L.C., Álvarez-Fernández, E. (2018). *Boletín Geológico y Minero* 129, 207-250.

Relación entre el CO_2 del aire del suelo y de la cueva en la Cueva del Águila, España.

Relationship between soil and cave air CO_2 in Cueva del Águila, Spain.

K. Krklec[1], D. Domínguez-Villar[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca 37008 Salamanca, krklec@usal.es; ddvillar@usal.es

Palabras clave: Karst; Dióxido de Carbono; Ventilación; Cueva del Águila, Ávila.

Resumen

La concentración de CO_2 en atmósferas subterráneas es un parámetro clave en regiones kársticas, ya que controla la disolución y precipitación de carbonatos. En las zonas vadosas, la concentración de CO_2 en el aire normalmente aumenta con la profundidad, a menos que se trate de ambientes con grandes espacios abiertos (e.g., cuevas), que provocan una ventilación forzada como resultado de la densidad del aire o los gradientes barométricos entre la atmósfera externa y la atmósfera de las cuevas que son más estables. La ventilación de las cuevas favorece la eliminación del CO_2 del aire de la cueva, mientras que las tasas de ventilación tienen una notable estacionalidad (verano e invierno), lo que hace que el aire de la cueva tenga normalmente concentraciones de CO_2 más bajas que las del suelo.

Para investigar la transferencia de CO_2 del suelo a la zona vadosa en un karst, se ha monitorizado la temperatura, la humedad y las concentraciones de CO_2 en el suelo y la atmósfera de la Cueva del Águila, provincia de Ávila (España) entre los años 2021 y 2023. Nuestros resultados indican que, independientemente del flujo de aire del suelo a la zona vadosa, la concentración de CO_2 en el aire de la cueva y su variabilidad está dominada por la ventilación de la cueva. En el caso estudiado, la ventilación está controlada por el gradiente térmico entre la cueva y el exterior, que impacta la densidad del aire y provoca una mayor ventilación cuando el aire exterior es más frío que el aire de la cueva. La concentración de CO_2 del suelo está controlada principalmente por la humedad del suelo, pero durante la transferencia de CO_2 a la cueva, la ventilación es un proceso tan dominante que impide identificar cualquier patrón común en la variabilidad entre los registros de CO_2 del suelo y el aire de la cueva.

Abstract

The concentration of underground atmosphere CO_2 is a key parameter in karst regions since it controls the dissolution and precipitation of carbonates. In karst vadose zones, the concentration of air CO_2 typically increases with depth, unless in environments with large open spaces (e.g., caves), which cause a forced ventilation as a result of air density or barometric gradients between the external atmosphere and the more stable cave environment. Caves ventilation favors the removal of cave air CO_2, with ventilation rates having a remarkable seasonality (summer and winter), causing the cave air to have typically lower CO_2 concentrations than in the soil.

To investigate the transfer of soil CO_2 to the karst underground, we have monitored temperature, moisture and CO_2 concentrations in soil and cave atmospheres from 2021 to 2023 in Cueva del Águila, Ávila province (Spain). Our results indicate that regardless of the inflow of soil air to the karst underground, the concentration of cave air CO_2 and its variability is dominated by cave ventilation. The ventilation of the studied cave is controlled by the thermal gradient between the cave and the exterior, that impacts the air density, and causes enhanced ventilation when the exterior air is cooler than the cave air. Concentration of soil CO_2 is mostly controlled by soil moisture, but during the transfer of CO_2 to the cave, the ventilation is such a dominant process that prevents identifying any common pattern between the variability of soil and the cave air CO_2 records.

Agradecimientos: This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 101034371.

Evolución de la red fluvial en la Llanada Alavesa (Norte de la península Ibérica, España).

Evolution of the fluvial network in the Llanada Alavesa (North of the Iberian Peninsula, Spain).

I. Martín-Martín[1,2*], P. G. Silva[3], A. Tarriño[1,2] y F. Sarrionandia[2,4]

1 Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Facultad de Letras, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 01006 Vitoria-Gasteiz. *i.martin@ehu.eus; antonio.tarrinno@ehu.eus
2 Servicio de Cartografía Temática y SIG (SGIKER), Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 01006 Vitoria-Gasteiz.
3 Departamento de Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca (USAL), 05003 Ávila. pgsilva@usal.es
4 Departamento de Geología, Facultad de Farmacia, Universidad del País Vasco (UPV-EHU), 01006 Vitoria-Gasteiz. fernando.sarrionandia@ehu.eus

Resumen: Este trabajo analiza la evolución de la cuenca del río Zadorra en la zona de la Llanada Alavesa (País Vasco), y su relación con la divisoria cantábrico-mediterránea en la cuenca alta del Ebro. El estudio permite diferenciar cuatro fases evolutivas con diferentes procesos de captura entre los ríos Zadorra y Arakil, que actualmente ocupan la Llanada Alavesa. La primera fase se daría durante el Mioceno superior-Plioceno inferior siendo el Zadorra un pequeño río dentro de la cuenca de Miranda-Treviño y el Arakil el río que empezaba a drenar y a erosionar la Llanada Alavesa. La segunda fase se desarrollaría durante el Plioceno, comenzando el Zadorra a capturar la paleocuenca de drenaje del Arakil, conectando la zona de divisoria (Llanada Alavesa) con el valle del Ebro. La tercera fase ocurriría en el tránsito Plioceno-Pleistoceno, avanzando la erosión remontante por el Zadorra a lo largo de la zona de divisoria, capturando la cuenca del Arakil hacia el Este. Por último, la cuarta fase tiene lugar a partir del Tránsito Pleistoceno inferior-medio, culminando la captura de la cabecera del Arakil por parte del Zadorra y dándose la inversión del drenaje, continuando la migración de la divisoria hacia al Este.

Palabras clave: Evolución del drenaje, Captura fluvial, Llanada Alavesa, Cuenca del Ebro, Cuaternario.

Abstract: *This paper analyses the evolution of the Zadorra river basin in the Llanada Alavesa area (Basque Country), and its relationship with the Cantabrian-Mediterranean divide in the upper Ebro catchment. The study allows to differentiate four evolutionary phases with different capture processes between the Zadorra and Arakil drainage basins within the current Llanada Alavesa. The first phase occured during the Upper Miocene-Lower Pliocene, with the Zadorra as a small stream within the Miranda-Treviño catchment and the Arakil draining the entire Llanada plateau to the East. The second phase developed during the Pliocene, with the capture of the Arakil catchment by the Zadorra stream giving place with the first connection of the Llanada Alavesa plateau with the Ebro valley in this zone. The third phase took place along the Pliocene-Pleistocene transition, featuring the headward erosion along the Zadorra river towards the eastern sector of the Llanada plateau increasing de captured area of the Arakil basin. Finally, the fourth phase during Lower to Middle Pleistocene time, complete the capture of the Arakil headwaters by the Zadorra river originating the present drainage diversion (East-West divergence) within the Llanada plateau and the ongoing eastwards shifting of the Zadorra-Arakil divide.*

Key words: *Drainage evolution, Fluvial captures, Llanada Alavesa, Ebro Catchment, Quaternary.*

INTRODUCCIÓN

Cada vez son más frecuentes los estudios que abordan la evolución de la red de drenaje en sectores concretos, dada su importancia para la modelización del control y evolución del relieve (Garzón-Heydt, 2023). Pero los sistemas fluviales no sólo suponen excelentes archivos sobre la evolución del relieve, sino que sus formas y depósitos geomorfológicos contribuyen a una mejor comprensión de la evolución del clima durante el Cuaternario (Bridgland y Westaway, 2008) en ambientes continentales.

El río Ebro constituye uno de los sistemas fluviales más importantes de la península Ibérica (85.000 km^2), siendo tras el Nilo el segundo río más largo que drena al Mediterráneo. Se trata del sistema fluvial más antiguo de la península Ibérica, marcando su inicio la edad de apertura del endorreísmo al exorreísmo. Los últimos estudios marcan su inicio entre 12 y 7,5 Ma, según el modelo propuesto por García-Castellanos y Larrasoaña (2015). Esa estimación es coherente con el 9,2 ± 0,5 Ma estimado a partir de la termocronología (Fillon et al., 2013) y con la apertura de 13-8,5 Ma inferida a partir del modelado de procesos (García-Castellanos et al., 2003). También está la hipótesis aceptada hasta el momento que sugiere que la Cuenca del Ebro se abrió hace 5,5 Ma (Riba et al., 1983; Coney et al., 1996; Babault et al., 2006), con el evento de la bajada del nivel del mar Mediterráneo en la Crisis Salina del Messiniense. Todo esto está siendo objeto de debate debido a las limitaciones cronológicas que nos ofrecen los escasos depósitos, por lo que las aproximaciones a estas edades deben realizarse a partir de modelos. Lo que está claro es

que una vez iniciada la fase de exorreísmo en tiempos precuaternarios comienza la evolución geomorfológica asociada a esta red de drenaje, que a día de hoy aún está sin estudiar en su totalidad.

Este trabajo se centra en uno de los principales afluentes del río Ebro en su cabecera, el río Zadorra. La cuenca del Zadorra (Fig. 1) se encuentra en el Norte de la península Ibérica (España), dentro de la provincia de Álava (País Vasco) y el enclave de Treviño (Castilla y León). Se sitúa en la parte superior de la cuenca del Ebro, constituyendo parte de la divisoria de aguas Atlántico-Mediterránea, registrando la evolución fluvial y la competencia del drenaje entre estas dos importantes cuencas del Norte de Iberia. La actual zona de divisoria supone una gran superficie plana (500-600 m) dentro de la cuenca, conocida como la *Llanada Alavesa*.

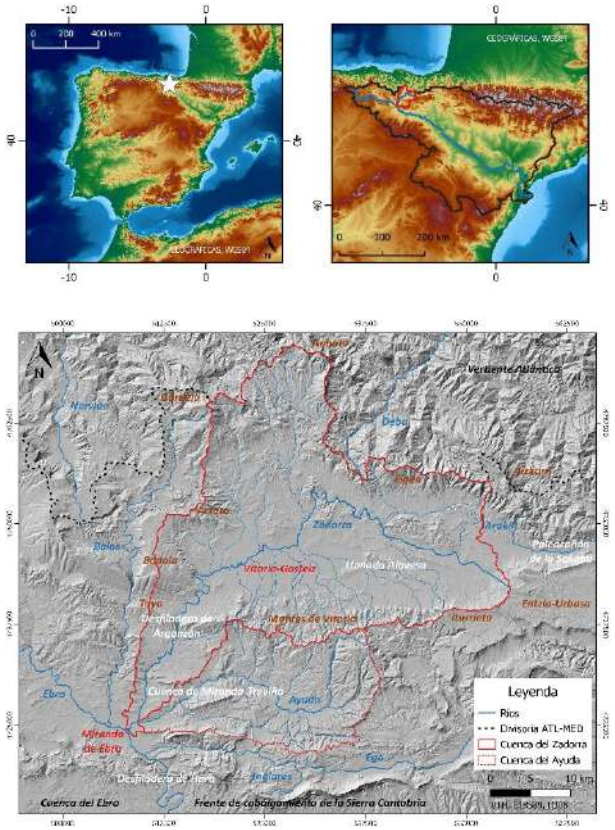


FIGURA 1. *Mapa de situación de la zona de estudio. En la península Ibérica (Arriba Izq.), en la Cuenca del Ebro (Arriba Der.) y MDT-LiDAR de la Cuenca del Zadorra con su red de drenaje actual.*

La cuenca del Zadorra tiene una extensión de 1.398 km^2 y se encarga de drenar los relieves al Sur de los Montes Vascos. Esta cuenca está bien delimitada por sistemas montañosos (Fig. 1). Se limita al Norte, por los Montes Vascos, cuyas montañas y sierras principales son: Gorbeia, Anboto, Elgea y Aizkorri (1200-1500 m). Al Sur por los Montes de Vitoria e Iturrieta (900-1.200 m) y al Oeste por las sierras de Badaia, Arrato y Tuyo (850-1.000 m). En el centro de la cuenca encontramos Vitoria-Gasteiz, capital de la Comunidad Autónoma Vasca. El Zadorra desemboca en la ciudad de Miranda de Ebro a 448 m. Las cuencas de drenaje colindantes de la vertiente mediterránea son las de los ríos: Baias, Ega, Inglares y Arakil. Y las de la vertiente Atlántica las de los ríos Nervión y Deba (Fig. 1). El principal afluente del Zadorra es el río Ayuda, que desemboca a escasos 2,5 km antes de que el Zadorra vierta sus aguas al río Ebro. Dado que el río Ayuda ha seguido una evolución fluvial independiente al Zadorra, en esta contribución se ha decidido obviar la cuenca del Ayuda, centrándonos sólo en el río Zadorra.

Geológicamente (Fig. 2) la zona de estudio se sitúa en el Sur de la Cuenca Vasco-Cantábrica en el denominado Surco Navarro-Cántabro, formando parte de la terminación oriental de la Cordillera Cantábrica (Barnolas y Pujalte, 2004). La estructura general es de grandes pliegues con cabalgamientos sobre las depresiones del Duero y Ebro, destacando además la existencia de numerosos diapiros. Los materiales que afloran en la cuenca del Zadorra se pueden dividir en dos grupos: los materiales marinos del Cretácico, situados al Norte y los continentales del Paleógeno-Neógeno, situados al Sur rellenando la cuenca intramontañosa cenozoica de Miranda-Treviño (color amarillo en la Fig. 2). Las estructuras tectónicas principales son alpinas, definiendo los materiales del Cretácico superior situados al Norte un monoclinal, mientras que hacia el Sur, los materiales del Paleógeno-Neógeno conforman un amplio sinclinal (Miranda-Treviño-Urbasa), que define un marcado relieve invertido.

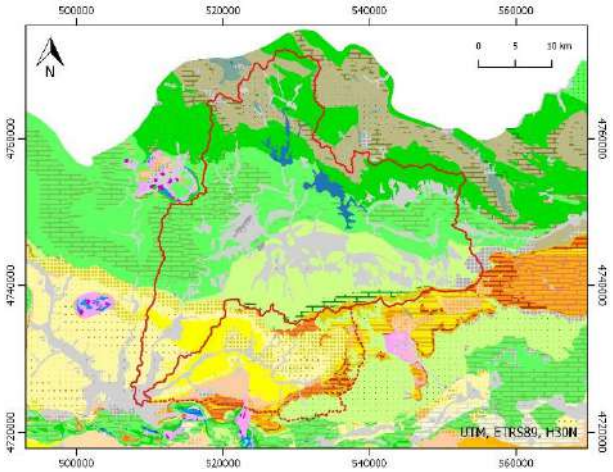


FIGURA 2. *Síntesis geológica de la cuenca del Zadorra.*

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El río Zadorra conecta actualmente la Llanada Alavesa y la Cuenca de Miranda-Treviño (Figs. 1 y 2), pero ambas zonas parecen haber evolucionado inicialmente de forma independiente. Esta hipótesis se apoya en que los depósitos y las formas del relieve de ambas zonas presentan una evolución geomorfológica diferente. El objetivo principal de este trabajo es analizar la geomorfología de la cuenca actual del Zadorra y proponer un modelo preliminar de la evolución de la red de drenaje, para entender mejor su evolución geomorfológica Cuaternaria y pre-Cuaternaria. Con ello, se pretende determinar diferentes pulsos o periodos erosivos-sedimentarios. Para ello, se ha realizado un análisis geomorfológico de las formas y depósitos preservados, utilizando fotos aéreas, ortofotos y sobre todo imágenes LiDAR de 1 m/píxel de resolución con el software libre QGIS V3.

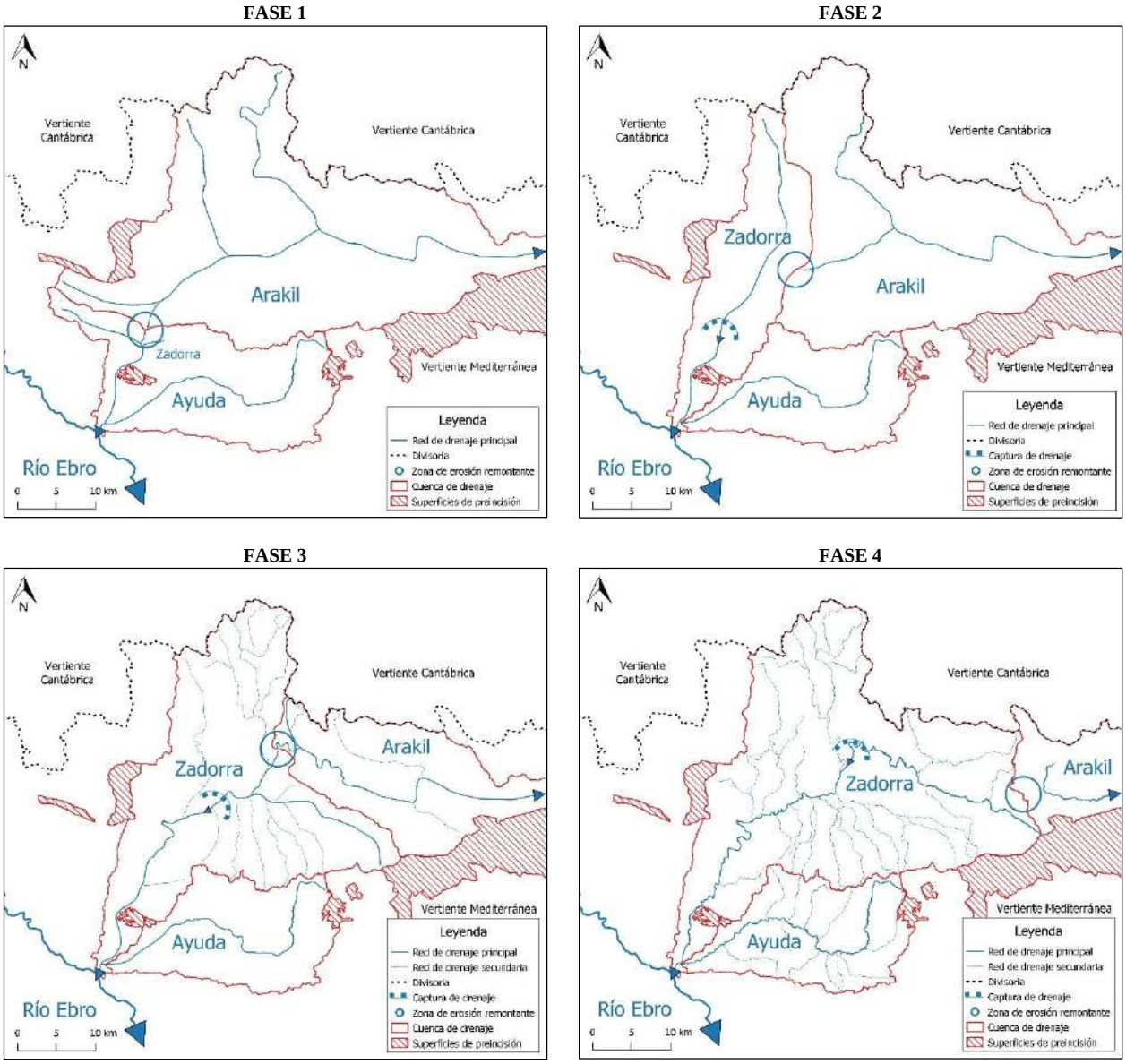


FIGURA 3. *Modelo de evolución de la red de drenaje del río Zadorra. Fases: 1) Mioceno superior-Plioceno inferior, 2) Plioceno, 3) Tránsito Plio-Pleistoceno, 4) Tránsito Pleistoceno Inferior-Medio.*

EVOLUCIÓN DE LA RED DE DRENAJE

La evolución de la cuenca de drenaje del río Zadorra es compleja, iniciándose posiblemente a finales del Neógeno, dándose en varias fases (Fig. 3) y estructurándose por sucesivas fases de superposición y captura fluvial. Las edades de las fases se han estimado mediante los eventos de formación de superficies de erosión, descritas en el trabajo de Benito-Calvo y Pérez-González (2007) para el Noreste de la cuenca del Duero en España.

Fase 1) El proto-Zadorra inicialmente sería un pequeño río dentro de la cuenca intramontañosa cenozoica de Miranda-Treviño, que desembocaría en la parte final del río Ayuda. En la Llanada Alavesa, el proto-Arakil empezaba a drenar y a erosionar la divisoria de la Llanada Alavesa hacia el Este a través del paleocañón Oeste-Este de la Sakana (Fig. 3). En esta zona aparece la primera superficie de erosión (S1) acompañada de valles colgados asociados a una cota de 850-950 m. La superficie de preincisión (S0) se sitúa a una cota de 1.100-1.000 m, limitando gran parte de la divisoria meridional de la cuenca analizada. Su posición altimétrica y la edad de los materiales que se encuentra nivelando permiten correlacionarla con la Superficie de Erosión SE3 de Benito-Calvo y Pérez-González (2007) de edad Turoliense (Tortoniense y Messiniense). Por tanto, esta fase inicial de drenaje de la zona se situaría en el Mioceno superior-Plioceno inferior.

Fase 2) Comienza la captura por erosión remontante desde el Sur por los desfiladeros de Haro y Arganzón, y el proto-Zadorra comienza a capturar la paleocuenca de drenaje del proto-Arakil (Fig. 2). Comienza a definirse una dirección de drenaje Norte-Sur que conecta la zona de divisoria (Llanada Alavesa) con el valle del Ebro. No obstante, el proto-Arakil continuó drenando hacia el Este a través del paleocañón de la Sakana. Esta fase se desarrollaría durante el Plioceno.

Fase 3) Se produce la captura total del drenaje de la Llanada Alavesa, de forma que la erosión remontante progresa a lo largo de la zona de divisoria capturando la cuenca del Arakil hacia el Este, generándose así un amplio *water gap* en el antiguo cañón. A esta fase se asocia el desarrollo de una última superficie de erosión en la zona de estudio (S2) a 500-600 m, que se corresponde a grandes rasgos con la actual Llanada Alavesa. Constituye el periodo de mayor erosión, pudiendo relacionarse con las primeras etapas de deterioro climático del comienzo del Cuaternario, cuyos ciclos de subidas y bajadas de nivel del mar amplificaron la erosión fluvial a nivel global. Esta fase se desarrollaría en el tránsito Plio-Pleistoceno.

Fase 4) Se culmina la captura de la cabecera del Arakil por parte del Zadorra y a medida que la erosión remontante sigue avanzando aguas arriba, se da la inversión del drenaje. La divisoria continúa migrando al Este. Por erosión diferencial, se exhuman estructuras de plegamiento del sustrato Cretácico sobre las que se superpone el drenaje del Zadorra. En los márgenes de la Llanada Alavesa se produce la sedimentación de sistemas de abanicos aluviales. Finalmente, se produce el encajamiento fluvial Cuaternario generándose la secuencia de terrazas y superficies aluviales que se conservan entre +110 y +3-5 m de altitud relativa. Esta última fase tiene seguramente lugar a partir del Tránsito Pleistoceno Inferior-Medio.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La evolución de la red de drenaje del río Zadorra, es compleja dándose en 4 fases diferenciadas desde el final del Neógeno hasta el Cuaternario: 1) Mioceno superior-Plioceno inferior, 2) Plioceno, 3) tránsito Plio-Pleistoceno, 4) Pleistoceno Inferior-Medio. De acuerdo a las edades relativas inferidas de estas cuatro fases, se sugiere que la Crisis Salina del Messiniense y los cambios climáticos Cuaternarios han sido los responsables de la configuración hidrológica de la cuenca del río Zadorra. Esta evolución de la red de drenaje está asociada principalmente a las bajadas y subida del nivel del mar y los cambios climáticos de fríos y áridos a cálidos y húmedos.

Por otro lado, la Crisis Salina del Messiniense (5-6 Ma, Neógeno) podría ser el principal evento en la configuración evolutiva de la red de drenaje del río Zadorra. Dada la impresionante bajada del nivel del mar y la onda de erosión remontante que se generaría aguas arriba, el relieve sería fuertemente arrasado mediante la red de drenaje. De acuerdo al análisis efectuado en esta contribución, se concluye que las divisorias se han ido desplazando a medida que la red de drenaje se ha ido estructurando, dando lugar a fases de superposición y captura fluvial. Parte de este desplazamiento de las divisorias podría también estar condicionado por factores de reajuste isostático y/o de halocínesis diapírica regional. El encajamiento fluvial Cuaternario generaría la secuencia de terrazas y superficies aluviales preservadas. Nuevos estudios sobre las superficies de erosión, las formas y depósitos cuaternarios acompañados de datos geocronológicos ayudarán a perfeccionar el modelo propuesto de evolución fluvial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la beca de doctorado del Gobierno Vasco obtenida por Iván Martín-Martín en la UPV/EHU. Además, ha sido financiado por el proyecto de investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación de España PID2020-118359GB-I00 y en el amparo del Grupo de Investigación IT1435-22.

REFERENCIAS

Babault, J., Loget, N., Van Den Driessche, J., Castelltort, S., Bonnet, S., y Davy, P. (2006): Did the Ebro basin connect to the Mediterranean before the Messinian salinity crisis? *Geomorphology*, 81: 155-165.

Barnolas, A., y Pujalte, V. (2004): La Cordillera Pirenaica: Definición, Límites y División En: *Geología de España* (J. A. Vera, eds). SGE-IGME, Madrid, 233-241.

Benito-Calvo, A. y Pérez-González, A. (2007): Erosion surfaces and Neogene landscape evolution in the NE Duero Basin (north-central Spain). *Geomorphology*, 88: 226-241.

Bridgland, D. y Westaway, R. (2008): Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 98: 285-315.

Coney, P.J., Muñoz, J.A., McClay, K.R., y Evenchick, C.A. (1996): Syntectonic burial and posttectonic exhumation of the southern Pyrenees foreland fold-thrust belt. *Geological Society of London Journal*, 153: 9-16.

Fillon, C., Gautheron, C., y van der Beek, P. (2013): Oligocene-Miocene burial and exhumation of the Southern Pyrenean foreland quantified by low-temperature thermochronology. *Geological Society of London Journal*, 170: 67-77.

Garcia-Castellanos, D. y Cruz Larrasoaña, J. (2015): Quantifying the post-tectonic topographic evolution of closed basins: The Ebro basin (northeast Iberia). *Geology*, 43: 8, 663-666.

Garcia-Castellanos, D., Vergés, J., Gaspar-Escribano, J., y Cloetingh, S. (2003): Interplay between tectonics, climate, and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia). *Journal of Geophysical Research*, 108: 2347.

Garzón-Heydt, G. (2023): Drenaje transverso, capturas y morfotectónica en la integración atlántica del sistema del río Alagón (Cáceres). En: *Libro de actas del XVI Reunión Nacional de Geomorfología*: 168.

Riba, O., Reguant, S., y Villena, J. (1983): Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. En: *Libro Jubilar* (J.A. Comba, eds.). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 131-159.

Bailando en la oscuridad: la interpretación de las dataciones por OSL en sistemas kársticos

Dancing in the dark: understanding OSL dating in karst systems

A. Medialdea[1], J.M. Verges[2], M. del Val[1] y M. González-Santos[1]

[1] Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), 09002 Burgos. alicia.medialdea@cenieh.es, miren.del-val@cenieh.es, marta.gonzalez@cenieh.es
[2] Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social (IPHES-CERCA), 43007 Tarragona, Spain. jmverges@iphes.cat

Palabras clave: datación por luminiscencia, blanqueamiento parcial, Paleolítico Superior, Edad del Hierro

Resumen

La datación por luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) permite establecer en qué momento los granos de cuarzo en sedimentos estuvieron expuestos a la luz solar por última vez. En este trabajo, la OSL se ha aplicado para establecer la cronología de varios rellenos sedimentarios localizados a lo largo de la Cova de la Font Major, en la Espluga de Francolí, Tarragona, donde se ha hallado un excepcional conjunto de grabados del Paleolítico Superior y restos arqueológicos de la Edad del Hierro, relacionados con un uso cultural de la cavidad. La datación por OSL y C14 de los depósitos que rellenan, y colmatan en algún caso, las galerías debía permitir establecer cuando éstas quedaron taponadas y ayudar a establecer, principalmente, una cronología de uso del santuario paleolítico.

Los resultados del total de 10 muestras sedimentarias analizadas proporcionan, en algunos niveles, edades alrededor de un orden de magnitud más antiguas respecto a los obtenidos por C14. Esto indica que, entre la entrada del sedimento que contenía los granos de cuarzo a la cavidad y su deposición en el nivel de donde fueron extraídos, pasaron unos miles de años, durante los cuales fue retrabajado una o varias veces, sin exposición a la luz solar. Esta información, si bien no aporta datos directos sobre la frecuentación humana, permite entender la dinámica sedimentaria de la cavidad. Las dataciones obtenidas datan de forma precisa los momentos en que se produjo un aporte de sedimento desde el exterior.

Este trabajo pone de manifiesto la dificultad para relacionar, en sistemas kársticos, los momentos de aporte sedimentario desde el exterior y su deposición dentro de las cavidades, pero también pone en valor la importancia de la información sobre procesos de sedimentación aportada por la respuesta luminiscente de los granos de cuarzo.

Abstract

Optically stimulated luminescence (OSL) makes it possible to establish when quartz grains within sediments were exposed to sunlight for the last time. This allows us to date geomorphological processes where sediment transport occurs, as well as archaeological remains embeded in the sediment. In this study, OSL was applied to establish the chronology of a series of sedimentary infills along Font Major Cave, in Tarragona, where a number of carvings from the Upper Paleolithic and archaeological remains from the Iron Age were found. OSL and C14 dating of the sediments that fill, and in some cases clog, the galleries, should provide information on when access was blocked and help establishing a chronology for the use of the paleolithic sanctuary.

The results from 10 sediment samples collected along the cave provide ages, in some units, around one order of magnitude older than those obtained with C14. This indicates that, between entrance to the cave and last sedimentation several thousands of years passed, involving one or more events of transport and deposition of the sediment, with no exposure to daylight. Although the estimated ages cannot be related to human use, it provides information to understand the sedimentary dynamics of the cavity. The ages provide a reliable time of exterior sediment input.

This study shows the complexity of applying OSL to date sediments in karstic systems but it also shows that the luminescence response registered in quartz grains can provide useful information beyond dating.

Cambios hidroclimáticos del Holoceno en el Pirineo a partir de espeleotemas de cuevas

Pyrenean speleothems as Holocene archives of hydroclimate variability.

A. Moreno[1], M. Bartolomél[2] I. Cacho[3], H. Stoll[4], R.L. Edwards[5] y H. Cheng[6]

1 Instituto Pirenaico de Ecología - CSIC, Zaragoza 50016 amoreno@ipe.csic.es
2 Swiss Institute for Speleology and Karst Studies (SISKA), CH-2301 La Chaux-de-Fonds, Switzerland, mbart@mncn.csic.es
3 GRC Geociències Marines, Facultad de Geología, Universitat de Barcelona, 28080, Barcelona, icacho@ub.edu
4 Department of Earth Sciences, ETH Zürich, Zürich, Switzerland heather.stoll@erdw.ethz.ch
5 University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA edwar001@umn.edu
6 Institute for Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China cheng021@xjtu.edu.cn

Palabras clave: espeleotemas, paleoclima, Holoceno, Pirineos, isótopos estables

Resumen

Estudios recientes sobre la hidroclimatología de la Península Ibérica han revelado un patrón regional complejo en cuanto al momento y la intensidad del cambio climático a lo largo del Holoceno. Los espeleotemas encontrados en cuevas de los Pirineos ofrecen una fuente detallada de información paleoclimática para este período. Este estudio utiliza un análisis de alta resolución de isótopos estables y elementos traza en trece estalagmitas de cinco cuevas diferentes en los Pirineos Centrales españoles. Los resultados de $\delta^{13}C$ se organizan en términos de altitud, con valores de $\delta^{13}C$ menos negativos en cuevas de mayor altitud o bajo roca desnuda en comparación con aquellas bajo suelo bien desarrollado. La combinación de los registros de $\delta^{18}O$ permite la reconstrucción de la variabilidad isotópica de las precipitaciones a escala regional. El comienzo del Holoceno se caracteriza por un cambio a valores más negativos, correspondientes al Óptimo Climático hace ca. 10,000 años. Se observa una ligera tendencia hacia valores menos negativos durante la segunda parte del Groenlandiense y la primera parte del Norgripiense (aproximadamente entre hace 9,000 y 5,000 años). El cambio climático más significativo ocurre durante el período Megalayense (de hace 4,250 a la actualidad), con valores generalmente menos negativos y dos episodios distintos que indican condiciones climáticas secas, hace 4,000 y 3,000 años, respectivamente. Este estudio tiene como objetivo contribuir con nuevos conocimientos sobre el clima del Holoceno en el noreste de Iberia e integrar estos hallazgos con registros marinos y terrestres previos para alcanzar una comprensión regional coherente.

Abstract

Recent studies on the hydroclimate of the Iberian Peninsula have revealed a complex regional pattern in the timing and intensity of climate change throughout the Holocene. Speleothems found in caves within the Pyrenees offer a detailed source of paleoclimate information for this period. This study utilizes high-resolution analysis of stable isotopes and trace elements in thirteen stalagmites from five different caves in the Central Spanish Pyrenees. The caves exhibit an evident organization in terms of altitude, with stalagmites from higher altitude or under barren rock showing less negative $\delta^{13}C$ values compared to those under well-developed soil. The combination of $\delta^{18}O$ values allows for the reconstruction of rainfall isotopic variability at a regional scale. The beginning of the Holocene is characterized by a shift to more negative values, with the most negative values occurring around 10,000 years ago, corresponding to the Climatic Optimum in terms of precipitation. A slight trend towards less negative values is observed during the second part of the Greenlandian and the first part of the Northgrippian (approximately 9,000 to 5,000 years ago). The most significant climate change occurs during the Meghalayan period (last 4,250 years), with generally less negative $\delta^{18}O$ values and two distinct episodes indicating dry climatic conditions, one at the beginning of the period (at 4,000 and 3,000 years ago, respectively). This study aims to contribute new insights into the Holocene climate of Northeastern Iberia and integrate these findings with previous marine and terrestrial records to form a coherent regional understanding.

La "Superficie Pisoteada de Matalascañas". Un yacimiento icnológico excepcional del Pleistoceno Medio (Huelva, SO de España)

The Matalascañas Trampled Surface. An exceptional Middle Pleistocene ichnological site (Huelva, SW Spain)

F. Muñiz[1], C. Neto[2], L.M. Cáceres[3], M. Abad[4*], T. Izquierdo[4], B. Joao[5], J.M. Galán[6], A. Toscano[3], P. Gómez[3], Z. Belaústegui[7], F. Ruiz[3], S. Ramírez-Cruzado[2], G. Finlayson[8], S. Finlayson[8], C. Finlayson[8], F. Giles[8], J. Rodríguez-Vidal[3] y A. Medialdea

1 Dpto. Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química, Universidad de Sevilla 41012-Sevilla. fmuniz@us.es
2 Naturtejo UNESCO Global Geopark, Idanha-a-Nova Portugal. carlos.praedichnia@gmail.com
3 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva 21007-Huelva. mcaceres@uhu.es, antonio.toscano@dgyp.uhu.es, paula.gomezgutierrez@hotmail.com, ruizmu@dgyp.uhu.es, jrvidal@uhu.es
4 Dpto. Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, Universidad Rey Juan Carlos 28933-Móstoles. tatiana.izquierdo@urjc.es
5 Geosciences Center, University of Coimbra, FlyGIS-UAV Surveys, Coimbra Portugal. jbelo.flygis@gmail.com
6 Centro Administrativo El Acebuche, Parque nacional de Doñana, 21760-Matalascañas Huelva. donana.galan@gmail.com
7 Dpto. Dinàmica de la Terra i de L'Oceà, Universitat de Barcelona, 08028-Barcelona. zbelaustegui@ub.edu
8 The Gibraltar National Museum, Gibraltar. geraldine.finlayson@gibmuseum.gi, stewart.finlayson@gibmuseum.gi, francisco.giles@gibmuseum.gi, clive.finlayson@gibmuseum.gi
9 Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), 09002 Burgos. alicia.medialdea@cenieh.es

Palabras clave: icnología, MTS Trampled Surface, Pleistoceno, neandertales, Matalascañas.

Resumen

La MTS (por sus siglas en inglés, *Matalascañas Trampled Surface*) es un yacimiento icnológico excepcional del Pleistoceno Medio (MIS6, 151±11 ka, Neto *et al.*, 2023) descrito en el acantilado de El Asperillo (Matalascañas, SO de España). En la MTS se han documentado huellas y rastros de grandes mamíferos: elefante de colmillos rectos (*Palaeoloxodon antiquus)*, uro (*Bos primigenius)*, jabalí (*Sus scrofa)*, ciervo (*Cervus elaphus)*, lobo (*Canis lupus)*; así como de aves Anseriformes (gansos y patos) y Charadriiformes. Igualmente, se han identificado huellas aisladas y rastros de *Homo neanderthalensis* en asociación con industria lítica musteriense. La MTS se interpreta desde el punto de vista paleoambiental, como un paleosuelo hidromórfico desarrollado en la fase final del estadio isotópico MIS6, en, una costa con presencia de lagunas interdunares de interior, muy similares a las observables en la actualidad en el entorno y en el vecino Parque Nacional de Doñana, aunque más alejadas de la línea de costa.

Abstract

The MTS (Matalascañas Trampled Surface), an exceptional ichnological site from the Middle Pleistocene (MIS6, 151±11 ka, Neto et al. 2023), is described at El Asperillo Cliff (Matalascañas, SW Spain). In MTS, traces and tracks of large mammals have been identified, such as straight-tusked elephant (*Palaeoloxodon antiquus)*, aurochs (*Bos primigenius)*, wild boar (*Sus scrofa)*, red deer (*Cervus elaphus)*, gray wolf (*Canis lupus)*, as well as traces of Anseriformes (geese and ducks) and Charadriiformes (shorebirds) birds. Likewise, isolated footprints and tracks of *Homo neanderthalensis* in association with Mousterian lithic industry have been documented in MTS. The MTS is interpreted as a hydromorphic paleosol developed in the final phase of the MIS6, with the presence of interdunal inland lagoons like those currently observed in zone and in the Doñana National Park.

Referencias

Neto De Carvalho, C.; Muñiz, F.; Cáceres, L.M.; Rodríguez-Vidal, J.; Medialdea, A.; Del Val, M.; Cunha, P.; García, J.M.; Giles-Guzmán, F.; Carrión, J.; Belaústegui, Z.; Toscano, A.; Gómez, P.; Galán, J.M.; Belo, J.; Cachão, M.; Ruiz, F.; Ramírez-Cruzado, S.; Finlayson, G.; Finlayson, S. and Finlayson, C. (2023). *Quaternary Science Reviews* 313, 108200. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108200.

How sensitive is the microbial signature in environmental DNA (eDNA) to discriminate paleotsunamis on the Atacama Desert coast?

¿Cómo de sensibles son los marcadores microbianos en ADN ambiental (ADNa) para discriminar paleotsunamis en la costa del desierto de Atacama?

R. Oses[1], P. Lavin[2], T. Izquierdo[3], M. Forch[4] y M. Abad[3]

1 Centro Regional de Investigación y Desarrollo Sustentable de Atacama (CRIDESAT), Universidad de Atacama, Av. Copayapu, 485, 1530000, Copiapó (Chile), romulo.oses@uda.cl
2 Departamento de Biotecnología, Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Biológicos, Universidad de Antofagasta, 1240000 Antofagasta (Chile) paris.lavin@uantof.cl
3 Grupo de investigación en Dinámica de la Tierra y Evolución del Paisaje de la Universidad Rey Juan Carlos (DYNAMICAL), c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles (España) tatiana.izquierdo@urjc.es, manuel.abad@urjc.es
4 Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago (Chile) mforch@gmail.com

Abstract: Paleotsunamis of the Southern Atacama Desert coast have been poorly studied due to the expected low preservation. Environmental DNA (eDNA) is a new tool that researchers have begun using to corroborate tsunami deposits by the presence of molecular signatures of exclusive marine organisms. The eDNA from sediment samples of tsunamigenic (+TSU) or non-tsunamigenic areas (-TSU) of tsunamis of different ages were analyzed. Protocols of eDNA extraction and amplicon sequencing (16S prokaryotic, 18S eukaryotic) were optimized. Significant differences in microbial community structure between +TSU and -TSU, lower microbial diversity and homogeneity in +TSU samples were found. Molecular signatures of marine organisms were detected in +TSU including Eukayota (*Cercozoa, Buccinum, Perkinsus*) and Prokaryota (*Caminicella, Bauldia, Paracoccus, Methyloceanibacter, Halobacterium, Sphingomonas, Pelagibius*). The properties of +TSU sites and the arid conditions of the Atacama Desert suggest a special conservation conditions and good eDNA recovery with marine microbial signatures in younger +TSU samples. In contrast, older tsunamis will require refined analytical method. eDNA opens possibilities for studying tsunami deposits, identifying new potential marker marine groups in addition to current markers such as diatoms and foraminifers. eDNA can offer valuable information as part of a multi-proxy toolkit for future research.

Key words: paleotsunami, paleoDNA, metabarcoding, Atacama Desert, Chile

Resumen: *Los paleotsunamis en las costas desierto de Atacama han sido poco estudiados debido a su bajo potencial de preservación en zonas áridas. El ADN ambiental (ADNa) está comenzando a utilizarse para confirmar depósitos de paleotsunamis debido a la presencia de señales moleculares de organismos exclusivamente marinos. Se analizó el ADNa de sedimentos de diferentes capas tsunamigenicas (+TSU) y no-tsunamigenicas (-TSU) de distintas edades. Los protocolos de extracción de ADNa y secuenciación de 16S (procariota) y 18S (eucariota) fueron modificados y optimizados con este objetivo. Se detectan diferencias significativas en la estructura de la comunidad microbiana entre +TSU y -TSU, presentando una menor diversidad microbiana y homogeneidad en +TSU. Algunas señales moleculares de organismos exclusivamente marinos fueron detectadas en Eukayota* (Cercozoa, Buccinum, Perkinsus)*, y en Prokaryota (*Caminicella, Bauldia, Paracoccus, Methyloceanibacter, Halobacterium, Sphingomonas, Pelagibius*). Las propiedades de los niveles +TSU y las condiciones áridas de la costa del desierto de Atacama sugieren condiciones especiales de conservación facilitando la recuperación de ADNa incluyendo las señales de organismos marinos en depósitos +TSU recientes. Las muestras +TSU más antiguas requerirán una adaptación metodológica. El ADNa abre nuevas posibilidades convirtiéndose en una herramienta complementaria en futuras investigaciones futuras sobre paleotsunamis.*

Palabras clave: *paleotsunami, paleoADN, metabarcoding, desierto de Atacama, Chile*

INTRODUCTION

Paleotsunami studies have been based on identifying and analyzing their onshore deposits in areas without historical or archaeological evidence (e.g. Engel *et al.*, 2020). However, in the absence of suitable environments for their preservation, i.e., without coastal freshwater bodies, such as in the Atacama Desert (Chile), its study becomes a challenge and new proxy approaches are necessary. In addition, when preserved in these arid conditions soil and salt crust formation masked these tsunami sediments, or eolian processes rework the sand supplied landward for the tsunami waves. Although recent studies have found evidence on these coasts of large tsunamis (Abad *et al.*, 2020; Salazar *et al.*, 2022), new methods can improve the identification of tsunami

deposits camouflaged in these arid environments that have so far be unnoticed.

In this work, we present the preliminary results of the analysis of several sediment ancient DNA samples (eDNA) from a stratigraphic section located in the lagoon and wetland system of Carrizal Bajo (southern Atacama Desert) with the aim of whether the DNA is preserved in arid conditions, as well as if the high-throughput amplicon sequencing (metabarcoding) can be used as a tool for the identification of tsunami deposits by the detection of molecular signatures of marine organisms.

MATERIALS AND METHODS

Study area, stratigraphic section and sampling

Carrizal Bajo is located at 28ºS on the southern edge of the Atacama Desert (Chile). Its wetland and coastal lagoon system extends from the coast towards the southeast, following the valley ~650 m, and connects with a salt marsh of ~0.1 km^2 (Fig. 1). The lagoon is disconnected from the sea by a narrow sandy barrier 150 m wide that only experiences ruptures during some severe winter storms, tsunamis, and infrequent continental floods.

We describe a 75 cm stratigraphic section, ~1 km inland and 3 m above mean sea level (Fig. 1), constituted by an alteration of sand, mud and peat deposits. From base to top the sedimentary succession begins with a 23 cm thick dark brown sandy silts with a thin layer of peat on its top. Overlying this bed is a 10 cm thick medium grey sand with an erosive base followed by a 5 cm thick clay layer. Above this, a peat layer 3 cm thick appears that has been dated in 990 – 1024 cal CE (Forch, 2024; sample DNA-5, peat). On top of it is a 6 cm thick medium grey sand (sample DNA-4, +TSU-1) with an erosive base. Overlying these sands, a 5 cm thick silty clay layer appears (DNA-3, -TSU, reference site), which is also overlaid by a 10 cm thick deposit of massive, medium grey sands (sample DNA-2, +TSU-2), with an erosive base. A 10 cm dark brown sandy silt with a sharp contact appears on top of them, overlaid by medium grey quartziferous sands 10 cm thick and an irregular erosive base (sample DNA-1, +TSU-3). This layer has been associated with the recent 1922 Atacama tsunami (Forch, 2024). Finally, the top of the section is formed by a 13 cm thick layer of paleosoil, and a thin layer of light brown medium sands that appears colonized by vegetation.

Environmental DNA processing

DNA extraction was conducted using the DNeasy PowerSoil Pro Kit (Qiagen, Hilden, Germany) with some modifications. Sediment samples were homogenized with vortex, and then, under a hood, 600 mg of each one was taken and transferred to a cryotube with mechanical disruption beads and 800 µL of CD1 buffer from the Qiagen Dneasy PowerSoil Pro kit. The samples were homogenized with a Bead Beater mechanical shaker, using 3 pulses of 30 seconds at 3200 rpm. Proteinase K (Invitrogen, QS0511) and Lysozyme (Thermo Fisher,

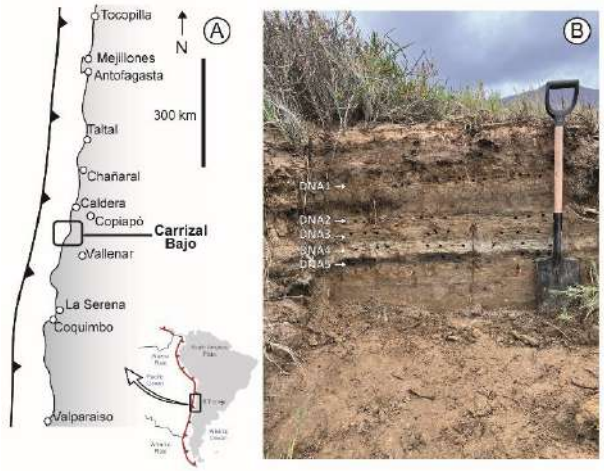


FIGURE 1. A) Location of the study area at the southern edge of the Atacama Desert; B) Satellite image form Google Earth of Carrizal Bajo and location of the stratigraphic section (star); C) Photograph of the stratigraphic section showing the sampled layers

90082) were added to the supernatant, which was incubated for 8 hours at 55 °C. Subsequently, the protocol was followed according to the supplier's specifications.

DNA samples were quantified by fluorimetry to provide an exact quantification of the DNA concentration before beginning the preparation of the libraries. Estimation of the concentration of the samples was carried out using the Qubit dsDNA HS Assay Kit in the Qubit 4.0 fluorimeter using a calibration curve with the 2 standards of known concentration delivered in the kit. This quantification includes the negative extraction control, which yielded undetectable amounts of DNA.

To prepare the libraries, a protocol based on the "Illumina 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation" protocol was followed using primers to identify the ribosomal RNA gene in bacteria with some modifications. The libraries were made using primers with barcodes and heterogeneity spacers, according to Fadrosh and collaborators (Fadrosh *et al.* 2014). The 16S set of primers for Prokaryota used in this work were Bacteria (16S F: CCTACGGGNGGCWGCAG / 16S R: GACTACHVGGGTATCTAATCC) (Klindworth *et al.* 2013). The 18S set of primers for Eukayota, microalgae (18S, 528 F: GCGGTAATTCCAGCTCCAA / 18S 706 R: AATCCRAGAATTTCACCTCT) (Cheung *et al.*, 2010). The libraries were checked by capillary electrophoresis with the Fragment Analyzer with the DNF-910 Kit. A final quantification was done by fluorimetry to dilute them to a loading concentration suitable for the Illumina Miseq equipment.

Barcode demultiplexing, trimming and analysis.

The demultiplexing process was performed from the raw sequences delivered by the Illumina MiSeq with cutadapt 2.10 (Martin, 2011) that were analyzed using the dada2 package (v1.8) implemented in R(v4.0.2) (Callahan *et al.*, 2016). Taxonomic assignment of the ASVs was performed using the Silva 16S rRNA and 18S rRNA database (silva.nr.v138). The community analysis

was performed in R with the phyloseq package (v1.40.0) (McMurdie and Holmes, 2013).

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the alpha diversity measure and the diversity distribution across all the +TSU vs -TSU sediment samples. The results are plotted across samples (+TSU/-TSU) and reviewed as box plots for each group or experimental factor. Further, the statistical significance of grouping based on experimental factors is also estimated using either parametric or non-parametric tests. The prokaryotic microbial community assemblage between +TSU and -TSU sediment samples showed significant differences from the eukaryotic microbial community. Also, lower microbial diversity and a certain degree of homogeneity in +TSU samples were found, which could be related to the disrupted nature of tsunami episodes and its features such as intensity, magnitude and specific dynamic that impacts decreasing microbial diversity, an aspect that needs more study and will be discussed in future analysis.

Figure 3 shows the relatively high and low abundance of members of prokaryotic and eukaryotic communities detected in +TSU and +TSU sediment samples across the tsunamis. Despite of common groups detected in +TSU and -TSU, there are molecular signatures of marine organisms that were detected exclusively in +TSU samples (Fig. 3), including Eukaryota members such as *Cercozoa*, *Buccinum*, *Perkinsus*, and Prokaryota members such as *Caminicella*, *Bauldia*, *Paracoccus*, *Methyloceanibacter*, *Halobacterium*, *Sphingomonas*, *Pelagibius* (Table 1).

The properties of +TSU layers and the arid conditions of the Atacama Desert suggest special conservation conditions that allowed a good recovery (quality and quantity) of eDNA with special emphasis on marine microbial signatures in younger +TSU samples. In contrast, older tsunamis will require refined analytical methods. In agreement with previous research (Engel *et al.*, 2020), our results confirm that prokaryotic and eukaryotic microbial communities differ between -TSU (control) and +TSU deposits at statistically significant levels and that marine organism assemblages can be reconstructed onshore tsunami deposits, indicating that eDNA can be a meaningful addition to the multi-proxy toolkit used in paleotsunami research in the future.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work contributes to the TRAMPA project (PID2021-127268NB-100) funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and FEDER/UE.

REFERENCES

Abad, M., Izquierdo, T., Cáceres, M., Bernárdez, E. and Rodríguez-Vidal, J. (2020): Coastal boulder deposit as evidence of an ocean-wide prehistoric tsunami originated on the Atacama Desert coast (northern Chile). *Sedimentology*, 67(3): 1505-1528.

Callahan, B.J., Mcmurdie, P.J., Rosen, M.J., Han, A.W., Johnson, A.J.A. y Holmes, S.P. (2016): DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature Methods*, 13: 581–583.

Cheung, M., Au, C., Chu, K., Kwan, H.S. y Wong, C.K. (2010): Composition and genetic diversity of

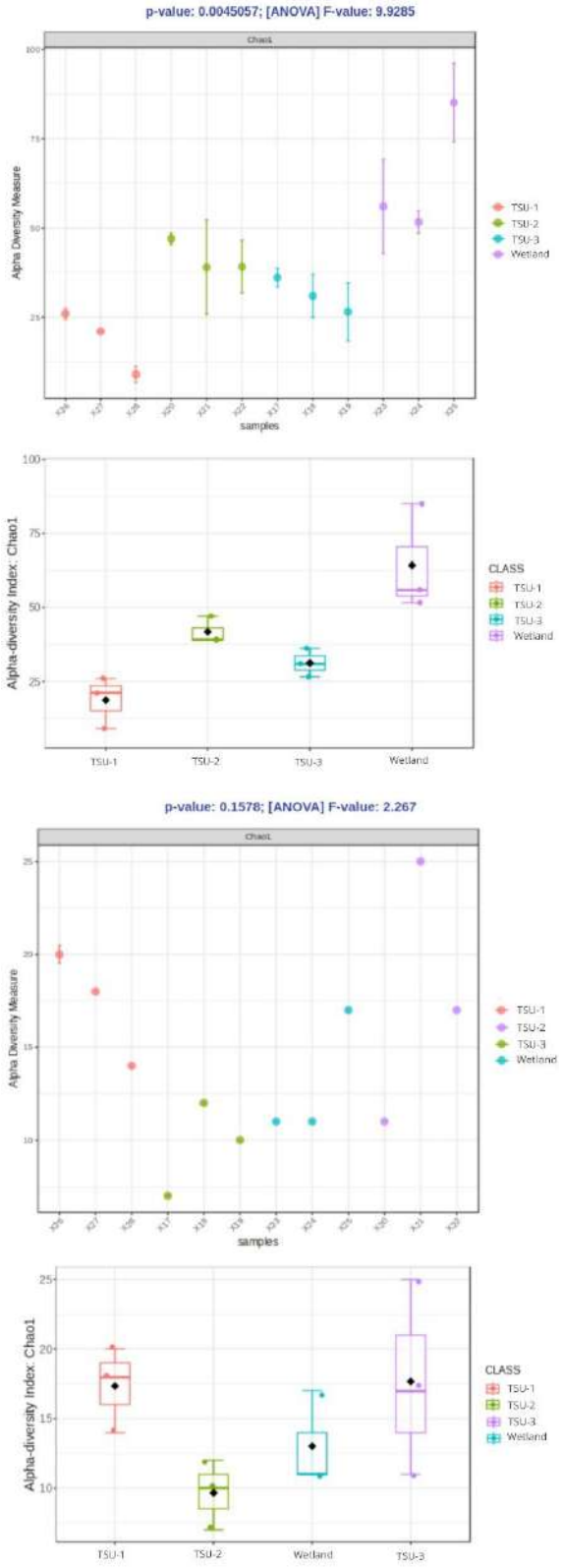


FIGURA 2. *Alfa diversity measure and diversity index Chao1 at "class" taxonomic level for the 16S (A, Prokaryota) and 18S (B, Eukaryota) molecular markers detected in sediment samples from tsunamigenic (+TSU) and non-tsunamigenic (-TSU, reference site, wetland) areas with different ages +TSU -1, +TSU- 2 and +TSU- 3.*

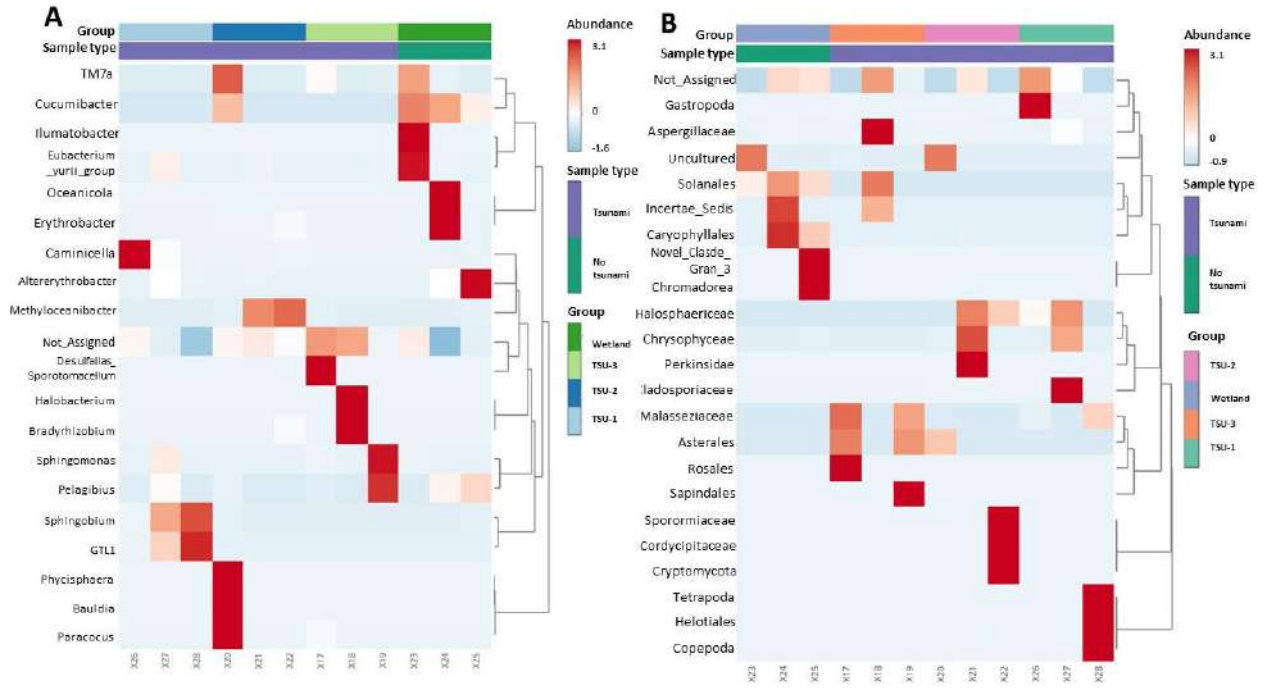


FIGURA 3. *Relative abundance of prokaryotic (A) and eukaryotic (B) microbial communities associated with sediment samples from tsunamigenic (+TSU) or non-tsunamigenic (-TSU, blue, control layer, "wetland") areas with different ages +TSU-1, +TSU-2 and +TSU-3). The red/blue bar scale indicates high/low relative abundance.*

+TSU-3	+TSU-2	+TSU-1	Kingdom	Phylum	Family	Genus	Model Species	Origin
(+)	(+)	(+)	Eukaryota	SAR	uncultured	*Cercozoa*	*Cercozoa* _sp._DDB-2008b	Marine
(+)	(+)	(+)	Eukaryota	Opisthokonta	Gastropoda	*Buccinum*	*Buccinum* sp	Marine
(+)	(+)		Eukaryota	SAR	Perkinsidae	*Perkinsus*	*Perkinsus* sp	Marine
(+)			Bacteria	Firmicutes	Caminicellaceae	*Caminicella*	NA	Marine
	(+)		Bacteria	Planctomycetota	Phycisphaeraceae	*Bauldia*	NA	Marine
	(+)		Bacteria	Proteobacteria	Rhodobacteraceae	*Paracoccus*	NA	Marine
	(+)		Bacteria	Proteobacteria	Methyloligellaceae	*Methyloceanibacter*	NA	Marine
		(+)	Archaea	Halobacterota	Halobacteriaceae	*Halobacterium*	NA	Marine
		(+)	Bacteria	Proteobacteria	Sphingomonadaceae	*Sphingomonas*	NA	Marine
		(+)	Bacteria	Proteobacteria	Kiloniellaceae	*Pelagibius*	NA	Marine

TABLA I. *Summary of prokaryotic and eukaryotic marine organisms identified by high-throughput amplicon sequencing (metabarcoding) across tsunamis deposits of different ages.*

.

picoeukaryotes in subtropical coastal waters as revealed by 454 pyrosequencing. *ISME Journal*, 4: 1053–1059.

Engel, M., Schön, I., Patel, T., Pawlowski, J., Szczucinski, W., Dawson, S., Garreta, E. y Heyvaert, V.M.A. (2020): Paleogenetic approaches in tsunami deposit studies. En: *Geological Records of Tsunamis and Other Extreme Waves* (M. Engel, *et al.*, eds.). Elsevier, 427-442.

Fadrosh, D.W., Ma, B., Ravel, J. (2014): An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform. *Microbiome*, 2(1): 6.

Forch, M. (2024): Registro de paleotsunamis holocenos en el humedal árido de Carrizal Bajo. Tesis para la obtención del Título de Magister en Ciencias (mención Geología). Universidad de Chile, 134 p.

Forch, M. (2024): Registro de paleotsunamis holocenos en el humedal árido de Carrizal Bajo. Tesis para la obtención del Título de Magister en Ciencias (mención Geología). Universidad de Chile.

Klindworth, A., Pruesse, E., Schweer, T., Peplies, J., Quast, C., Horn, M. y Glöckner, F.O. (2012): Evaluation of General 16S Ribosomal RNA Gene PCR Primers for Classical and Next-Generation Sequencing-Based Diversity Studies. *Nucleic Acids Research*, 41(1), e1.

Martin, M. (2011). Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet journal*, 17(1): 10-12.

McMurdie, P.J. and Holmes, S. (2013): phyloseq: An R package for reproducible interactive analysis and graphics of microbiome census data. *PLoS ONE*, 8: e61217.

Salazar, D., Easton, G., Goff, J., Guendon, J.L., González-Alfaro, J., Andrade, P., Villagrán, X., Fuentes, M., León, T., Abad, M., Izquierdo, T., Power, X., Sitzia, L., Álvarez, G., Villalobos, A., Olgúin, L., Yrarrazaval, S., González, G., Flores, C., Borie, C., Castro, V. y Campos, J. (2022): Did a 3800-year-old M w~ 9.5 earthquake trigger major social disruption in the Atacama Desert? *Science Advances*, 8(14): eabm2996.

Geoquímica de pinturas rupestres mediante el uso de técnicas portátiles de fluorescencia de rayos X (pXRF): aplicación al Abrigo de Belén, Madrid.

Geochemical analysis by using portable fluorescence X-ray (pXRF): application in "Abrigo de Belén, Madrid".

R. Pérez-López[1], F. Millán-González[2], J. Martínez-Fernández[2], F. J. Pastor-Muñoz [3], M. Moreno-Arranz[2], M. Cruz Mateos[3]; C. Serrano-Perucha[2] J.J. Herencia[2], E. Bellido[1], J. Martínez-Martínez[1] y J.F. Mediato[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. r.perez@igme.es; e.bellido@igme.es; j.martinez@igme.es; jf.mediato@igme.es

2 Comisión de Conservación y Catalogación de Cavidades de la Federación Madrileña de Espeleología. fmillan2k@hotmail.com; jherencia@telefonica.net

3 Área de Protección del Patrimonio, Subdirección General de Patrimonio Cultural, Consejería de Cultura, Turismo y Deporte, Cdad. de Madrid. dg.patrimonio.cultural@madrid.org

Resumen: El estudio geoquímico del arte rupestre en general necesita destruir una ínfima parte de las pinturas para su análisis en laboratorio mediante técnicas de Espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) y de difracción de rayos x (DXR). A pesar de que las cantidades comprometidas son pequeñas, en este trabajo hemos utilizado un medidor portátil de XRF (pXRF) para determinar de forma semi-cuantitativa la composición química del arte rupestre que aparece en el Abrigo de Belén, pequeña muestra de representación del arte rupestre esquemático del Calcolítico que aparece en la Comunidad de Madrid. Además, se ha medido en laboratorio la composición química de los carbonatos donde aparece, así como de mineralizaciones compatibles con el arte rupestre. En el análisis llevado a cabo "in situ", determinó una disminución en Fe frente a la composición original de la roca donde aparecen dichas pinturas. Las limitaciones del método dependen del tamaño de las pinturas y del espesor de las mismas.

Palabras clave: geoquímica, pXRF, arte rupestre, Abrigo de Belén, Madrid**.**

Abstract: *The analysis of rock paintings in caves has been conducted impacting the sample during geochemical analyses, such as fluorescent and X-ray analysis. Despite the minimal destruction of samples, we employed a portable X-ray fluorescent device to ascertain the geochemical composition of the cave paintings in "Abrigo de Belén" (Chalcolithic cultural period, Madrid Province). Additionally, we examined the original rock and corresponding mineralization in the laboratory. Preliminary results indicate a significant presence of Fe in the paintings. Methodological limitations depend on the size and width of the paintings.*

Key words: *geochemistry, pXRF, cave paintings, Abrigo de Belen, Madrid.*

INTRODUCCIÓN

La utilización de técnicas no invasivas en el estudio de pinturas y representaciones esquemáticas rupestres permite su preservación para estudios posteriores y conservación, sin perder por ello la fuerza del dato analítico sobre la composición geoquímica de los pigmentos utilizados. Los trabajos pioneros de Newman y Loendorf (2005) sobre la aplicación de técnicas no invasivas, en concreto el uso de analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X (a partir de ahora citados como pXRF), abre un espectro de utilización de dichas técnicas sin afectar a los pigmentos utilizados y preservando su naturaleza original.

La aplicación de pXRF permite conocer la composición química del pigmento, tanto en composición de óxidos como en composición de elementos. En el trabajo de Newman y Loendorf (2005), se midió el cromo de la pigmentación para determinar que el mineral utilizado para la elaboración del pigmento fue la fucsita [$K(Cr,Al)_2(AlSi_3)O_{10}(OH,F)_2$], una variedad de la mica con moscovita que proporciona un tono verde por el alto contenido en cromo, y que se utilizó en arte esquemático rupestre en Montana. Posteriormente, el trabajo de Tykot (2016) señala tanto las ventajas como las limitaciones en el uso de pXRF aplicado en arqueología para el estudio de pigmentos. En primer lugar el analizador debe estar debidamente calibrado, así como validar los resultados en laboratorio mediante técnicas cuantitativas para determinar si hay alguna tendencia en la medida de algún componente químico.

La técnica de análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (pXRF) identifica los elementos químicos presentes en una muestra irradiada. Al irradiar la muestra con un haz de rayos X de alta energía, los átomos en la muestra absorben parte de la energía y emiten radiación secundaria en respuesta. Esta radiación emitida por los átomos de la muestra es característica para cada elemento químico y, por lo tanto, se puede utilizar para identificar los elementos presentes en la muestra. La intensidad de la radiación de

fluorescencia secundaria emitida por los átomos de la muestra es proporcional a la concentración de cada elemento presente, lo que permite, mediante previa calibración, la determinación cuantitativa de la composición elemental de la muestra. La técnica pXRF permite identificar los elementos presentes en la muestra, determinación cualitativa y mediante el método de parámetros fundamentales (FP) realizar una estimación semi-cuantitativa de la composición geoquímica multi-elemental.

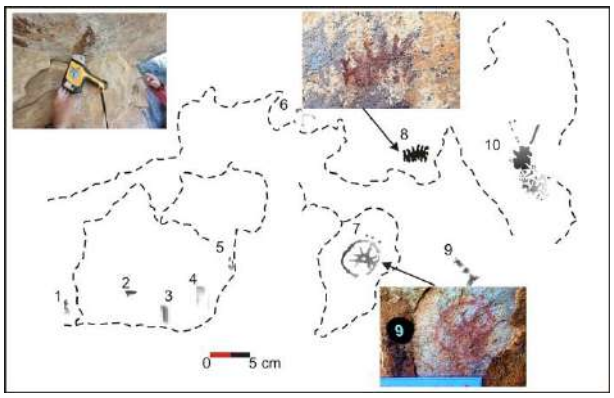


FIGURA 1. *Esquema de las pinturas esquemáticas del Abrigo de Belén (Madrid). Esquema modificado de Alcolea-González et al. (1994).*

ARTE RUPESTRE DEL ABRIGO DE BELEN

Las pinturas rupestres del Abrigo de Belén aparecen sobre calizas cretácicas (Cretácico superior) de la zona de Torrelaguna (Madrid), y corresponden a representaciones esquemáticas del calcolítico madrileño, en relación con lugares de inhumación colectiva y habitacional (Alcolea-González et al., 1994).

Las representaciones rupestres consisten en unos pequeños dibujos de tamaño centimétrico, sobre un frente de caliza protegido por una visera, y que no ocupan más de 40 cm de longitud. Dentro de los elementos que podemos reconocer aparece un dibujo que representa un sol o *heliomorfo* (número 7 de la Fig. 1) y un elemento *ramiforme* (número 8 de la Fig. 1), así como de un antropomorfo (número 1, Fig. 1). Presentan un tono rojizo, están realizados con pintura y actualmente se encuentran en estado muy difuso y sin protección alguna a las condiciones ambientales. A fecha de este artículo no se ha publicado ningún análisis químico del mismo, aunque son muy similares al típico ocre ibérico que aparecen en diferentes cuevas en España de época similar. Para ampliar la descripción de los dibujos, consultar Lucas-Pellicer et al. (2006).

Es interesante destacar que los dibujos son pinturas de tono rojizo y que su exposición a la intemperie habrá producido alteraciones sobre la composición original, así como la precipitación de finas láminas de carbonatos que probablemente darán valores sesgados en la composición de carbonatos (Dayet et al., 2022).

RESULTADOS PRELIMINARES

El espectrómetro portátil Olympus DELTA puede detectar una amplia variedad de elementos, desde el magnesio (Mg) hasta el uranio (U), en concentraciones que van desde partes por millón (µg/g) hasta porcentajes.

Hemos medido una serie de puntos sobre las pinturas rupestres y sobre la roca limpia, colocando el equipo portátil Olympus directamente sobre cada dibujo, con las siguientes condiciones de medida: s Beam1 40 kV t: 40s y Beam 2 10 kV t: 30s en cada punto. Además, se hicieron 3 medidas consecutivas en cada punto, para asegurar la repetitividad y reproducibilidad del método, representando el valor medio de cada medida (última línea de cada zona, Tabla 1, excepto en la Roca limpia 2 donde salieron datos anómalos de Fe.

DESCRIPCION	Fe	Ti	Ca	Al	Si	P	S	Mn	K
	11.78	0.21	20.00	4.58	10.82	0.16	0.05	0.05	0.67
ROCA	14.70	0.14	20.35	5.81	12.09	0.25	0.12	0.12	0.99
LIMPIA	11.28	ND	19.77	5.97	10.41	0.24	0.15	0.04	0.65
	12.59	**0.18**	**20.04**	**5.45**	**11.11**	**0.22**	**0.10**	**0.07**	**0.77**
	2.51	0.29	14.80	4.38	11.55	0.87	0.43	0.07	18.58
ROCA	2.31	0.34	15.92	5.36	14.44	0.77	13.62	0.08	18.85
LIMPIA 2	2.30	0.33	15.01	4.82	12.84	0.88	0.85	0.08	17.84
	2.37	**0.32**	**15.24**	**4.85**	**12.94**	**0.84**	**4.97**	**0.08**	**18.42**
	0.38	ND	27.90	2.70	4.92	21.62	0.22	ND	0.25
ROCA	0.36	ND	28.50	3.21	5.45	25.81	0.28	ND	0.31
LIMPIA 3	0.32	ND	30.14	2.84	4.89	25.53	0.24	ND	0.23
	0.35	**ND**	**28.85**	**2.92**	**5.09**	**24.32**	**0.25**	**ND**	**0.26**
MANCHA ROJA	0.50	ND	25.29	3.37	5.79	12.64	0.14	ND	0.33
MASIVA	0.61	ND	25.76	3.86	6.49	13.57	0.15	0.03	0.43
NUM 10	0.65	ND	25.71	3.74	6.18	11.22	0.15	0.03	0.40
	0.59	**ND**	**25.59**	**3.66**	**6.15**	**12.48**	**0.15**	**0.03**	**0.39**
	0.58	0.08	24.73	4.43	6.49	0.59	0.08	0.03	0.37
SOL	0.63	ND	23.22	4.40	6.88	0.62	0.09	0.06	0.49
NUM 7	0.66	ND	23.99	3.83	6.37	0.74	0.06	0.05	0.46
	0.62	**0.08**	**23.98**	**4.22**	**6.58**	**0.65**	**0.08**	**0.05**	**0.44**
	0.50	ND	25.17	3.77	5.88	0.74	0.07	0.02	0.33
RASPA	0.54	ND	24.84	3.75	6.00	0.80	0.06	0.05	0.36
NUM 8	0.61	ND	24.81	3.50	5.77	0.85	0.08	0.03	0.37
	0.55	**ND**	**24.94**	**3.67**	**5.88**	**0.80**	**0.07**	**0.04**	**0.35**
	8.45	0.25	12.13	2.54	4.53	0.12	0.06	ND	0.21
COSTRA	11.85	0.32	15.88	2.18	3.67	0.13	0.08	ND	0.18
HIERRO	12.00	0.39	6.83	4.01	6.94	0.31	0.24	ND	0.60
	10.77	**0.32**	**11.61**	**2.91**	**5.05**	**0.18**	**0.13**	**ND**	**0.33**

TABLA I. *Resultados de los elementos principales medidos en un primer análisis sobre el Abrigo de Belén, tanto en roca sin pigmentar como en los principales esquemas figurativos interpretados según Alcolea-González et al. (1994) y que aparecen numerados en la figura 1. ND no detectado. El valor final de cada caso es la media de los tres anteriores.*

Los valores aparecen como elementos en µg/g, siendo la medida como óxidos de cada elemento principal. Los valores mostrados son los obtenidos "in situ" con la técnica pXRF.

Los valores de calcio son muy similares entre la zona pigmentada y la zona sin pigmentar, sugiriendo una precipitación posterior sobre los pigmentos y el resto de la roca sin pigmentación. Si se observa una disminución significativa de los valores de Si y K. Debido a los valores anómalos de Fe que se han obtenido, se han planteado unas nuevas campañas para

volver a medir sobre las pinturas, así como realizar nuevos análisis en otras pinturas cercanas como en la Cueva de las Avispas. Una vez reanalizada la presencia de los óxidos de hierro, será posible incluso de comparar con otros análisis similares en la Península Ibérica, como el trabajo de Iriarte et at. (2009).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación, programa Retos 2021, FAMRAD, con número de referencia PID2020-113407RBI00. El acceso al abrigo de Belén y el tratamiento digital de los motivos ha sido realizado por la Comisión de Conservación y Catalogación de Cavidades de la FME en el marco del proyecto PROKABAJA, financiado por el Área de Protección del Patrimonio, Subdirección General de Patrimonio Cultural, Consejería de Cultura, Turismo y Deporte de la Comunidad de Madrid.

REFERENCIAS

Alcolea-González, J.J., de Bunes, F., García-Valero, M.A., Márquez, B. (1994): Las representaciones rupestres esquemáticas del Abrigo de Belén (Torremocha, Madrid). *Estudios de Prehistoria y Arqueología Madrileña*, 9: 29-32.

Dayet, L., d'Errico, F., García-Diez, M., Zilhão, J. (2022): Critical evaluation of in situ analyses for the characterisation of red pigments in rock paintings: A case study from El Castillo, Spain. *PLoS ONE* 17(1): e0262143.

Iriarte, E., Foyo, A., Sánchez, M. A., Tomillo, C., Setien, J. (2009): The origin and geochemical characterization of red ochres from the Tito Bustillo and Monte Castillo caves (northern Spain). *Archaeometry* 51(2), 231–251.

Lucas-Pellicer, M. R., Cardito-Rollán, L. M., Gómez Hernanz, J. (2006): *Dibujos en la roca: el arte rupestre en la Comunidad de Madrid*. Ed. Comunidad de Madrid, Consejería de Cultura y Deportes. Dirección General de Patrimonio Histórico. ISBN 84-451-2853-1. 363pp.

Martín-Ramos, P.; Cuchí-Oterino, J.A.; Bea-Martínez, M. (2023): Portable X-ray Fluorescence Analysis of Levantine and Schematic Art Pigments from the River Vero Shelters (Huesca, NE Spain). *Heritage*, 6, 3789–3800.

Newman B. y Loendorf, L. (2005): Portable X-Ray Fluorescence Analysis of Rock Art Pigments. *Plains Anthropologist*, 50, (195): 277-283.

Tykot, R.H. (2016): Using Nondestructive Portable X-ray Fluorescence Spectrometers on Stone, Ceramics, Metals, and Other Materials in Museums: Advantages and Limitations. *Applied Spectroscopy*, 70(1) 42–56.

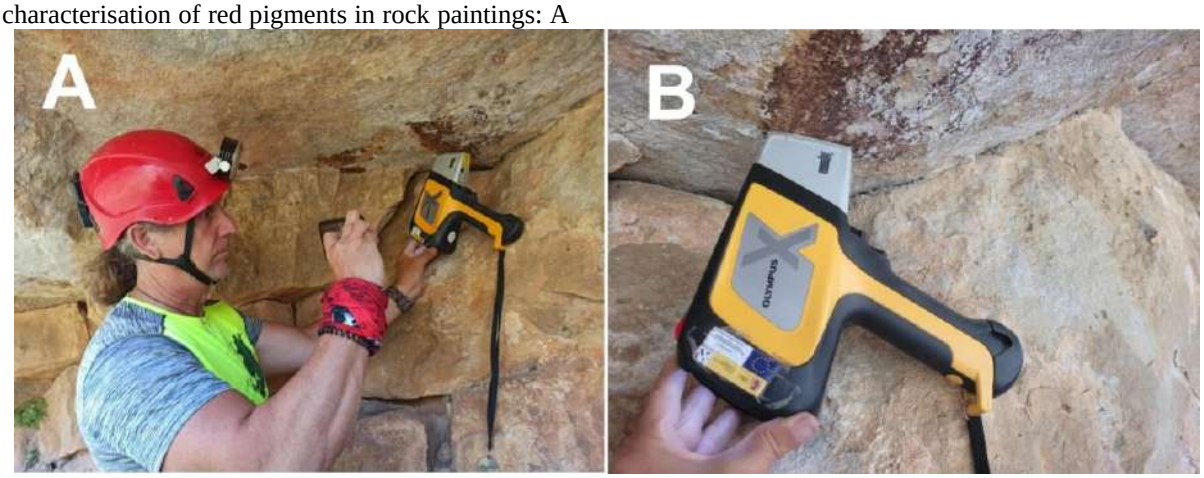


FIGURA 2. A. *Análisis geoquímico mediante el uso de un equipo pXRF Olympus modelo DELTA X-pro. B. Detalle de toma de datos sobre costra ferruginosa en el Abrigo de Belén (Madrid).*

Modelización 3D de los efectos arqueosismológicos registrados en el acueducto de romano de *Baelo Claudia*, siglo IV CE, Cádiz, España.

3D modelling of the archaeoseismological effects recorded in the Roman aqueduct of Baelo Claudia, 4th century CE, Cádiz, Spain.

Y. Sánchez-Sánchez[1], J. Elez[1], P.G. Silva[2], I. García-Jiménez[3], M. A. Rodríguez-Pascua[4] y J. Giner-Robles[5]

1 Depto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced s/n, Salamanca, España. yolanda.ss@usal.es, j.elez@usal.es
2 Depto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad Salamanca, Hornos Caleros 50, 05003 Ávila, España. pgsilva@usal.es
3 Conjunto Arqueológico Romano de *Baelo Claudia*, Ensenada de Bolonia, s/n, 11391 Tarifa (Cádiz), España. ivan.garcia@juntadeandalucia.es
4 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. ma.rodriguez@igme.es
5 Depto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco, 28049 Tres Cantos, España. jorge.giner@uam.es s

Resumen: A partir de la obtención de modelos 3D y ortofotografía de alta resolución mediante la adquisición de imágenes con drones se ha realizado una caracterización y cuantificación de la deformación y daños causados por el terremoto y posterior tsunami de finales del siglo IV CE en un segmento del acueducto de la ciudad romana de *Baelo Claudia* (Cádiz, sur de España) que atravesaba un arroyo cerca de las murallas exteriores de la ciudad. Los modelos obtenidos permiten la cuantificación geométrica de las deformaciones sísmicas (desplazamientos, amplitudes de pliegues, rotaciones, etc.) en un entorno 3D basado en SIG adecuado para cuantificar daños orientados de origen sísmico. Este segmento de acueducto (aproximadamente orientado E-W) sufre deformación por pliegues de eje vertical y rotaciones que afectan a toda su parte oriental, modificando la forma original de la construcción. Además, se observa una inclinación del conjunto hacia el sur (originalmente vertical) de hasta un 5 % y un desplazamiento lateral de hasta 2,27 m de su posición original. Por otro lado, la parte oriental del acueducto está arrancada de su sitio, desplazada y colapsada hacia el valle. El conjunto de deformaciones del acueducto, por su posición perpendicular respecto al valle que atraviesa, puede perfectamente responder a daños generados por el tsunami que afectó a la ciudad Romana tras el terremoto. La localización y tipología de la deformación estaría hidrodinámicamente alineada con una descarga importante de agua canalizada por el valle hacia la costa (sentido sur).

Palabras clave: Arqueosismología, gemelos digitales, terremoto-tsunami, *Baelo Claudia*, Cádiz.

Abstract: *Based on the acquisition of 3D models and high-resolution orthophotography through drone imaging, a characterization and quantification of the deformation and damage caused by the earthquake and subsequent tsunami at the end of the 4th century CE in a segment of the aqueduct of the Roman city of Baelo Claudia (Bolonia, Tarifa, southern Spain), that crossed a creek near the outer walls of the city, has been carried out. The obtained digital models (twins) allow the geometric quantification of seismic deformations (displacements, fold amplitudes, rotations, etc.) in a GIS-based 3D environment suitable for measuring seismic oriented damage. This aqueduct segment (approximately E-W oriented) is deformed by vertical-axis folds and rotations affecting the whole eastern part and modifying the original figure of the aqueduct. In addition, the whole structure (originally vertical) is tilted to the south (coast) up to 5% and displays a maximum lateral displacement of 2.27 m from its original position. On the other hand, the eastern part of the aqueduct is torn out of its place, displaced and toppled towards the valley. The set of deformations disturbing this construction may well respond to damage generated by the subsequent tsunami re-shaping the Roman city after the earthquake. The location and features of deformations would be hydrodynamically triggered by an important water discharge channelled downstream (south) through the valley during the tsunami backwash.*

Key words: *Archeoseismology, digital twins, earthquake-tsunami event, Baelo Claudia, Cádiz, South Spain*

INTRODUCCIÓN

Baleo Claudia es una ciudad romana localizada en la ensenada de Bolonia, al oeste de Tarifa (Cádiz). El yacimiento arqueológico se encuentra sobre margas cretácicas (Bolonia Fm.). El sector litoral de la ciudad está formado por tres niveles de terrazas marinas desarrollados durante el Pleistoceno Medio-Superior (Silva *et al.*, 2005) y escalonadas de norte a sur a cotas de +20-22 m (ciudad alta), +13-14m (teatro y templos) y +7-8m ya en la zona portuaria litoral. Esta zona más baja de la ciudad ha sido parcialmente cubierta por coluviones y depósitos eólicos después de su abandono (Fig. 1). *Baelo Claudia* fue afectada por dos importantes

terremotos, el primero a finales del siglo I CE. que afectó a gran parte de la ciudad (Murallas, Teatro, etc.) reconstruida posteriormente adquiriendo el título de Municipio romano y sujeta a una importante monumentalización (Foro, Basílica, Macellum, Termas, etc.) cuyas ruinas son las que conforman el yacimiento actual (Sillères, 1997). El segundo terremoto ocurre a finales del siglo IV CE. seguido por un tsunami, destrozando la ciudad de nuevo sufriendo como consecuencia un abandono posterior (Reicherter *et al.*, 2022; Silva *et al*, 2023). Este yacimiento posee una gran importancia en los estudios arqueosismológicos ya que preserva muchas deformaciones cosísmicas en sus construcciones que han conformado la base para la clasificación, cuantificación y cartografía de los denominados Efectos Arqueológicos de los Terremotos (EAEs; Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011; Giner-Robles *et al.*, 2012). Más recientemente muchos de esos EAEs han sido objeto de análisis 3D mediante modelos generados por vuelos de Dron (Sanchez *et al.* 2022).

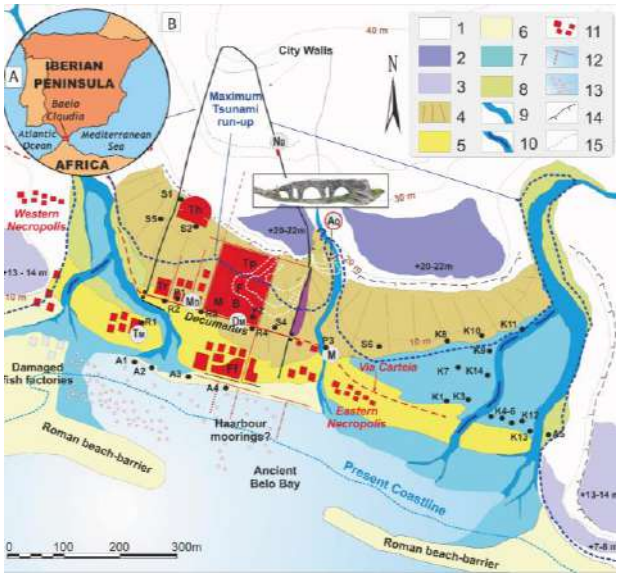


Figura 1. (A) Situación de Baelo Claudia en España. (B) Paleogeografía de Baelo Claudia (Reicherter et al., 2022 and Silva et al., 2021). Leyenda: 2 y 3 Terrazas marinas del pleistoceno, 5 Barras litorales, 8 Terrazas modernas y 11 construcciones romanas. (Aq) Ubicación del acueducto romano en Baelo Claudia.

Uno de los mayores monumentos afectados por el terremoto del S. IV CE y su posterior tsunami fue el acueducto (Fig. 2), que atravesaba un arroyo cerca de las murallas exteriores al Este de la ciudad. Esta construcción se vio afectada por el empuje de la ola del tsunami y la erosión de la ola de retroceso erosionando los laterales del valle, deformando la estructura del acueducto. Para este trabajo se han obtenidos modelos 3D y ortofotografías de alta resolución mediante fotos aéreas en serie tomadas con Dron. Los modelos resultantes permiten la cuantificación geométrica de las deformaciones sísmicas (desplazamientos, amplitudes de pliegues, rotaciones, etc.) en un entorno 3D basado en SIG adecuado para cuantificar el daño orientado de origen sísmico.

METODOLOGÍA

Para la caracterización y cuantificación de la deformación y daños causados por el terremoto y posterior tsunami se ha realizado el gemelo digital (*digital twin*) del acueducto, para ello se ha llevado a cabo el siguiente procedimiento:

(a) Toma de imágenes y puntos de control: La toma de imágenes se ha realizado con un dron Mavic 2 Pro de DJI, las imágenes se tomaban con un posicionamiento gps+glonas cuya precisión es de ±0.5m en la vertical y ±1.5m en la horizontal. La cámara que transportaba el dron es una cámara RGB (Red, Green, Blue) Hasselblad con 1" CMOS de sensor y 20MP. El objetivo de la cámara posee un FOV de 770 y una apertura focal de 2.8 – 11.

La toma de imágenes se ha llevado a cabo con dos planes de vuelo el primero en órbita, y el segundo un vuelo en cuadricula con una superposición de imágenes ambos planes de vuelo del 60% también y una distancia aproximada al acueducto de 4m. Para ajustar la posición de las imágenes se han tomado puntos de control en las distintas superficies y vértices usando el GPS RTK FLX100 de Leica. En el procesamiento de las imágenes que fueron obtenidas de los vuelos, la cual implica una alineación, orientación, creación de la nueve de puntos y a partir de esta la creación del modelo 3D, un Modelo Digital de Elevaciones -MDE- y una ortofotografía de alta resolución. Para todo ello se ha utilizado el software *Agisoft Methashape Professional*.



Figura 2. Foto del acueducto tomada por Dron, donde se puede observar el valle y parte de las deformaciones del tsunami.

b) Análisis de la nube de puntos y generación de modelos digitales. En un segundo paso, a partir de la nube de puntos se ha realizado un Modelo Digital de Superficie -MDE- de alta resolución (5mm/píxel) con proyección planar y definiendo un eje horizontal dirección Oeste-Este en el centro del acueducto paralelo al eje original del acueducto (fig. 2F) y una rotación de 90 grados convirtiendo la pared vertical en horizontal (fig. 2B). Posteriormente se ha realizado cortes topográficos en distintos puntos del acueducto calculando las desviaciones respecto el eje principal (fig. 2A, 2C, 2D, 2E). Posteriormente a partir del modelo3D (287.669 caras) y la ortofotografía de alta resolución (2 mm/píxel) se han cartografiado los principales efectos cosísmicos y del tsunami en el acueducto. Una vez creado

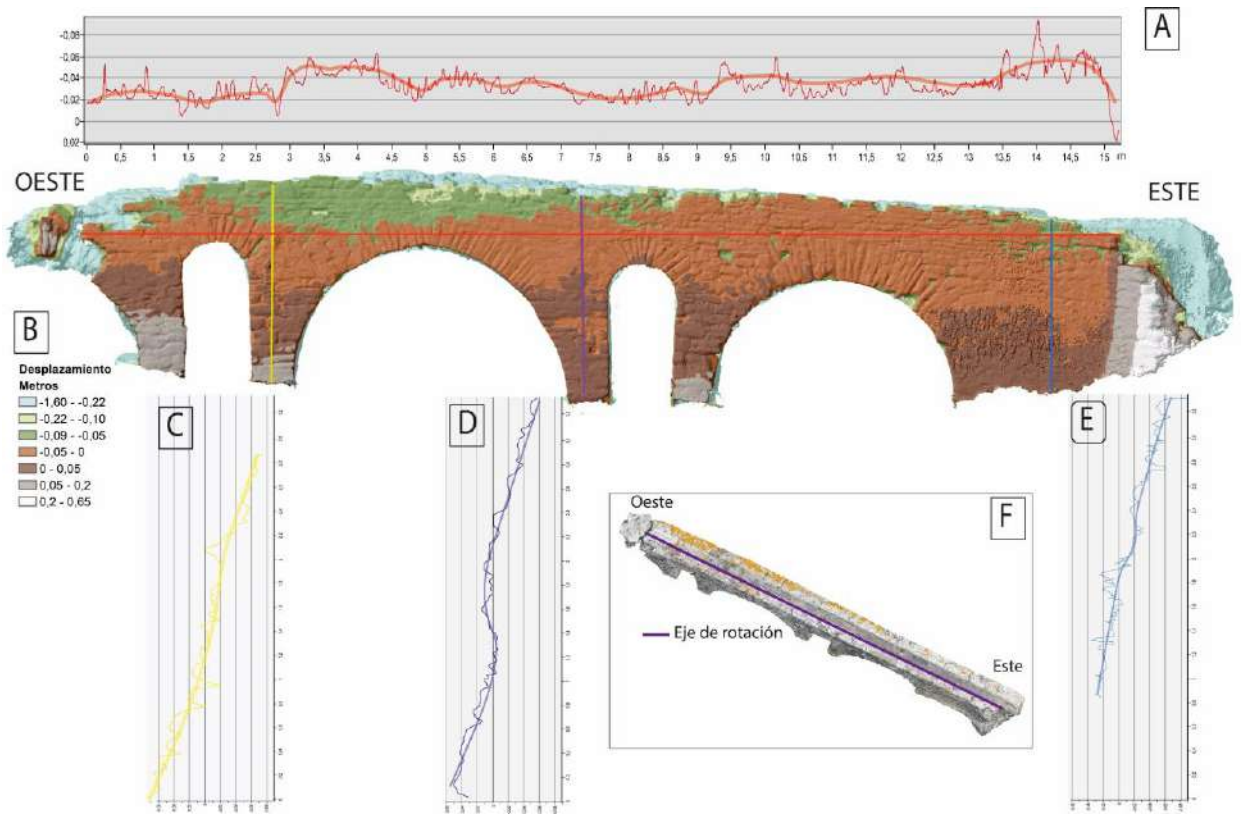


FIGURA 3: *A) Perfil topográfico longitudinal del acueducto, corresponde a la línea roja de la figura B. B) Modelo Digital de Superficies de la pared sur del acueducto. C) Perfil topográfico de la parte occidental del acueducto, corresponde a la línea amarilla de la figura B. D) Perfil topográfico de la parte central del acueducto, corresponde a la línea morada de la figura B. D) Perfil topográfico de la parte oriental del acueducto, corresponde a la línea azul de la figura B. F) Modelo digital del acueducto con la línea de rotación en el proceso del MDS.*

el modelo 3D y la cartografía se ha exportado y trabajado en ArcGIS Pro para la caracterización y cuantificación de estos efectos.

RESULTADOS

Este segmento de acueducto (orientación aprox. E-W) sufre deformación por pliegues de eje vertical y rotaciones que afectan a toda la estructura siendo más amplificado en la parte oriental, modificando la forma original (Figs. 3 y 4). En la parte central del acueducto, se puede observar que no se encuentra recto si no que sufre ondulaciones por pliegues de eje vertical. Por ejemplo, en la fachada sur, estas ondulaciones son menos acusadas en las partes del acueducto que se encuentra sobre los pilares (2mm), mientras que las zonas de los arcos poseen una desviación en la horizontal de entre 4 y 6mm. El punto más desplazado hacia el norte correspondería con la parte que se encuentra situada en la parte central del valle (Fig. 3A). También se observan que el acueducto además de deformaciones en la horizontal posee deformaciones en la vertical, teniendo desplazamientos entre 14 y 16 mm de su eje central en la ladera sur (Fig. 3B) hacia el norte. Además, se aprecia que este desplazamiento no es simétrico, sino que, en la parte inferior de pilotes, poseen un desplazamiento sentido sur de entre 6 y 7 mm, mientras la parte superior del acueducto se encuentra desplazada entre 7 y 8 mm hacia el norte. En general el acueducto se encuentra inclinado hacia el norte entre un 4 y 5% (Figs. 3C, 3D y 3F). Pero las partes más afectadas de esta sección de acueducto son los márgenes laterales. El margen occidental, posee un pliegue con una longitud de 16m, mientras que, en la margen oriental, está arrancada de su sitio arrastrada y rotada 92, 8º sentido sur, colocando el bloque en sentido de la dirección de la corriente del valle (Fig. 4B).

El margen oeste del acueducto muestra un gran pliegue, llegando alcanzar un desplazamiento de la posición original de hasta 2,27 m en la charnela, mientras que en el punto más al oeste donde está en contacto con el suelo, el acueducto se encuentra desplazado solo 0,44 m de su posición original. Los bloques principales del pliegue situados en la ladera oeste del valle presentan un arrastre generalizado sentido sur (hacia el mar) con cambio de dirección de hasta 32,6 grados sobre el eje original del acueducto (Fig. 4C). Además, se observan rotaciones de los pilares principales del acueducto en la zona central de hasta 3 grados, ampliando los ojos del acueducto en la pared norte.

CONCLUSIONES

El conjunto de deformaciones del acueducto, por su posición perpendicular respecto al valle que salva, puede perfectamente responder a daños generados por el tsunami que sufre la ciudad Romana tras el terremoto, tanto por la ola (*wash*) como son las ondulaciones en la fachada sur del acueducto, como por el retroceso del tsunami (*backwash*) como son el pliegue del margen oeste y el bloque trasladado y rotado del margen este. La localización y tipología de la deformación estaría

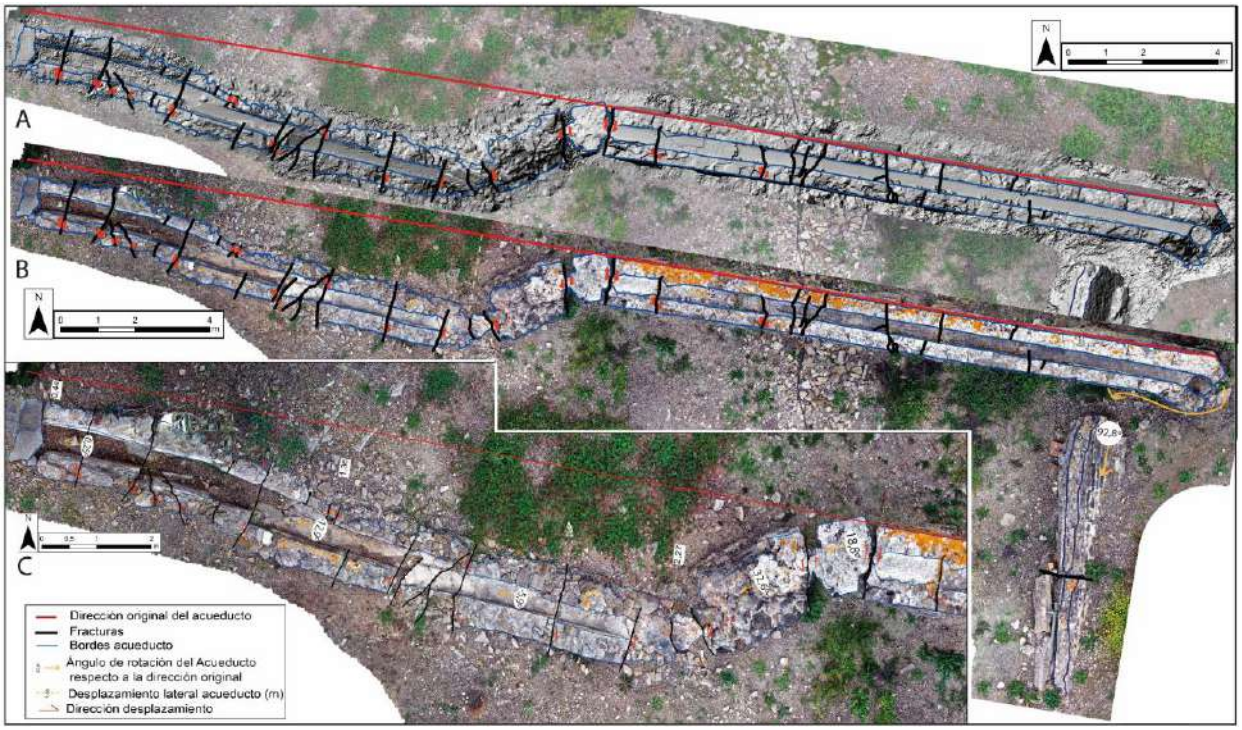


FIGURA 4. A) *Vista en planta del acueducto sobre el sombreado. B) Vista en planta del acueducto sobre la ortofotografía. C) Vista en planta ampliada del plegamiento del asiento oeste del acueducto.*

hidrodinámicamente alineada con una descarga importante de agua canalizada por el valle hacia la costa (sentido sur).

Los gemelos digitales de efectos arqueosismológicos pueden ser también utilizados como elementos didácticos, formativos y divulgativos sobre los efectos de los terremotos en el patrimonio histórico para profesionales de distintas ramas de conocimiento y público, tanto a través de las reconstrucciones virtuales como a través de la impresión digital en tres dimensiones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación I+D+i PID2021-123510OB-I00 (QTECIBERIA-USAL) del MICIN AEI/10.13039/ 501100011033/. Es una Contribución del Grupo de Trabajo sobre Tectónica Cuaternaria, Paleosismología y Arqueosismología (QTECT-AEQUA).

REFERENCIAS

Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G. (2018): Efectos sísmicos en yacimientos arequeológicos: catalogación y cuantificación arqueosismológica. *Boletín Geológico y Minero*, 129 (1/2): 451-467.

Sánchez-Sánchez, Y., Elez, J., Silva, P. G., Santos-Delgado, G., Giner-Robles, J. L., Reicherter, K. (2022): 3D Modelling of Archaeoseismic Damage in the Roman Site of Baelo Claudia (Gibraltar Arc, South Spain). *Applied Sciences*, 12(10): 5223.

Reicherter, K., Prados, F., Jiménez-Vialás, H., Jiménez, I.G., Feist, L., Val-Peón, C., Höbig, N., *et al.* (2022): The *Baelo Claudia* tsunami archive (SW Spain) En: *Historical Earthquakes, Tsunamis and Archaeology in the Iberian Peninsula* (Álvarez Martí-Aguilar y M., Machuca-Prieto, F., Eds.). Springer: Berlin/ Heidelberg, Germany, pp. 1613-9712.

Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H., Reicherter, K. (2011): A Comprehensive Classi-fication of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International*, 242: 20 - 30.

Sillières, P. (1997). *Baelo Claudia: Una ciudad Romana de la Bética.* Junta de Andalucía- Casa de Velázquez, Madrid. 237 pp.

Silva, P.G., Borja, F., Zazo, C., Goy, J.L., Bardají, T., De Luque, L., Lario J., Dabrio, C.J. (2005): Archaeoseismic record at the ancient Roman City of *Baelo Claudia* (Cádiz, south Spain). *Tectonophysics*, 408: (1-4). 129-146.

Silva, P.G., Reicherter, K., Garcia-Jiménez, I., Prados Martínez, F.; Pérez-Tarruella, J., Sánchez-Sánchez, Y. (2023): Geología y Arqueología del Terremoto-Tsunami de finales del Siglo IV d.C. que destruyó la ciudad Romana de *Baelo Claudia* (Cádiz, Sur España). *Cuaternario y Geomorfología*, 37 (3-4): 37-57.

Caracterización multitécnica de alta resolución del primer registro sedimentario continúo obtenido en el yacimiento arqueo-paleontológico del Pleistoceno inferior de Barranco León (cuenca de Guadix-Baza, Granada)

High-resolution multi-technique characterization of the first continuous sedimentary record obtained at the Early Pleistocene archaeo-palaeontological site of Barranco Leon (Guadix-Baza basin, Granada)

A. Santamaría Barragán[1], J.M. Parés[1], S. Colino García[1], A. Churruca Clemente[1], T. Fujioka[1], A. Serrano Ramos[2], A. Álvaro Gallo[1], M. del Val[1], J. Iglesias[1], J. Jáimez[2], L. Miguens[1], S. Pla Pueyo[2], J. Revilla[1], C. Saiz[1], M. Toffolo[1], J.M. Jiménez[2] y M. Duval[1]

1 Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), 09002 Burgos, España Betobaltanas@usal.es Josep.pares@cenieh.es Silvia.cuelga@gmail.com Alicia.churruca@cenieh.es Toshiyuki.fujioka@cenieh.es Ana.alvaro@cenieh.es Miren.delval@cenieh.es Javier.iglesias@cenieh.es Leticia.miguens@cenieh.es Jorgerevilla30@gmail.com Carlos.saiz@cenieh.es Michael.toffolo@cenieh.es Mathieu.duval@cenieh.es
2 Universidad de Granada, 18010 Granada, España Alexia.serrano.ramos@gmail.com Jjaimez@ugr.es Sila.pla@gmail.com

Palabras clave: Pleistoceno inferior, Barranco León, Sondeo mecánico, Formación Baza.

Resumen

Barranco León (Orce, España) documenta una de las evidencias más antiguas de presencia de homínidos en Europa occidental (Toro Moyano *et al*., 2013). En octubre de 2022, realizamos allí una perforación mecánica de dos sondeos totalizando una profundidad de 90 m. Proporcionan por primera vez un registro sedimentario continuo de los depósitos asociados a la Formación Baza en la zona de Orce. Los testigos sedimentarios se procesaron en el CENIEH mediante un enfoque combinando múltiples técnicas y análisis de alta resolución. En primer lugar, se realizaron análisis no invasivos, y continuos, de susceptibilidad magnética y de rayos gamma natural utilizando un Geotek Multi Sensor Core Logger (MSCL). A continuación, se tomaron muestras para realizar análisis de fluorescencia de rayos X, susceptibilidad magnética, contenido en carbonatos y tamaño de grano. También se llevó a cabo un estudio micromorfológico adicional de varias secciones delgadas. En conjunto, nuestros resultados permiten ofrecer una caracterización detallada y sin precedentes de los depósitos sedimentarios de la secuencia de Barranco León, proporcionando un marco litoestratigráfico robusto para futuros estudios cronológicos y paleoambientales.

Abstract

Barranco León (Orce, Spain) documents one of the oldest evidence of hominin presence in Western Europe (Toro Moyano *et al.,* 2013). In October 2022, we carried out a mechanical drilling to obtain two boreholes totaling a depth of 90 m, providing for the first time a continuous sedimentary record of the deposits associated to the Baza Formation in the Orce area. Sediment cores were processed at CENIEH, Spain, through a high-resolution multi-technique approach. Non-invasive, continuous, magnetic susceptibility and natural gamma-ray analyses were first carried out using a Geotek Multi Sensor Core Logger (MSCL). Discrete sampling was then carried out for X-ray fluorescence, magnetic susceptibility, carbonate content and grain size analyses. An additional micromorphological study of various thin sections from selected deposits was also carried out. Overall, our results provide an unprecedented, detailed characterization of the sedimentary deposits of the Barranco León sequence, offering a robust stratigraphic framework for future chronological and paleoenvironmental studies.

Referencias

Toro-Moyano, I. Martínez-Navarro, B., Agustí, J., *et al.* (2013). The oldest human fossil in Europe, from Orce (Spain). *Journal of Human Evolution* 65, 1-9.

Evaluación de la dieta de *Toxodon* (Mammalia, Notoungulata) en el Pleistoceno de Argentina

Diet evaluation of Toxodon (Mammalia, Notoungulata) in the Pleistocene of Argentina

D. Sanz-Pérez[1,2], R. L. Tomassini[3], C. I. Montalvo[4], A. E. Zurita[5], M. Hernández Fernández[1,2], L. Domingo[1,6]

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid 28040 Madrid (España). dasanz01@ucm.es, hdezfdez@ucm.es, lauradomingo@geo.ucm.es
2 Dpto. Geología Sedimentaria y Cambio Medioambiental, Instituto de Geociencias (CSIC, UCM) 28040 Madrid (España).
3 Instituto Geológico del Sur, Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET 8000 Bahía Blanca (Argentina). rodrigo.tomassini@yahoo.com.ar
4 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa 6300 Santa Rosa (Argentina). cmontalvolp@yahoo.com.ar
5 Laboratorio de Evolución de Vertebrados y Ambientes Cenozoicos-Centro de Ecología Aplicada del Litoral (UNNE-CONICET) 3400 Corrientes (Argentina). aezurita74@yahoo.com.ar
6 Earth and Planetary Sciences Department, University of California Santa Cruz, 95064 Santa Cruz (Estados Unidos).

Palabras clave: isotopos estables, Sudamérica, Cuaternario, esmalte dental, paleoecología

Resumen

El orden Notoungulata fue el grupo más diverso y abundante de ungulados sudamericanos durante el Cenozoico, y un taxon bien representado es *Toxodon*. Datos isotópicos previos indican que *Toxodon* fue un herbívoro generalista con una alta plasticidad ecológica. En este trabajo evaluamos la relación isotópica del carbono ($\delta^{13}C$) de 40 muestras de esmalte dental de *Toxodon* de las regiones Central (Buenos Aires y La Pampa; MIS 5 y MIS 2) y Noreste de Argentina (Corrientes y Formosa; MIS 3 y MIS 2) para reconstruir su dieta y hábitat. Los valores mostraron diferencias significativas en la dieta de *Toxodon* entre ambas regiones. Mientras que en la región Central se registraron dietas mixtas C_3-C_4 (-8,2 a -2,4‰), en el Noreste los datos oscilaron entre valores correspondientes a una dieta mixta generalista y los propios de una alimentación centrada en el consumo de plantas C_4 (-6,0 a 1,3 ‰). Además de esas diferencias vinculadas con los ambientes desarrollados en distintas latitudes de Argentina, en la región Central se identificaron valores disimiles en la dieta de *Toxodon* entre fases glaciares e interglaciares, con mayor preponderancia de ingesta de plantas C_4 en las primeras. Por el contrario, estas diferencias no se registraron en el Noreste. Estos resultados apoyan la hipótesis de que los representantes de *Toxodon* tenían la capacidad de alimentarse de una amplia variedad de vegetación, adaptándose a cambios ambientales y ecosistemas regionales de manera que sus dietas estarían relacionadas con la vegetación local dominante.

Abstract

The order Notoungulata was the most diverse and abundant group of South American ungulates during the Cenozoic, and a well-represented taxon is *Toxodon*. Previous isotopic data indicate *Toxodon* was a generalist herbivore with high ecological plasticity. In this work we evaluated the carbon isotope ratio ($\delta^{13}C$) of 40 tooth enamel samples of *Toxodon* from the Central (Buenos Aires y La Pampa; MIS 5 and MIS 2) and Northeastern regions of Argentina (Corrientes y Formosa; MIS 3 and MIS 2) to reconstruct their diet and habitat. The values showed significant differences in the diet of *Toxodon* between both regions. While in the Central region mixed C_3-C_4 diets were recorded (-8.2 to -2.4‰), in the Northeast the data ranged between values corresponding to a generalist mixed-feeder diet and specialized C_4 grazers (-6.0 to 1.3 ‰). In addition to these differences linked to the environments developed in different latitudes of Argentina, in the Central region differences in *Toxodon* diet were identified between glacial and interglacial phases, with a greater preponderance of C_4 plant ingestion in the first ones. On the contrary, these differences were not recorded in the Northeast. These results support the hypothesis that *Toxodon* representatives had the ability to feed on a wide variety of vegetation, adapting to environmental changes and regional ecosystems so that their diets would be related to the dominant local vegetation.

Caracterización y procedencia del sílex del yacimiento arqueológico de Los Aljezares, Pleistoceno Superior (SE España)

Flint characterization and provenance from the archeological site of Los Aljezares, Upper Pleistocene (SE Spain)

S. Savall[1], N. Méndez[2,3], J. Cuevas-González[3], D. Díez-Canseco[3] y A. Eixea[2]

1 Centro UCM-ISCIII de Evolución y Comportamiento Humanos 28029 Madrid.
2 Dpto. Prehistoria, Arqueología e Historia antigua, Universidad de Valencia 46010 Valencia.
3 Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante 03690 San Vicente del Raspeig.

Palabras clave: sílex, procedencia, geoarqueología, Pleistoceno, Los Aljezares

Resumen

El yacimiento arqueológico de Los Aljezares está localizado en la cuenca del río Vinalopó, en una región en la que el río atraviesa los relieves del Prebético y de las Cuencas Neógenas (Mioceno-Plioceno) del SE de España. Se trata de un yacimiento arqueológico al aire libre dónde se han hallado más de 350 piezas de sílex antrópicas, formadas tanto por restos de talla como de útiles obtenidos mediante técnicas discoide y, en menor medida, Levallois atribuidas a poblaciones neandertales pertenecientes al Paleolítico medio. El yacimiento se localiza en conglomerados del Pleistoceno Superior con abundantes cantos de sílex que, junto con tobas, lutitas y areniscas, forman parte de una serie fluvio-lacustre de la cuenca pleistocena de los Aljezares, hoy parcialmente desmantelada por el río Vinalopó. En este trabajo, se han estudiado muestras arqueológicas extraídas del yacimiento y cantos de sílex de los depósitos pleistocenos y miocenos circundantes. Se han identificado seis tipologías basadas en el color, que aparecen en los tres conjuntos de piezas (arqueológicas, depósitos pleistocenos y depósitos miocenos). Las diferencias de proporciones relativas de las distintas tipologías entre los conjuntos sugieren que: 1) la procedencia de los sílex incorporados a los depósitos pleistocenos se localiza en la parte alta de la serie miocena estudiada (unidad Conglomerados del Tabayá), dónde se han hallado varios niveles de conglomerados con sílex de las seis tipologías y; 2) los grupos neandertales seleccionarían intencionalmente determinadas tipologías de sílex para confeccionar sus herramientas.

Abstract

Los Aljezares archeological site is located in the Vinalopó river basin, in a region in which the river erodes the reliefs of the Prebetic and the Neogene Basins (Miocene-Pliocene) of the SE Spain. It is an open-air archaeological site where more than 350 pieces of anthropic flint have been collected, consisting of both cutting rests and tools associated to discoid techniques, and Levallois to a lesser extent, attributed to Neanderthal populations from Middle Paleolithic. The site is located in Upper Pleistocene conglomerates with abundant flint pebbles that together with tufas, lutites and sandstones, form part of a fluvio-lacustrine section of the Aljezares Pleistocene basin, partially eroded by the Vinalopó River. In this work, archaeological samples from the site and flint pebbles from the surrounding Pleistocene and Miocene deposits have been studied. Based on color, six typologies have been identified, which appear in the three sets of pieces (archaeological, Pleistocene deposits and Miocene deposits). The differences in the three sets between the relative amount of typologies suggest that: 1) the provenance of the flint within Pleistocene deposits would be the top of the Miocene section studied (Conglomerates of Tabayá unit) where various conglomerate levels with the six typologies have been found and; 2) Neanderthal communities would intentionally select particular typologies of flint to make their tools.

Tectónica Cuaternaria en el Valle del Tajuña (Cuenca de Madrid, España): Aspectos Geológicos y Geomorfológicos.

Quaternary Tectonics in the Tajuña Valley (Madrid Basin, Central Spain): Geological and Geomorphological markers.

P.G. Silva[1], M.A. Rodríguez-Pascua[2], M.A. Perucha[2], A. Medialdea[3], Y. Sánchez-Sánchez[1], J. Elez[1] M.J. Muñoz Hernández[1], E. Roquero[4]

1 Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Ávila-Salamanca. España. pgsilva@usal.es, j.elez@usal.es, yolanda.ss@usal.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). C/Ríos Rosas 23, Madrid, 28003. España. ma.rodriguez@igme.es, ma.perucha@igme.es
3 Lab. Luminiscencia. Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH), Burgos, España. alicia.medialdea@cenieh.es
4 Departamento de Edafología, E.T.S.I. Agrónomo, Universidad Politécnica Madrid, 28040 Madrid, España. elvira.roquero@upm.es

Resumen: El presente trabajo analiza la tectónica cuaternaria del Valle del Tajuña (Madrid) haciendo hincapié en el ensamblaje geomorfológico de superposición/solapamiento de los niveles de terraza más modernos (+8, +10 y +12m), y las características de los Escarpes en yesos (fallas) de unos 60 m de altura que los enmarcan. El análisis se completa con la datación OSL preliminar de los niveles de terraza deformados. Todos los datos apuntan a que esta zona es la más activa del interior de la Cuenca de Madrid, presentando una actividad sísmica y tectónica compatible con el colapso de la gran flexura litosférica NE_SO que atraviesa la cuenca.

Palabras clave: Tectónica Cuaternaria, Escarpes en yesos, Karst aluvial, Geocronología, Valle del Tajuña

Abstract: *This paper analyses the Quaternary tectonics of the Tajuña Valley (Madrid) focusing on the geomorphological assemblage of onlapping/overlapping of the most modern terrace levels (+8, +10 and +12m), and the features of the 60 m high gypsum escarpments (i.e. vertical faults) that enclose them. The analysis is completed with preliminary OSL dating of these deformed terrace levels. All data suggest that this area is the most active in the interior of the Madrid basin, presenting a seismotectonic compatible with the collapse of the great NE_SW lithospheric flexure that traverses the basin.*

Key words: *Quaternary tectonics, Gypsum Esccarpments, Alluvial karst, Geochronology, Tajuña Valley*

MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

El Valle del Tajuña, tributario del Río Jarama por su margen izquierda, se sitúa en la zona central de la Cuenca Neógena de Madrid. Posee una dirección general NE-SO, subparalela a la de los ríos Tajo (al Sur) y Henares (al Norte) así como al límite meridional del Sistema Central, que desvela el gran control estructural de las direcciones de drenaje en esta Cuenca (Silva et al., 1988a). El Tajuña se encuentra encajado en la superficie divisoria de los ríos Henares y Tajo materializada en los afloramientos centrales de la Caliza del Páramo que dan lugar a las denominadas mesas de la Alcarria al norte y de Chichón al sur (Fig. 1). Más al sur de estos afloramientos se encontraría la denominada Mesa de Ocaña que enlazaría con los afloramientos de estas calizas lacustres en la Llanura Manchega. El techo de estas calizas finimiocenas y rellenos pliocenos asociados conforman la denominada *"Superficie del Páramo"* la cual presenta regionalmente un abombamiento NNO-SSE subparalelo al Sistema Central sobre cuyo eje se encaja o colapsa el valle del Tajuña (Silva et al., 2018a; De Vicente et al., 2007; Giner et al., 2012). El Tajuña constituye el sistema fluvial de instalación más reciente en la zona central de la Cuenca de Madrid encajándose en la terraza de +60 m del rio Jarama en el entorno de Titulcia (Silva et al., 1988b). Esta terraza se registra en las inmediaciones de esta población y colgada sobre los escarpes en yesos que delimitan el valle en toda su extensión.

Datos geocronológicos y paleomagnéticos regionales indican que este nivel de terraza registra la inversión magnética Matuyama-Brunhes, es decir el tránsito Pleistoceno Inferior-Medio (Pérez-González et al., 2013; Silva et al., 2017). Así pues, el colapso generalizado que acompaña el encajamiento e instalación definitiva del valle del Tajuña, se puede situar poco después del mencionado tránsito, ya entrado el Pleistoceno Medio. Retazos de esta terraza colgada del Jarama están constituidos mayoritariamente por gravas de cuarcita procedentes del Sistema Central y contrastan notablemente con los depósitos del Tajuña constituidos fundamentalmente por gravas calcáreas muy cementadas de procedencia Cordillera Ibérica (Silva et al., 1988b).

No obstante, en estas zonas los elementos geomorfológicos dominantes son las amplias vertientes de sustitución tipo glacis que articulan el encajonado Valle del Tajuña con la *Superfície del Páramo*. Estas vertientes de sustitución delinean amplias vallonadas de morfología en artesa de hasta 7 km de anchura, sobre las que se encaja el actual valle del Tajuña de unos 2,5 km de anchura. De hecho, el Valle del Tajuña representa el colapso de la charnela de radio kilométrico que afecta al

conjunto del relleno sedimentario de la Cuenca (Fig. 1) y que es reflejo de la flexura litosférica al Sur del Sistema Central que ha controlado la evolución paleogeográfica y sedimentaria de la Cuenca de Madrid a lo largo del Mioceno (De Vicente et al., 2007). La flexura litosférica controla los sistemas de fallas cuaternarias y tectónica activa y la sismicidad en el conjunto de la Cuenca (Giner-Robles et al., 2012). En este trabajo se presentan datos geomorfológicos y geocronológicos preliminares que permiten caracterizar la actividad tectónica cuaternaria a lo largo del Valle del Tajuña y su relación con los procesos de karstificación y halocinesis con las facies evaporíticas miocenas.

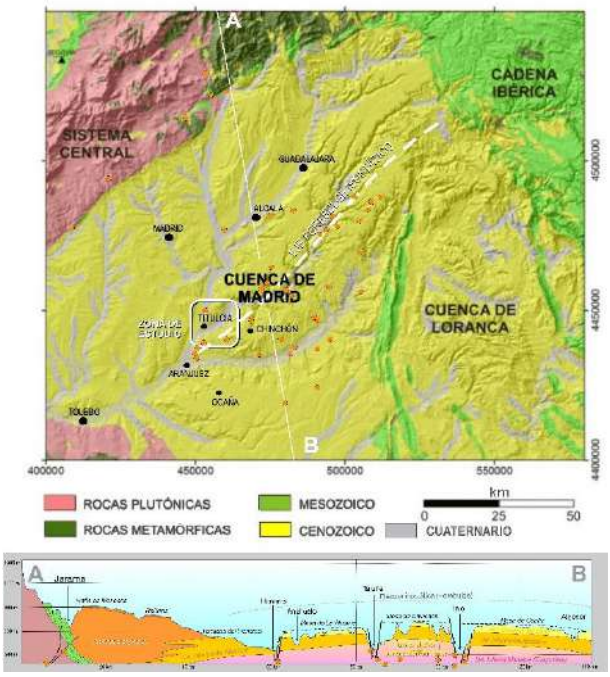


FIGURA 1. *Esquema geológico simplificado de la Cuenca de Madrid mostrando la ubicación de la zona de estudio y sismicidad instrumental más importante (círculos). Abajo: corte geológico esquemático de la disposición de las unidades miocenas y valles cuaternarios en relación a la flexura litosférica o forebulge isostático del Sistema Central.*

GEOMORFOLOGÍA

El análisis realizado en este trabajo se centra en la zona de confluencia del Valle del Tajuña con el del Jarama. Los marcadores geomorfológicos indicadores de actividad tectónica se agrupan en los siguientes conjuntos: **(1)** dispositivo de superposición y solapamiento de los sistemas de terraza más recientes (≤ +20 m) que ocupan el valle actual; **(2)** deformaciones sinsedimentarias en estos niveles fluviales; **(3)** Escarpes en yesos y anomalías geomorfológicas ligadas a procesos de colapso y deformación abruptos; **(4)** deformaciones activas y anomalías en la llanura de inundación actual.

(1) Terrazas. En el interior del valle, las terrazas más recientes se encuentran a + 20 m (T1), +15m (T2), +12m (T3), + 10m (T4), +7-8m (T5) más dos niveles anómalamente escalonados de llanura de inundación que se encuentran a +5m y +2-3m sobre la llanura de inundación del Jaráma. Todos los niveles se encuentran solapados y en su mayoría engrosados y superpuestos resultando en potencias vistas de hasta 8 m. Todos los niveles se desarrollan sobre las facies evaporíticas (yesos sacaroideos y arcillas yesíferas) de la Unidad inferior Miocena. En el vecino Jarama estas terrazas bajas pueden alcanzar hasta los 20 m de potencia. En el Tajuña la terraza de +20 m aparece fuertemente cementada, fracturada y en su mayoría troceada y colapsada en grandes bloques de decenas de metros a lo largo de la margen derecha del Tajuña en el entorno de Titulcia (Rubio y Silva, 2010). En el Jarama los depósitos basales de la terraza de + 15-20 m han librado fauna de *Elephas antiquus* lo que le relaciona con las terrazas engrosadas complejas del Jarama (Arganda TCB) y Manzanares (Arriaga-Prerresa TZM) con industria fundamentalmente achelense situada a +18-20 m. Múltiples dataciones TL, OSL, ESR y AAR en estas terrazas complejas de la región de Madrid sitúan sus niveles basales en el MIS 9 – MIS 8 (ca. 200 a 300 ka; Silva et al., 2013; Moreno *et al*., 2019¸Panera et al., 2019). No obstante, los niveles superiores de estas terrazas engrosadas, similares a las que aparecen en el Tajuña pueden alcanzar el MIS 5 e incluso MIS4 (Moreno et al., 2019). Todas las terrazas del Tajuña se encajan en el nivel de +15-20 m del Jarama y por tanto deben presentar cronologías más modernas asimilables como máximo al MIS5. Dentro del Valle las terrazas más desarrolladas corresponden a las de + 12 y +10 m las cuales se encuentran solapadas o incluso superpuestas. Los afloramientos de estas terrazas en la margen izquierda del valle presentan numerosas deformaciones presentando fallas normales y plegamientos muy laxos.

(2) Deformaciones Sinsedimentarias. Estas son evidentes en los afloramientos de las terrazas de +12 y +10 m. Las deformaciones y ondulaciones de las superficies que presentan estas terrazas pueden interpretarse como consecuencia de fenómenos de fracturación subparalelos a los escarpes en yesos asistidos por procesos de subsidencia y disolución kárstica en las facies evaporíticas subyacentes. Fallas y flexuras se disponen en dirección ENE-OSO a NE-SO. Las fallas por lo general poseen saltos inferiores a un metro y desarrollan pequeños pliegues de arrastre produciendo ligeras reordenaciones en las gravas afectadas (Fig. 2). Los surcos generados por las flexuras están rellenos de limos y arcillas suavemente combados por fenómenos de subsidencia kárstica (colapsos y *sagging*) en los yesos infrayacentes. En ocasiones los limos poseen un contenido en materia orgánica muy importante con gasterópodos y rizolitos y concreciones calcáreas (Fig. 3). Estos depósitos responden a zonas subsidentes dentro de las antiguas llanuras de inundación y a depósitos palustres (limos oscuros) constituyen a facies de lagunas. Las laxas deformaciones acompañantes indican que se trataría de pequeñas dolinas de hundimiento o subsidencia consecuencia de un karst aluvial cubierto en los yesos miocenos infrayacentes. Estas deformaciones sinsedimentarias crean complejos ensamblajes de superposición y solapamiento de las distintas unidades sedimentarias que conforman las terrazas de +8, +10 y +12 m (Fig. 3). En todos los casos las directrices estructurales de fallas, pliegues y flexuras que afectan a los materiales fluviales



FIGURA 2. Detalle de las deformaciones sinsedimentarias en la terraza de +10 m del Tajuña en las proximidades de Titulcia durante su muestreo para datación OSL.

son subparalelas a las grandes líneas de falla (NE-SO) que condicionan los escarpes en yesos que enmarcan los valles. En ocasiones los fenómenos de subsidencia son tan acusados que los niveles más antiguos pueden presentar altimetrías relativas inferiores a los más modernos, como ocurre en la margen izquierda del Tajuña. Estos procesos kársticos continúan activos en la actualidad. Multitud de dolinas aluviales de importantes dimensiones que se sitúan a lo largo del pie de los escarpes en yesos de la margen izquierda del valle entre Titulcia y Morata de Tajuña. La más importante de estas depresiones es la Laguna de San Juan que actualmente presenta una zona lagunar activa, dando cuenta de la actividad presente de los procesos de disolución en el karst aluvial cubierto de los yesos miocenos infrayacentes.

(3) Escarpes en Yesos. Estos son una característica casi exclusiva de la zona central de la Cuenca de Madrid, donde los valles del Jarama, Manzanares, Tajo y Tajuña se encuentran delimitados por estos en prácticamente todo su recorrido (Silva et al., 1988a). Estos poseen longitud kilométrica y presentan desniveles de entre 80 y 60 m, quedando colgadas las terrazas más altas (≥ 60 m) sobre ellos. En el caso del Tajuña solo en el sector de desembocadura aparecen terrazas colgadas, pero se tratan de las terrazas altas del Jarama. Aguas arriba los únicos depósitos son los amplios glacis de sustitución que articulan los escarpes con la "Superficie del Páramo" de las Mesas de La Alcarria y Ocaña (Fig. 1). En la zona de estudio el valle es netamente asimétrico presentando los escarpes en yesos a lo largo de la margen izquierda (Sur del Valle). En estos escarpes subverticales se registra todo un elenco de formas tectónicas, gravitacionales y kársticas que atestiguan la peligrosa dinámica actual de los mismos.

Sobre estos escarpes los tributarios de mayor recorrido conforman desembocaduras en forma de "cuello de botella", mientras que los de menor recorrido que dan completamente colgados (*perched*) sobre los escarpes (Fig. 4). También son características la formación de facetas triangulares de falla que denotan su origen tectónico ya que se encuentran afectando a los yesos sacaroideos subhorizontales de la Unidad Inferior Miocena (Fig. 1). Las líneas de fractura subverticales son comunes a lo largo de los escarpes y a favor de ellas se producen importantes fenómenos de vuelco y desplome. Estos procesos conforman una importante franja coluvial al pie de los escarpes que incluyen gigantescos bloques de yesos de decenas de metros y centenas de m^3, que podrían clasificarse como *"mega-colluvial wedges"* asociadas a las fallas que definen los escarpes (Fig. 4). A pesar del importante desarrollo de estas formaciones todavía se observa la parte superior del escarpe libre (*free-face*) de estas fallas, lo que nos indica el carácter activo de los procesos de elevación y subsidencia diferencial ligada a estos escarpes.

Los escarpes no son un elemento lineal único, sino que conforman una especie de zona de falla, de hasta 120 m de anchura, definida por múltiples líneas de fractura y/o /fallas a veces anastomosadas. A favor de esta zona de falla en la parte superior de los escarpes (bloque levantado) se producen importantes procesos de karstificación siendo importante la presencia de dolinas y uvalas alargadas a favor de la zona de falla. Localmente las dolinas son de colapso, presentando depresiones abiertas de 15-20 m de diámetro y hasta 30 m de profundidad. En la zona estudiada el escarpe de la margen izquierda del Tajuña tiene una longitud lineal de aproximadamente 22 km, pero de forma segmentada se continua bastante más al norte de Morata de Tajuña completando prácticamente 75 km lineales.

Mientras las facetas triangulares, los valles colgados y los escarpes libres se relacionan con el proceso abrupto que dio génesis a estos escarpes durante el Pleistoceno

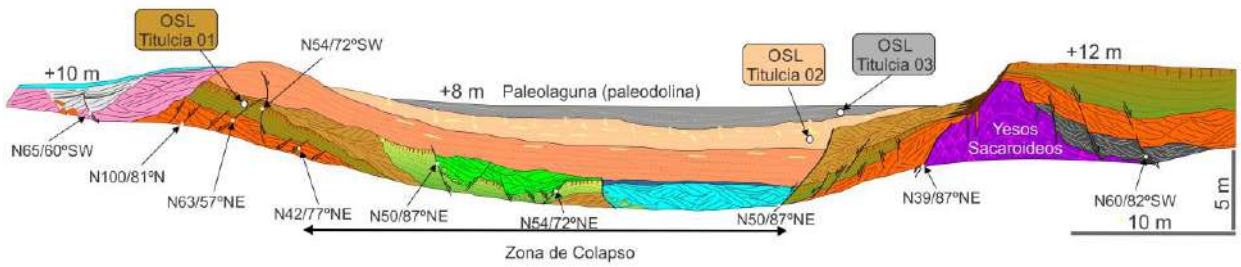


FIGURA 3. Ensamblaje geomorfológico de las diferentes unidades sedimentarias que conforman los niveles de +8, +10 y +12 m del Rio Tajuña en su zona de confluencia con el Jarama en las antiguas canteras de la margen izquierda del valle en los alrededores de Titulcia. Se indica la posición relativa de las muestras OSL y direcciones y buzamientos de las fallas más significativas.



FIGURA 4. Vista aérea (Dron) de la zona de falla que define los escarpes en yesos de la margen izquierda del Tajuña en el entorno del Espacio Natural Protegido de la Laguna de San Juan (Chinchón). En la vista también se observa la parte superior del escarpe libre de la línea de fractura y las importantes formaciones coluvionares que se generan a su pie.

Superior. Los procesos kársticos y de vertiente están relacionados con la erosión y degradación de estos. A pesar de ello los escarpes mantienen una linealidad muy relevante con índices de sinuosidad (Smf) en torno a 1,09 y ratios de anchura/altura de Valle (Vf) ≤ 0,1, todos ellos indicativos de tectónica activa. Las ratios Vf se han obtenido mediante digitalización de la red de drenaje en 16 arroyos del sector estudiado (Muñoz Hernández, 2021). Estos importantes escarpes coinciden con la localización de la sismicidad instrumental más importante en el interior de la Cuenca de Madrid en la que los mecanismos focales de los eventos más someros (< 10 km profundidad) poseen mecanismo de falla normal (Giner-Robles et al., 2012). Estos datos indican que no se trata meramente de fenómenos gravitacionales, sino que su origen presenta un enraizamiento más profundo relacionado con la importante flexura litosférica NE-SO que abomba el conjunto de unidades miocenos y superficies geomorfológicas del interior de esta cuenca (Fig. 1).

GEOCRONOLOGÍA

Para el presente trabajo se han muestreado los niveles solapados de +10 y +8 m del Tajuña en fin de proveer datos numéricos geocronológicos. Las muestras están actualmente en proceso de datación por Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL) en los laboratorios del CENIEH. Su localización y posición relativa respecto a las unidades sedimentarias de las terrazas bajas del Tajuña se puede observar en las figuras 2 y 3. Datos regionales indican que las edades estarían entorno al MIS5-MIS4 (c. 100 – 40 ka)

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto de investigación I+D+i PID2021-123510OB-I00 (USAL) del MICIN AEI/10.13039/501100011033/

REFERENCIAS

De Vicente, G., Vegas, R., Muñoz-Martín, A., Silva, P.G., Andriessen, P., Cloetingh, S., González-Casado, J.M., Van Wees, J.D., Álvarez, J., Carbó, A. y Olaiz, A. (2007): Cenozoic thick-skinned and topography evolution of the Spanish Central System. *Global and Planetary Change* 58: 335–381.

Giner-Robles, J. L., Pérez López, R., Silva, P. G., Jiménez Díaz, A. y Rodríguez Pascua, M. A. (2012): Recent tectonic model for the Upper Tagus Basin (central Spain). *Jour. Iberian Geology.* 38: 113-126.

Moren, D., Duval., M., Rubio-Jara, S., Panera, J., Bahain, J.J., Shao, Q., Pérez-González, A. y Falgueres, C. (2019): ESR dating of Middle Pleistocene archaeo-paleontological sites from the Manzanares and Jarama river valleys (Madrid basin, Spain). *Quaternary International*, 520: 23-38.

Muñoz Hernández (2021): *Geomorfología Tectónica del Valle del Tajuña (Cuenca de Madrid, España)*. TFM Geología, USAL. 47 pp.

Panera, J., Rubio-Jara, S., Pérez-González y A. Eds. (2019): A fundamental archive for the European Pleistocene: The Manzanares and Jarama valleys (Madrid, Spain). *Quaternary International*, 520: 109.

Pérez-González, A., Gallardo, J.L., Uribelarrea, D., Panera, J. y Rubio-Jara, S. (2013). La inversión Matuyama-Brunhes en la secuencia de terrazas del río Jarama entre Velilla de San Antonio y Mejorada, al SE de Madrid (España). *Estudios Geol.* 69: 35–46.

Silva, P. G., Goy, J. L. y Zazo, C. (1988a): Neotectónica del sector centro-meridional de la Cuenca de Madrid. *Estudios Geológicos*, 44: 415 – 427.

Silva, P. G., Goy, J. L. y Zazo, C. (1988b): Evolución geomorfológica de la confluencia de los ríos Jarama y Tajuña durante el Cuaternario (Cuenca de Madrid, España). *Cuaternario y Geomorfología*, 2(1-4): 125-133.

Silva, P.G., López-Recio, M., Tapias, F., Roquero, E., Morín, J., Rus, I., Carrasco, P., Rodríguez Pascua, M.A. y Pérez-López, R., (2013): Stratigraphy of the Arriaga Palaeolithic settlements in the lower Manzanares valley (Madrid, Spain). *Geomorphology* 196: 138-161.

Silva, P.G., Roquero, E., López-Recio, M., Huerta, P. y Martínez-Grana, A. (2017): Chronology of fluvial terrace sequences for large Atlantic rivers in the Iberian Peninsula (Tagus and Duero basins, Central Spain). *Quaternary Science Reviews*, 166: 188-203.

Rubio, F. y Silva P.G. (2010). *Mapa Geológico de España 1:50.00. hoja nº 605 (Aranjuez).* Cartografía y Memoria Geomorfológica. IGME, Madrid.

Estructura tumular de La Llana de Hereña (Álava, País Vasco): ¿Antrópica o natural?

Tumulus structure of La Llana de Hereña (Álava, Basque Country): Anthropic or natural?

A. Tarriño[1,2,3], I. Martín-Martín[1,2,3*], L. Eguíluz[2,3,4], A. Bandrés[5], A. Lopetegi[6], A. Casas-Sainz[7], O. Pueyo[8], J.A. Mujika[1,3], J.J. Esteban[4], R. Jiménez-San Pedro[5] y A. Pocoví[7]

1 Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), C/ Tomás y Valiente s/n, 01006 Vitoria-Gasteiz. *i.martin@ehu.eus; antonio.tarrinno@ehu.eus; joseantonio.mugica@ehu.eus
2 Servicio de Cartografía Temática y SIG (SGIKER), Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Avda. Miguel de Unamuno, 3, 01006 Vitoria-Gasteiz.
3 Grupo Consolidado de Investigación en Prehistoria GIZAPRE (IT1435-22).
4 Departamento de Geología, Universidad del País Vasco (UPV-EHU), Paseo de las Universidades, 7, 01006 Vitoria-Gasteiz. luis.eguiluz@ehu.eus; jj.esteban@ehu.eus
5 TUV SUD IBERIA SAU, C/ Las Balsas, 22, 26009 Logroño. alberto.bandres@tuvsud.com; rut.jimenez@tuvsud.com
6 Departamento de Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), C/ Nieves Cano 12. 01006, Vitoria-Gasteiz. ane.lopetegui@ehu.eus
7 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza (UNIZAR), C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. acasas@unizar.es; apocovi@unizar.es
8 Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de Zaragoza (UNIZAR), C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. opueyo@unizar.es

Palabras clave: Túmulo, Prospección, Georadar, Tomografía de resistividad eléctrica, Microgravimetría.

Resumen

El "túmulo" de La Llana de Hereña es una estructura de 90 metros de diámetro y 9,2 metros de altura que ocupa una superficie de unos 6.000 m^2. Se sitúa entre las pedanías de Caicedo Sopeña y Hereña (Ribera Alta, Álava). Tiene una forma circular con un pasillo perimetral que lo hace resaltar en el terreno de un modo singular como correspondería a una morfología generada antrópicamente. Llama la atención que las curvas de nivel del túmulo dibujan arcos de círculos concéntricos perfectos, coronado por una superficie perfectamente plana de unos 300 m^2. Se han realizado prospecciones geofísicas (georradar, tomografía de resistividad eléctrica, microgravimetría) y arqueológicas (prospección superficial y magnética, sondeos manuales y retroexcavadora) con los que, a pesar de no haber encontrado restos arqueológicos de cultura material, tras su análisis geológico, estratigráfico, geomorfológico, geofísico y geométrico, podemos deducir que se trata de una estructura retocada/modelada por la acción humana. Para confirmar definitivamente su carácter, su funcionalidad y cronología, se va a datar una capa de relleno identificada en todos los sondeos que recubre toda la estructura, entre el suelo edáfico actual y un antiguo horizonte C truncado, que hemos interpretado como antrópico por ser heterométrico, anguloso o brechoide, desestructurado y matriz-soportado.

Abstract

The "tumulus" of La Llana de Hereña is a structure of 90 meters in diameter and 9.2 meters in height that occupies an area of about 6,000 m^2. It is located between the villages of Caicedo Sopeña and Hereña (Ribera Alta, Álava). It has a circular shape with a perimeter corridor that makes it stand out in the terrain in a singular way, as would correspond to an anthropically generated morphology. It is remarkable that the contour lines of the mound draw arcs of perfect concentric circles, crowned by a perfectly flat surface of about 300 m^2. Geophysical (georadar, electrical resistivity tomography, microgravimetry) and archaeological (surface and magnetic prospecting, manual probing and backhoe) surveys have been carried out. Although no archaeological remains of material culture have been found, after its geological, stratigraphic, geomorphological, geophysical and geometrical analysis we can deduce that it is a structure retouched/modeled by human action. To definitively confirm its character, functionality and chronology, we will date a suspect artificial fill identified all around the entire structure located between the natural topsoil and an old truncated C horizon that we have interpreted as anthropic because it is heterometric and brecciated (or angular) nature, unstructured matrix and mud-supported fabric.

El sondeo de La Vega Lagunera (Tenerife, Islas Canarias): un nuevo registro paleoambiental y paleoclimático de > 400 ka.

A new > 400 ka paleoenvironmental and paleoclimate record from Tenerife Island (Canary Archipelago).

B. Valero-Garces[1], I. Armenteros-Armenteros[2], M.C. Martín-Luis[3], R. Casillas Ruiz[3] y M. Jambrina-Enríquez[3]

1. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), 50059, Zaragoza. blas@ipe.csic.es
2. Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca. ilde@usal.es
3. Dpto. de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, Tenerife. mjambrin@ull.edu.es, mcmartin@ull.edu.es, rcasilla@ull.edu.es

Palabras clave: Paleoclima, Islas Canarias, La Laguna, Pleistoceno, sedimentación lacustre.

Resumen

Un nuevo sondeo en La Vega Lagunera (La Laguna, Tenerife) de más de 40 m de profundidad ha proporcionado la secuencia lacustre más antigua de las Islas Canarias. La Vega Lagunera es un valle de orientación NE-SW, formado por la erosión fluvial de los basaltos mio-pliocenos del macizo de Anaga y bloqueado por lavas del Plioceno tardío y Pleistoceno emitidas desde la dorsal volcánica NE de la isla. Las tasas de sedimentación preliminares basadas en dataciones OSL en sondeos previos sugieren una fecha basal > 400 ka y un registro Holoceno de 9 m de longitud. Las litofacies dominantes son lutitas arenosas (15-13% de granos volcanoclásticos) masivas con colores de oxidación (marrones). Los resultados preliminares incluyendo sedimentología, scanner de FRX y propiedades magnéticas, identifican un lago poco profundo clástico durante el Pleistoceno, con una ciclicidad a escala milenaria, una transición rápida al Holoceno y una sedimentación lacustre poco profunda dominante desde mediados del Holoceno. Nuevas dataciones (OSL, ^{14}C) permitirán caracterizar los patrones de ciclicidad observados y asociarlos a la evolución paleoclimática glacial/interglacial de estas islas oceánicas y el papel relativo de los patrones atmosféricos y oceánicos subtropicales y de latitudes medias. Esta investigación se incluye en el proyecto CCR-CAN (TED2021-129695A-I00) apoyado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y NextGenerationEU/ PRTR.

Abstract

A new core from Vega Lagunera (La Laguna, Tenerife) has provided the longest (> 40 m) and oldest lacustrine sequence in the Canary Islands. Vega Lagunera is a NE-SW oriented valley formed by fluvial erosion on Plio-Miocene basalts of the Anaga massif and blocked by late Pliocene and Pleistocene lavas emitted from the NE volcanic ridge of the island. Preliminary sedimentation rates based on OSL dates from previous cores suggest basal date > 400 ka and a Holocene record of 9 m in length. Massive sandy mudstones (15-13% volcanoclastic grains) with brown oxidation color are the dominant lithofacies. Preliminary results of multiproxy analyses of the new cores including sedimentology, XRF scanner and magnetic properties identify a shallow clastic lake during the Pleistocene, with millennial-scale cyclicity, a rapid transition to the Holocene and dominant shallow lacustrine sedimentation since the mid-Holocene. Age models (OSL, ^{14}C) are in progress to identify the glacial/interglacial evolution of these oceanic islands and the relative role of subtropical and mid latitude atmospheric and oceanic patterns. This research was funded by the CCR-CAN project (TED2021-129695A-I00) supported by MCIN/AEI /10.13039/501100011033 and NextGenerationEU/ PRTR.

Polvo sahariano durante el Holoceno en los Pirineos occidentales y centrales: los registros de la turbera de Arxuri y el ibón de Marboré.

Holocene dust deposition in western and central Pyrenees: the Arxuri peatbog and Marboré lake records.

B. Valero-Garces[1], J.P. Corella[2], D. Elustondo[3], M.P. Mata Campo[4], J. Santos-González[5], B. González-Gutiérrez[5], M. Galofré[6], B. Oliva[7] y J. Pey[1]

1. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), 50059, Zaragoza. blas@ipe.csic.es, jorge.pey@ipe.csic.es
2. CIEMAT, Departamento de Medio Ambiente, 28040, Madrid. JuanPablo.Corella@ciemat.es
3.Universidad de Navarra, Instituto de Biodiversidad y Medio Ambiente (BIOMA), 1080, Pamplona. delusto@unav.es
4. Instituto Geológico y Minero, CSIC, 28760 Tres Cantos, Madrid. p.mata@igme.es
5.Dpto. de Geografía y Geología, Universidad de León, 24071 León. jsango@unileon.es, blanca.gonzalez@unileon.es
6. Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (CSIC-UGR), 18100 Armilla. Granada. marcel.galofre@csic.es
6. Departamento Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza. boliva@unizar.es

Palabras clave: deposición atmosférica, Pirineos, Holoceno, polvo sahariano, geoquímica

Resumen

Investigamos la entrada de polvo sahariano en los Pirineos occidentales y centrales durante el Holoceno con análisis multiproxy de sondeos de sedimentos de la turbera de Arxuri (497 m s.n.m., Pirineos occidentales) y el ibón de Marboré (2.612 m s.n.m., Pirineos centrales) y con la caracterización geoquímica del polvo actual y los aportes de las cuencas sedimentarias. Las secuencias de Arxuri y Marboré son coherentes con los registros regionales con una menor deposición de polvo durante el Holoceno temprano seguida de un aumento durante el Holoceno medio y tardío tras el final del Periodo Húmedo Africano (ca. 7 - 4,5 ka BP). En Arxuri, los principales periodos con mayor aporte de polvo sahariano ocurrieron entre 10,0 - 8,8 y entre 4,6 - 3,6 ka BP. En Marboré, se han identificado hasta 7 ciclos de escala milenaria, con una tendencia general al aumento durante el Holoceno. Durante los últimos 2.000 años, en ambos registros, las transiciones entre fases climáticas (periodo Romano, Anomalía Climática Medieval, Pequeña Edad del Hielo) fueron los periodos con mayor aporte de polvo. Esta investigación ha sido financiada por los proyectos de investigación POSAHPI y POSAHPI-2 (Agencia Estatal de Investigación, PID2019-108101RB-I00 y PID2022-143146OB-I00)

Abstract

We investigate the input of Saharan dust in the western and central Pyrenees during the Holocene with multiproxy analyses of sediment cores from the Arxuri peatbog (497 m a.s.l western Pyrenees) and high altitude Marboré (2,612 m a.s.l.) lake in the central Pyrenees and with geochemical characterization of modern dust deposition and sediment input to the systems. The Arxuri and Marboré sequences are coherent with regional dust records pointing to an early Holocene stability with lower dust deposition followed by enhanced dustiness during the mid and late Holocene after the end of the African Humid Period (ca. 7 - 4.5 ka BP). In Arxuri, main dustier periods occurred 10.0 - 8.8 and the 4.6 - 3.6 ka BP. In Marboré, up to 7 millennial - scale cycles have been identified, with a general increasing trend during the Holocene. In both records, transitional climate phases during the last 2,000 years (Late Roman, Medieval Climate Anomaly, Early and Little Ice Age) seem to be dustier. This research was funded by the research projects POSAHPI and POSAHPI-2 (*Agencia Estatal de Investigación*, PID2019-108101RB-I00 and PID2022-143146OB-I00).

Cambios ambientales durante los últimos 40.000 años en el Mar de Alborán: magnetismo de rocas.

Environmental changes over the last 40.000 years in the Alboran Sea: rock magnetism.

V. Villasante-Marcos[1], S. Beltrán de Heredia[1,2], F. Martínez-Ruiz[2], S. Casanova-Arenillas[2] y F.J. Rodríguez-Tovar[3]

1 Laboratorio de Magnetismo de Materiales y Magnetismo Ambiental (L-MAGMA), Instituto Geográfico Nacional, Real Observatorio de Madrid, C/ Alfonso XII, 3, 28014 Madrid, Spain. vvillasante@mitma.es, silvbdh@gmail.com
2 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Avda. de las Palmeras, 4 - 18100 Armilla (Granada), Spain. silvia.beltran@csic.es, fmruiz@ugr.es, scasanova@ugr.es
3 Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, Avenida de la Fuente Nueva S/N 18071 Granada, Spain. fjrtovar@ugr.es

Palabras clave: magnetismo ambiental, Alborán, Holoceno-Pleistoceno, Younger Dryas, Dansgaard-Oeschger.

Resumen

Se presenta un estudio de magnetismo de rocas de sedimentos marinos profundos del Mar de Alborán (Mediterráneo Occidental). El testigo analizado, GP03, abarca los últimos 40.000 años, desde la última glaciación pleistocena, incluyendo el último máximo glacial, la deglaciación subsiguiente, la reversión fría del Younger Dryas y todo el Holoceno hasta el Periodo Industrial reciente. El testigo se muestreó con resolución de 2.5 cm y se analizó el magnetismo de rocas de 379 muestras. Las variaciones en la mineralogía magnética, junto con resultados previos de geoquímica, revelan los principales cambios paleoambientales y paleoclimáticos en la región durante los últimos 40 ka, y permiten documentar la presencia de un horizonte de disolución reductiva que afecta a las fases magnéticas del Younger Dryas, apuntando a un evento significativo de desoxigenación. Se observa una fuerte correlación entre los parámetros magnéticos y las fluctuaciones interestadial-estadial durante la última glaciación, especialmente entre 25 y 38 ka, compatible con variaciones en los aportes terrígenos fluviales *vs*. eólicos. En los sedimentos más recientes (últimos 200 años), se detecta un incremento brusco en la abundancia de magnetita durante el Periodo Industrial. Análisis subsiguientes de SEM y EDS sobre extractos magnéticos han permitido la identificación de microesférulas ricas en magnetita, similares a las habitualmente encontradas en el *fly ash* de origen industrial.

Abstract

We present a rock magnetic study of deep-sea marine sediments from the Alboran Sea (Westernmost Mediterranean). The analyzed core, GP03, covers the last 40.000 years from upper Pleistocene glacial times through the Last Glacial Maximum, subsequent deglaciation, Younger Dryas cooling reversal and the whole Holocene up to the current Industrial Period. The core was sampled at 2.5 cm resolution, and 379 samples were measured for their rock magnetism. The variations in the magnetic mineralogy, together with previously published geochemical data, track the main paleoenvironmental and paleoclimatic changes in the region over the last 40 ka, as well as documenting a very strong reductive dissolution horizon affecting magnetic phases in the Younger Dryas, which points to a significant deoxygenation event. A strong correlation of magnetic parameters and stadial-interstadial fluctuations during the last glaciation, especially between 25 and 38 ka, is observed, pointing to variations in riverine *vs*. aeolian terrigenous input. In modern sediments (last 200 years), a sharp increase in magnetite abundance is recognized, coinciding with the Industrial Period. Magnetic extraction, SEM and EDS analysis, support the identification of magnetite-rich fly ash microspherules of industrial origin.

Microesférulas de origen industrial en los sedimentos recientes de la Ría de Bilbao: caracterización magnética y microscopía SEM.

Industrial microspherules in recent sediments of the Bilbao Estuary: magnetic and SEM microscopy characterization.

V. Villasante Marcos[1], M.J. Irabien[2], A. Cearreta[2] y S. Beltrán de Heredia[1,3]

1 Laboratorio de Magnetismo de Materiales y Magnetismo Ambiental, Instituto Geográfico Nacional, Real Observatorio de Madrid, 28014 Madrid, España. vvillasante@mitma.es
2 Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, 48940, Leioa, España. mariajesus.irabien@ehu.eus, alejandro.cearreta@ehu.eus
3 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), 4-18100 Armilla (Granada), España. silvbdh@gmail.com, silvia.beltran@csic.es

Palabras clave: microesférulas magnéticas, estuarios, contaminación industrial, recuperación ambiental.

Resumen

Se presenta una caracterización magnética completa de sedimentos muy recientes a lo largo del tramo intermareal de la Ría de Bilbao, procedentes tanto de 7 testigos cortos como de 36 muestras superficiales tomadas a intervalos de 3 años entre 2017 y 2023. Las propiedades magnéticas, dominadas claramente por fases ferromagnéticas antropogénicas ricas en magnetita, son compatibles con una mejoría lenta y progresiva de la calidad ambiental del estuario, con la excepción de algunos puntos de recuperación retrasada o comportamiento irregular (*i.e.*, Benedicta, Elorrieta) y de un empeoramiento destacable de las condiciones cerca de un astillero activo en Axpe (estuario medio), donde la contaminación ferromagnética ha aumentado considerablemente en los últimos años. Se ha llevado a cabo extracción magnética con imanes de neodimio en un subconjunto representativo de muestras, permitiéndonos la concentración y separación de la fracción ferromagnética. Análisis subsiguientes de microscopía electrónica de barrido (SEM) y fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDS) han permitido la identificación, caracterización textural y determinación semicuantitativa de la composición química de microesférulas magnéticas y otras partículas magnéticas irregulares ampliamente distribuidas en los sedimentos. Estas microesférulas magnéticas son muy similares a las habitualmente contenidas en el *fly ash* originado durante la quema de combustibles fósiles. Las fases magnéticas detectadas están también probablemente relacionadas con actividades de soldadura u otros procesos industriales.

Abstract

We report here a complete magnetic characterization of very recent sediments along the intertidal part of the Bilbao Estuary, both from 7 short sedimentary cores and 36 surficial samples taken at 3-year intervals between 2017 and 2023. Magnetic properties, clearly dominated by anthropogenic ferromagnetic magnetite-rich phases, are compatible with a slow progressive amelioration of the environmental quality along the estuary, except for some spots with delayed recovery or irregular behavior (*i.e.*, Benedicta, Elorrieta) and a remarkable worsening of conditions near an active shipyard at Axpe (middle estuary), where ferromagnetic pollution has escalated in recent years. Magnetic extraction procedures using Neodymium hand-magnets have allowed us to concentrate and separate the ferromagnetic fraction of a representative subset of samples. Subsequent Scanning Electron Microscopy and Energy-dispersive X-ray Spectroscopy analysis have permitted the identification, textural characterization and determination of semiquantitative chemical composition of the widespread magnetic microspherules and other irregular magnetic particles. These magnetic microspherules are similar to those known to be contained in the fly ash produced during fossil-fuel burning. The detected magnetic phases are also probably connected to local welding activities or other industrial processes.

Deterioro y Preservación: Estudio de la Puerta de las Granadas.

Deterioration and Preservation: Study of the Puerta de las Granadas.

L. Alonso-Castillo[1], F. Prieto Ruiz[1], J. Pedregosa Pérez[1], A. Alonso-Jiménez[2,3], E. Álvarez Areces[2,3]

1 Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Av. de Fuente Nueva, s/n, Beiro, 18071 Granada. lualcas98@correo.ugr.es, fabipepe@correo.ugr.es, joaquin2pp@correo.ugr.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.alonso@igme.es, e.alvarez@igme.es
3 Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (CSIC), C/ Pinar 25, 28006 Madrid, Spain. m.regueiro@csic.es

Palabras clave: Puerta de las Granadas, Deterioro, Conservación, Intervenciones históricas, Granada.

Resumen

Se analiza las intervenciones históricas en la Puerta de las Granadas en Granada (Díaz, N.J.2010), España, su estado de deterioro actual, los procesos que lo causan y una propuesta de intervención. Construida en 1536, la puerta presenta morfologías de deterioro como cambio de color, disgregación del material y formación de pátinas. Se identifican factores climáticos, químicos, biológicos y antrópicos como causas del deterioro (Urosevic, M et al, 2011). Se propone una intervención que incluye limpieza, consolidación, protección y posible sustitución de material. Se destaca la necesidad de un mantenimiento continuo para preservar este monumento histórico. La investigación subraya la importancia de comprender la naturaleza de la roca y los factores ambientales para diseñar intervenciones efectivas de conservación.

Abstract

This work focuses on the historical interventions carried out on the Puerta de las Granadas (Díaz, N.J.2010) in Granada, Spain, its current state of deterioration, the processes causing it, and a proposed intervention. Constructed in 1536, the gate exhibits deterioration morphologies such as colour alteration, material disintegration, and formation of patinas. Climate, chemical, biological, and anthropogenic factors are identified as causes of deterioration (Urosevic, M et al, 2011). The proposed intervention includes cleaning, consolidation, protection, and potential material replacement. The necessity of continuous maintenance to preserve this historical monument is emphasized. The research underscores the importance of understanding the nature of the rock and environmental factors to design effective conservation interventions.

Referencias

Díaz, N. J. (2010). *Nuevos datos histórico-artísticos tras la intervención en la Puerta de las Granadas*. Cuadernos de la Alhambra, 45, 44.

Urosevic, M., Pardo, E. M. S., Agudo, E. R., & Fernández, C. C. (2011). *Evaluación de las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas usadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España.* Materiales de construcción, 61(301), 93-114.

Pizarras de La Baña (León), trascendiendo sus raíces tradicionales a su desarrollo comercial en la construcción.

Slates from La Baña (León, Spain), transcending its traditional roots to its commercial development in construction.

A. Alonso-Jiménez[1,3], E. Álvarez Areces[1,3], Daniel León-González[2], M. Regueiro González-Barros[3] y R. C. P. Santos[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. a.alonso@igme.es, e.alvarez@igme.es
2 Grupo CAFERSA S.L. Barco de Valdeorras, Spain. daniel.leon@cafersa.com
3 Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), C/ Pinar 25, 28006 Madrid, Spain. m.regueiro@csic.es
4 Dpto. Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro s/n, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. rita.pedrosa@ufop.edu.br

Palabras clave: Sinclinal de Truchas, pizarras, patrimonio arquitectónico, explotación, elaboración.

Resumen

Las pizarras de La Baña (León) se contextualizan geológicamente en la Zona Asturoccidental Leonesa, en el Dominio del Sinclinal de Truchas, al noroeste de la península ibérica. El uso de estas pizarras ordovícicas en la construcción tradicional queda constatado en la arquitectura civil y religiosa de la comarca de La Cabrera, constituyendo entornos de gran singularidad arquitectónica caracterizados por el uso de este material en sus cubiertas, con una tonalidad y textura que confieren a las construcciones un carácter distintivo armonizado con el entorno natural de la región.
La durabilidad y resistencia de este material ha demostrado ser excepcional, analizando esta arquitectura tradicional. Su calidad mineralógica (Cárdenes Van den Eynde, 2024), robustez y ausencia de piritas son sus características. En el contexto actual, este material presenta un gran desarrollo, con técnicas de extracción, procesamiento y colocación adaptadas a las nuevas demandas del mercado. Con una producción de 20.000-25.000t de pizarra elaborada (CAFERSA, 2023) e influencia en el mercado.
Las pizarras de La Baña representan un elemento crucial en el patrimonio arquitectónico de esta comarca leonesa, y son elemento de interconexión entre las nuevas demandas en la construcción, la geología y la identidad cultural.

Abstract

The Slates from La Baña (León) are geologically contextualized in the West Asturian-Leonese Zone, in the Truchas Syncline Domain, in the northwest of the Iberian Peninsula. The use of these Ordovician slates in traditional construction is evidenced in the civil and religious architecture of the region of La Cabrera, constituting environments of great architectural singularity, characterized by using this material in their roofs, with a tonality and texture that confer to the constructions a distinctive character harmonized with the natural environment of the region.
The durability and resistance of this material has proven to be exceptional, analyzing this traditional architecture. Its mineralogist quality (Cárdenes Van den Eynde, 2024), robustness and absence of pyrites are its characteristics. In the current context, this material presents a great development, with extraction, processing and laying techniques adapted to the new market demands. With a production of 20,000-25,000t of processed slate (CAFERSA, 2024) and market influence. The slates from La Baña represent a crucial element in the architectural heritage of this region of León, and are an element of interconnection between the new demands in construction, geology and cultural identity.

Referencias

CAFERSA (2023). *Informe Anual de Produccion y Resultados*. El Barco de Valdeorras.

Cárdenes Van den Eynde, V. (1 de marzo de 2024). *Pizarras para cubiertas. Factores de calidad en pizarras – Parte I.* Obtenido de https://pizarrasdetechar.wordpress.com

De la cantera a la obra: estrategias para la divulgación geológica y las rocas del patrimonio arquitectónico en el Camino de Santiago.

From the quarry to the construction: strategies for the geological dissemination and architectural heritage stones on the St. James Way.

E. Álvarez Areces[1] y R. Jiménez Martínez[1]

1 Dpto. Recursos Geológicos para la Transición Ecológica. Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. e.alvarez@igme.es j.martinez@igme.es

Palabras clave: Camino de Santiago, rocas de construcción, patrimonio arquitectónico, patrimonio geológico, divulgación científica.

Resumen

El Camino de Santiago francés constituye un itinerario con una riqueza geológica excepcional siendo variados los contextos geológicos por los que transcurre, influyendo en la arquitectura, cultura e historia de esta ruta de peregrinación. El Instituto Geológico y Minero de España desarrolló el proyecto de investigación, *Caracterización tecnológica de las piedras de construcción empleadas en el patrimonio cultural del Camino de Santiago* (2006-2009), con el objetivo de caracterizar los materiales pétreos empleados y localizar su procedencia. Este proyecto permitió la identificación de las rocas empleadas en la construcción de la arquitectura religiosa y civil, así como sus formas de alteración, cuyo conocimiento es esencial para implementar estrategias efectivas de conservación y restauración del patrimonio y sus canteras. Así mismo, el destacado patrimonio geológico de esta ruta histórica ofrece a los peregrinos la posibilidad de explorar formaciones rocosas, procesos geológicos de modelado del paisaje o minerales de interés (Jiménez Martínez et al, 2013). Este enfoque científico para la divulgación de la geología en el Camino, contribuye a la preservación y valorización del patrimonio geológico, fomentando la conciencia pública sobre la interconexión entre las ciencias de la Tierra, la cultura y la historia a lo largo de ruta (Álvarez Areces, 2016).

Abstract

St. James Way is an itinerary with an exceptional geological richness, being numerous the geological contexts through which it passes, influencing the architecture, culture and history of this pilgrimage route. The Geological and Mining Institute of Spain developed the research project, *Technological characterization of the building stones used in the cultural heritage of the St. James Way* (2006-2009), with the objective of characterizing the stone materials used in the construction of the architectural heritage and their provenance. This project allowed the identification of the stones used in the construction of religious and civil architecture, as well as their forms of alteration, the knowledge of which is essential to implement effective strategies for the conservation and restoration of heritage and its quarries. Likewise, the outstanding geological heritage of this historic route offers pilgrims the possibility of exploring rock formations., geological processes of landscape modeling or minerals of interest (Jiménez Martínez et al, 2013). This scientific approach to the dissemination of geology on the St. James Way and its stones, contributes to the preservation and enhancement of the geological heritage, promoting public awareness of the interconnection between Earth sciences, culture and history along this route (Álvarez Areces, 2016).

Referencias

Álvarez Areces, E. (2016). *De Piedra. Cómo el estudio de los materiales pétreos de construcción ofrece una nueva visión del legado cultural del Camino de Santiago.* Editorial Catarata-Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Colección Planeta Tierra, 15, Madrid, 127 p.

Jiménez Martínez, R. y Díaz Martínez, E. (2013). *Las piedras del Camino de Santiago en Galicia*, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, 268 p.

Explotación histórica de la piedra de Boñar (León).

Historical exploitation of the Boñar stone (León).

E. Álvarez Areces[1], M.A. Utrero Agudo[2], A. Alonso Jiménez[1], R.C.P. Santos[3], R. Andrés Bercianos[1]

1 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), c/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. e.alvarez@igme.es a.alonso@igme.es r.andres@igme.es
2 Escuela de Estudios Árabes (EEA-CSIC) c/ Cuesta del Chapiz, 22, 18010, Granada. mariaangeles.utrero@eea.csic.es
3 Dpto. Eng. de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro - Bauxita, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. rita.pedrosa@ufop.edu.br

Palabras clave: canteras, piedra de Boñar, patrimonio arquitectónico, León.

Resumen

La explotación histórica de las canteras de la piedra de Boñar, ubicadas al noreste de la provincia de León, jugo un papel fundamental en la construcción del patrimonio arquitectónico leonés, suministrando material para obras emblemáticas del románico, gótico y renacimiento, como la Real Colegiata de San Isidoro, la Catedral de León, el antiguo Hospital de San Marcos y el Palacio de los Guzmanes.

La piedra de Boñar, aflora al este y al oeste de la localidad, en una sucesión constituida por tramos carbonatados, calizas y dolomías, alternando con margas y arcillas, denominada localmente como Formación Boñar (Evers, 1967) del Cretácico superior (Campaniense). Se trata de una caliza dolomitizada de grano fino, uniforme de color amarillo-beige, en la que se aprecian restos fósiles dolomitizados, con aspecto masivo o ligeramente noduloso (García de los Ríos y Baéz, 2001).

Existen indicios de su explotación en Valdepiélago, La Vecilla, Acisas de las Arrimadas, etc., encontrándose referenciados algunos de estos lugares en fuentes documentales como las Actas Capitulares de la Catedral de León (siglo XV), una revisión documental necesaria para dimensionar la relevancia histórica de este recurso en la construcción del patrimonio arquitectónico leonés. En la actualidad la cantera de Sierra Redonda, es la única explotación en activo con una producción aproximada de 500 t/año.

Abstract

The historical exploitation of the Boñar stone quarries, located in the north-east of the province of León, played a fundamental role in the construction of León's architectural heritage, supplying material for emblematic Romanesque, Gothic and Renaissance works, such as the Royal Collegiate Church of San Isidoro, the Cathedral of León, the old Hospital of San Marcos and the Palace of the Guzmanes.

The Boñar stone outcrops to the east and west of the locality, in a succession made up of carbonate sections, limestones and dolomites, alternating with marls and clays, locally known as the Boñar Formation (Evers, 1967) from the Upper Cretaceous (Campanian). It is a fine-grained dolomitised limestone, uniform yellow-beige in colour, in which dolomitised fossil remains can be seen, with a massive or slightly nodular appearance (García de los Ríos and Baéz, 2001).

There is evidence of its exploitation in Valdepiélago, La Vecilla, Acisas de las Arrimadas, etc., some of these places being referenced in documentary sources such as the Chapter Acts of the Cathedral of León (15th century), a necessary documentary review to measure the historical relevance of this resource in the construction of León's architectural heritage. At present, the Sierra Redonda quarry, is the only active quarry with an approximate production of 500 t/year.

Referencias

Evers, H.J. (1967). *Geology of the Leonides between the Bernesga and Porma rivers, Cantabrian Mountains, NW Spain*, Leidse Geol. Meded, 41, 83-151.

García de los Ríos, J.I. y Baéz, J.M (2001). *La piedra en Castilla y León*, Junta Castilla y León, 346 p.

La piedra de Losacio y su utilización en el patrimonio arquitectónico de la provincia de Zamora

Losacio stone and its use in the architectural heritage of the province of Zamora

R. Andrés-Bercianos[1] y E. Álvarez-Areces[1]

1 Dpto. de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica. Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), c/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. r.andres@igme.es, e.alvarez@igme.es.

Palabras clave: canteras históricas, esquistos mosqueados, andalucita, patrimonio arquitectónico, Losacio.

Resumen

El entorno de Losacio (Zamora) es conocido por la existencia de mineralizaciones de antimonio, plomo, plata o estaño, así como por las antiguas labores mineras para su beneficio (Gumiel, 1983), asociadas a la presencia de un cuerpo intrusivo subaflorante que ha generado una aureola de metamorfismo térmico con abundantes cristales prismáticos de tamaño centimétrico de quiastolita, una variedad de andalucita (González-Clavijo, 1997). Sin embargo, la presencia de estos prismas de andalucita en las filitas y en los esquistos mosqueados que constituyen la roca encajante (Fm. Santa Eufemia) también suscitó interés en siglos pasados, explotándose como piedra natural, localmente conocida como “piedra de pata de gallina”, por su aspecto estético y durabilidad (Puig y Larraz, 1883). En este sentido, en el entorno de Losacio se han identificado varias canteras históricas asociadas a la explotación de esta piedra tan singular, utilizada para el enlosado de monumentos del patrimonio arquitectónico tan importantes como la Iglesia de Santa María de Tábara (Zamora), declarada monumento histórico-artístico y Bien de Interés Cultural (BIC).

Abstract

The Losacio area (Zamora) is known for the existence of antimony, lead, silver or tin mineralizations, as well as for the old mines for its benefit (Gumiel, 1983), associated with the presence of a subcrop intrusive body that has generated a halo of thermal metamorphism with abundant centimeter-sized prismatic crystals of chiastolite, a variety of andalucite (González-Clavijo, 1997). However, the presence of these andalusite prisms in the phyllites and in the schists that constitute the host rocks (Santa Eufemia Fm.) also caused interest in past centuries, being quarried as natural stone, locally known as "piedra de pata de gallina", for its aesthetic appearance and durability (Puig y Larraz, 1883). In this sense, in the Losacio area have been identified several historical quarries associated with the exploitation of this singular stone, used for the paving of monuments of architectural heritage as important as the Church of Santa Maria in Tabara (Zamora), declared a historic-artistic monument and asset of cultural interest (BIC, in Spanish).

Referencias

González-Clavijo, E.J. (1997). *La geología del sinforme de Alcañices, oeste de Zamora*. Tesis Doctoral, Univ. de Salamanca, 330 p.

Gumiel, P. (1983). *Metalogenia de los yacimientos de antimonio de la península ibérica*. Tesis Doctoral, Univ. de Salamanca, 324 p.

Puig y Larraz, G. (1883). *Descripción física y geológica de la provincia de Zamora*. Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España, Madrid, t. XI, 488 p.

Agradecimientos: Proyecto MPMIN (Gestión sostenible de las materias primas minerales, 000X).

Las canteras históricas de piedra arenisca de Cartagena (Murcia). Un recurso patrimonial por descubrir

The historic sandstone quarries of Cartagena (Murcia). A heritage resource to be discovered.

J. A. Antolinos[1] y B. Soler Huertas[1]

1 GI. Arqueología Histórica y Patrimonio Monumental. Facultad de Letras, Universidad de Murcia. 30001, Murcia. antolino@um.es, bsoler@um.es

Resumen: En el municipio de Cartagena (Murcia) se localiza uno de los enclaves más relevantes dentro del conjunto de Canteras históricas documentadas en la Región de Murcia. Localizadas en la diputación de Canteras, a 4,5 km al noroeste de la ciudad de Cartagena, constituye uno de los mejores exponentes del paisaje minero vinculado a la explotación de la piedra mediante el empleo de técnicas tradicionales. La monumentalidad de sus frentes, el interés geológico de sus formaciones y la trascendencia de este material en el crecimiento edilicio y urbanístico de Cartagena llevó consigo la declaración de BIC con la categoría de Sitio Histórico (BORM n.º 5, 8 de enero de 2011, 927-932), lo que ha permitido preservarlas de la acción antrópica, especialmente del desarrollo urbanístico en la zona. Pese a su interés científico y la potenciación de recursos turísticos, tanto en la ciudad de Cartagena como en otras poblaciones del entorno, estos impresionantes frentes de explotación siguen careciendo de percepción social y, por lo tanto, del reconocimiento de los valores patrimoniales que atesora. En este trabajo, se compendian algunos de sus principales atributos tanto geológicos como culturales y sociales, con el fin de llamar la atención sobre la necesidad de su recuperación y puesta en valor.

Palabras clave: Canteras históricas, arenisca, paisaje cultural, visibilidad, patrimonio natural y cultural

Abstract: *In the municipality of Cartagena (Murcia) is located one of the most important enclaves within the group of historical quarries documented in the Region of Murcia. Located in the district of Canteras, 4.5 km northwest of the city of Cartagena, it is one of the best examples of the mining landscape linked to the exploitation of stone using traditional techniques. The monumentality of its fronts, the geological interest of its formations and the importance of this material in the building and urban growth of Cartagena led to the declaration of BIC with the category of Historic Site, which has allowed them to be preserved from anthropic action, especially from the urban development of the area. Despite their scientific interest and the enhancement of the tourist resources of the city of Cartagena and other towns in the surrounding area, these impressive exploitation fronts lack visibility and, therefore, the recognition of the heritage values they hold. This paper summarises some of their main geological, cultural and social attributes in order to draw attention to the need for their recovery and enhancement.*

Key words: *Historic quarries, sandstone, cultural landscape, visibility, natural and cultural heritage*

Las canteras de arenisca de Cartagena forman parte de una serie sedimentaria fundamentalmente detrítica y de origen marino, comprendida entre las sierras litorales de El Roldán y la Muela −Complejo Alpujárride− y la llanura cuaternaria del Campo de Cartagena (Fig. 1). Hacia la parte superior de la serie se desarrolla un tramo de areniscas calcáreas conchíferas, en ocasiones conglomeráticas, de unos 25-30 m de espesor, que ha dado lugar a un relieve diferencial tipo cuesta, recubierto en discordancia por materiales plio-cuaternarios (Arana et al., 2003). El estudio micropaleontológico ha puesto de manifiesto que la mayor parte de la microfauna es de foraminíferos bentónicos, con un predominio de *Bulliminidae* y *Uvigerinidae*, mientras que entre los planctónicos se han identificado *Neogloboquadrina pachyderma*, *G. trilobus* y *G. obliquus*. Esta asociación no precisa la edad dentro del intervalo de Mioceno Superior-Plioceno si bien, algunos autores sitúan a la formación de Canteras entre el Tortoniense II y el Messiniense.



FIGURA 1. *Vista general desde el este de las canteras de arenisca (Canteras, Cartagena), incluidas en la delimitación del BIC.*

Los frentes de explotación, con *ca*. 25 m de profundidad en algunos puntos, se extienden sin solución de continuidad a lo largo de 2,2 km desde el paraje de las Lomas de Canteras hasta el Collado Mochuno, pasando por población de Canteras, cuyo nombre deriva de los impresionantes tajos existentes en la zona. La arenisca, también denominada "tabaire" o "atabaire" en la documentación histórica y de archivo, ha sido definida como un conglomerado poligénico de grano grueso y color amarillento con un alto componente en dolomías que le confiere un elevado grado de porosidad, convirtiéndola en una piedra blanda, fácil de trabajar, pero también poco compacta y muy permeable, lo que favorece su rápida degradación y erosión bajo los efectos del clima (Arana et al., 2003). Tales circunstancias contribuyen al atractivo de estas canteras como Punto de Interés Geológico, donde es posible observar una serie de estructuras sedimentarias que ilustran la naturaleza de la cuenca sedimentaria en que se depositaron estos materiales, así como sus características paleontológicas a través de los seres vivos que la habitaron. Por otro lado, la erosión diferencial sobre dichos frentes ha generado la formación de formas estructurales caprichosas y relieves con erosión alveolar (Fig. 2) provocados por la acción eólica (Manteca, 2008).



FIGURA 2. *Formas erosivas con modelado alveolar en varios frentes de explotación antigua (Canteras, Cartagena).*

Las primeras evidencias sobre la explotación de estas canteras se retrotraen a época púnica, como acreditan las excavaciones arqueológicas practicadas en su sector más occidental, sacando a la luz algunos espacios de transformación de la piedra, herramientas y rampas para el transporte del material (Antolinos y García, 2003). Desde entonces estas canteras han constituido la principal fuente de aprovisionamiento de material pétreo destinado al crecimiento edilicio y urbanístico de Cartagena a lo largo de su historia. La monumentalidad de los frentes y huellas asociadas confirman el carácter intensivo de las labores extractivas desarrolladas durante la Antigüedad, incrementadas en época moderna y contemporánea con el fin de abastecer de materia prima a las importantes empresas constructivas proyectadas en la ciudad (Soler y Antolinos, 2007). El empleo masivo de esta roca está documentado en elementos significativos de su arquitectura civil y militar, entre otras manifestaciones de la arquitectura popular (Lasheras, 2021). Respecto a su funcionalidad, esta piedra fue trabajada a modo de sillar paralelepípedo en encintados, cimentaciones y alzados, siendo recurrente su empleo en la labra de elementos arquitectónicos y escultóricos, entre otros elementos de tipo utilitario como abrevaderos, molinos o pies de prensa (Tabla 1).

Obra/Edificio/Monumento	Uso Edilicio	Adscripción Cultural
Muralla	Lienzos exteriores, muros interiores	Púnica
Fortificación c/ Palas	Cimentación, alzado de muros	Púnica
Viviendas c/ Serreta	Alzado de muros	Púnica
Infraestruc. viarias plza. San Ginés	Muros de aterrazamiento, canalizaciones	Púnica
Templo Molinete	Basamento	Romana
Porticus Duplex c/ Caballero	Alzado de muros, elementos sustentantes	Romana
Teatro	Cimentaciones, muros, elementos sustentantes	Romana
Anfiteatro	Cimentaciones, muros, graderío, pavimento *arena*	Romana
Foro	Basamento, contrafuertes *podium*, muros	Romana
Curia	Alzado de muros	Romana
Infraestruc. viarias Molinete	Muros de aterrazamiento, canalizaciones	Romana
Domus de *Salvius*	Elementos sustentantes	Romana
Infraestruc. hidráulicas Rambla de Benipila	Muros de aterrazamiento, canalizaciones	Moderna
Infraestruc. hidráulicas Almarjal	Muros de aterrazamiento, canalizaciones, puentes	Moderna
Muralla, baluartes Carlos III	Cimentaciones, muros	Moderna
Hospital Militar de Marina	Cimentaciones, muros	Moderna
Arsenal Militar	Cimentaciones, muros	Moderna
Casa de la Pólvora	Muros	Moderna
Cuartel de Presidarios	Cimentaciones	Moderna
Cuartel de Antigones	Cimentaciones	Moderna
Parque de Artillería	Cimentaciones	Moderna
Cuartel de Guardias Marinas	Cimentaciones, muros	Moderna
Plaza de Toros	Cimentaciones, muros	Contemporánea
Teatro Principal	Cimentaciones, muros	Contemporánea

TABLA I. *El empleo de la arenisca en el patrimonio histórico-arqueológico de Cartagena.*

Con todo, uno de sus principales atributos radica en la relevancia paisajística de estas canteras como 'paisaje modelado' por la acción humana, en el que se incluyen toda una serie de estructuras y elementos relacionados con la actividad extractiva, entre otros elementos

culturales de valor asociativo −etnográfico e inmaterial− (Ortega, 2016). Sus frentes permiten un recorrido didáctico sobre las técnicas tradicionales empleadas en la extracción de la piedra, donde es posible observar distintos sistemas de explotación −taludes, improntas de sillar (Fig. 3), orificios para peldaños− y el tipo de herramientas utilizadas (Antolinos et al., 2018).

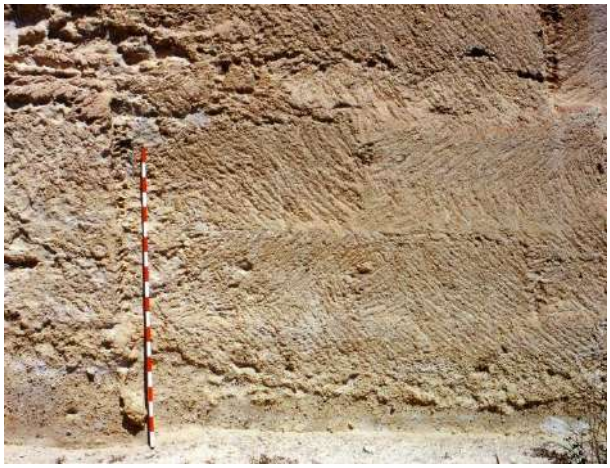


FIGURA 3. *Improntas de las herramientas empleadas en la extracción de bloques de arenisca (Canteras, Cartagena).*

A estos elementos se suman otras evidencias relacionadas con el trabajo en las canteras, entre las que se incluyen una serie de viviendas y/o almacenes subterráneos excavados en los siglos XVIII-XIX (Fig. 4), junto a un significativo conjunto de grafitos incisos sobre las paredes verticales relacionados, ya sea con la propiedad de algunos de estos frentes, o con las creencias de los antiguos canteros. Otros bienes dignos de mención se localizan en el entorno del área extractiva, concretamente, dos molinos de viento y tres depósitos de agua construidos a finales del XIX por la compañía de aguas “Los Cartageneros”. Finalmente, este paisaje minero pose un eminente interés medioambiental, actuando como espacio determinante en la expansión y reproducción de especies animales y vegetales autóctonas, en consonancia con los cultivos tradicionales de secano que aún se conservan en la zona (Antolinos y García, 2003).

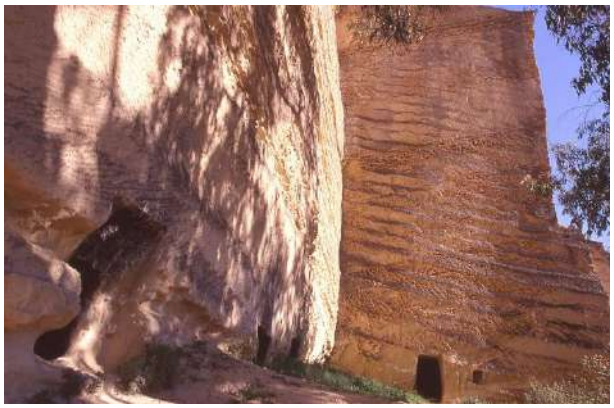


FIGURA 4. *Frente de explotación de los siglos XVIII-XIX con varias zonas de acceso hacia las ‘cuevas’ artificiales (Canteras, Cartagena).*

La confluencia de todos estos atributos determina el potencial de estas canteras históricas como recurso de primer nivel. En este sentido y pese a las iniciativas públicas y privadas emprendidas para su recuperación y puesta en valor, la percepción social e institucional de este bien patrimonial sigue siendo muy débil. Prueba de ello es la ausencia de una definición integral de sus valores patrimoniales, en la que intervienen componentes naturales y culturales (Fig. 5), tangibles e intangibles, que son constitutivos de los sitios y paisajes de cantera y que deberían ser tenidos en cuenta. Si bien es cierto que las medidas de protección otorgadas han frenado la destrucción de estas canteras, las acciones emprendidas para su adecuación y recuperación −Proyecto Atabaire 1999− han sido insuficientes para la integración paisajística de este bien patrimonial dentro de su entorno (Hernández y Antolinos 2002). En este sentido, la reordenación urbanística planteada para la delimitación y adecuación de la zona colindante con las canteras de arenisca, sin duda compleja, presenta serias deficiencias en materia de accesibilidad y visibilidad del bien. Por otro lado, es necesario insistir en el estado de abandono de algunos de los sectores, la falta de seguridad dentro del perímetro, la carencia de equipamientos adecuados y, lo más importante, la ausencia de un discurso integral que atienda a la pluralidad de enfoques y de disciplinas que intervienen en su definición. Todos estos factores han propiciado la falta de reconocimiento y de percepción social de este bien patrimonial.



FIGURA 5. *Frente de explotación de época púnico-romana con modelado erosivo de tipo alveolar (Canteras, Cartagena).*

Dado el interés científico y normativo asumido por los sitios y paisajes de cantera durante el último decenio, es necesario insistir en la necesaria integración paisajística de estas canteras dentro del territorio, mediante un discurso que atienda a la pluralidad de sus valores patrimoniales. Proyectos como QuarryScapes, European Quarry Landscapes o el programa INCHAPA insisten en la necesidad de abordar estrategias que permitan la reintegración paisajística de estos espacios, maximizando su potencial científico, didáctico y divulgativo destinado a un amplio espectro de audiencias (Douet, 2015). En este sentido, la propuesta de proyecto integrador de las canteras de arenisca de Cartagena debería priorizar el paisaje como argumento del discurso (López et al., 2016), analizando todos aquellos procesos naturales y culturales que lo conforman en el espacio y en el tiempo (Fig. 6). Las acciones emprendidas para la puesta en valor de las Canteras de El Mèdol (Tarragona) y de s'Hostal (Menorca) constituyen un buen punto de partida para la puesta en valor de este valioso recurso.

REFERENCIAS

Antolinos, J.A. y García, P. (2003): Primeras actuaciones de recuperación arqueológica y ambiental en las canteras romanas de arenisca (Canteras, Cartagena, Murcia). En, *Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional* (I. Rábano, J.I. Manteca y C. García, eds.). Madrid, 381-388.

Antolinos, J.A., Noguera, J.M. y Soler, B. (2018): La actividad extractiva en las canteras del entorno de Carthago Nova. En *Lapidum natura restat. Carrières antiques de la péninsule Ibérique dans leur contexte (chronologie, techniques et organisation de l'exploitation)* (A. Gutiérrez Garcia-M. y P. Rouillard, eds.). ICAC-Casa de Velázquez, Tarragona-Madrid, 37-48.

Arana, R., Mancheño, M.A., Manteca, J.I., Rodríguez, T., Rodríguez, J.A. y Serrano, F. (2003): Las canteras de 'roca tabaire' de Canteras (Cartagena). Contexto geológico e importancia como patrimonio geológico y minero. En *Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional* (I. Rábano, J.I. Manteca y C. García, eds.). Madrid, 75-85.

Douet, J. ed. (2015): *Teruel Life + European Quarry Landscapes. Collected essays from the first meeting of the European Quarry Landscapes Network.* Ayuntamiento de Teruel, Teruel.

Hernández, P. y Antolinos, J.A. (2002): Del patrimonio cultural a la arqueología del paisaje: el Proyecto Atabaire (Cartagena-España) como modelo de recuperación y puesta en valor de una cantera histórica. En *Actas do Congresso Internacional sobre Patrimonio Geológico e Mineiro*, (J.M. Brandão cood.), Lisboa, 649-654.

Lasheras, A. (2021): El empleo de la piedra Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena (España). Impacto ambiental, caracterización y estado de conservación. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena.

López, C., Díez, I. y Mataix, C. (2016): Mines, quarries and landscape. Visuality and transformation approaches to the concept of landscape. *Management Systems in Production Engineering*, 2 (22): 110-122.

Manteca, J.I. (2008): Documental Viaje a un pasado remoto. Serie itinerarios geológicos: Las Canteras Romanas de Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Ortega, J. (2016): Historia y etnografía de Canteras: La ruta de los Atabayres. *Murgetana*, 135: 103-129.

Soler, B. y Antolinos, J.A. (2007): La arenisca en la arquitectura romana de Carthago Nova. Aspectos jurídicos y económicos. *Verdolay*, 10: 109-146.



FIGURA 6. *Vista general desde el oeste de las canteras de arenisca (Canteras, Cartagena), incluidas en la delimitación del BIC.*

La Geología. Una herramienta imprescindible en los trabajos de recuperación de los "paisajes de guerra".

Geology. An essential tool in the recovery of "war landscapes".

J.M. Baltuille Martín[1], P. Schnell Quiertant[2], F.J. Rubio Pascual[3], E. Álvarez Areces[3] y J. Fernández Suárez[3]

[1] Bravo Murillo 62, 28003 Madrid. jm.baltu@yahoo.es
[2] Asociación Española de Amigos de los Castillos (AEAC). Prado 26, 28014 Madrid. pabloschnell@yahoo.es
[3] Instituto Geológico y Minero de España. (IGME-CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. f.rubio@igme.es, e.alvarez@igme.es, j.fernandez@igme.es

Resumen: Durante los años 2016-2022 se ha llevado a cabo un estudio completo del frente establecido, durante la Guerra Civil Española, en la sierra de Madrid; más concretamente, en la parte occidental de la sierra de Guadarrama. En dicho trabajo se han localizado, estudiado y catalogado un total de 2.039 obras constructivas agrupadas en 120 conjuntos defensivos en las provincias de Ávila y Madrid. El estudio, realizado por un equipo multidisciplinar de geólogos y arqueólogos, no sólo ha atendido a las características intrínsecas de las obras, sino, que también, mediante una metodología específica, ha analizado la relación entre patrimonio y entorno. Con este trabajo se ha podido comprobar que la Geología es una herramienta imprescindible en cualquier estudio que se quiera llevar a cabo en aquellos entornos donde se han desarrollado episodios bélicos y que son conocidos con la denominación de "paisajes de guerra".

Palabras clave: Paisajes de guerra, Geología, metodología, Guerra Civil Española, Sierra de Guadarrama.

Abstract: *During the years 2016-2022, a complete study of the front established, during the Spanish Civil War, in the mountains of Madrid has been carried out; more specifically in the western part of the Guadarrama mountains. In this work, a total of 2,039 constructive works grouped in 120 defensive groups in the provinces of Avila and Madrid have been located, studied and catalogued. The study, carried out by a multidisciplinary team of geologists and archaeologists, not only focused on the intrinsic characteristics of the works, but also, by means of a specific methodology, analysed the relationship between this heritage and its environment. This work has shown that geology is an essential tool in any study to be carried out in those environments where war episodes have taken place, and which are known as "war landscapes".*

Key words: *War landscapes, Geology, methodology, Spanish Civil War, Sierra de Guadarrama.*

INTRODUCCIÓN

El empleo de las técnicas geológicas en diferentes áreas, aparentemente alejadas de las suyas propias, es algo que se ha extendido en las últimas décadas.

Lejos quedan los tiempos donde los únicos campos de competencia de las Ciencias Geológicas estaban restringidos a los estudios cartográficos, a la exploración e investigación de los recursos minerales, a la localización de aguas subterráneas o a la definición y aprovechamiento de los distintos comportamientos geotécnicos de los distintos materiales litológicos. Son innumerables los escenarios donde se ha demostrado que los estudios geológicos complementan y son herramientas básicas para el estudio y resolución de diferentes problemas de investigación.

Ello ha contribuido a tener que trabajar, codo con codo, con profesionales de otros campos de la ciencia; procurando minimizar los problemas competenciales que pudieran presentarse y maximizando la resolución de aspectos y problemas que, sin la colaboración de la Geología, habrían quedado irresolutos o, lo que es peor, mal resueltos.

En las dos últimas décadas, la aportación de las técnicas geológicas en el campo del patrimonio histórico y arquitectónico han sido abundantes y exitosas. No sólo nos referimos a los estudios y caracterización de las patologías que afectaban a los materiales constructivos, primer campo de actuación de la geología en su implicación con el patrimonio, sino a la localización, estudio y catalogación de las diferentes áreas extractivas que aportaron materiales al patrimonio arquitectónico (Colucci et al., 2007; Baltuille et al., 2012), campo donde el Instituto Geológico y Minero de España ha sido pionero (Baltuille Martín et al., 2016).

En los últimos años, y en ámbitos relacionados con el patrimonio arquitectónico e industrial asociado a conflictos bélicos recientes (Guerra de Secesión Norteamericana, I y II Guerra Mundial, Guerra Civil Española, etc., ha surgido un movimiento orientado a estudiar lo que se ha denominado "paisajes de guerra": conjunto de elementos (geográficos, históricos,

constructivos, militares, sociológicos, etc.) que completan la totalidad del entorno donde se produjeron esos hechos.

La consideración de los campos de batalla como patrimonio cultural tiene un largo recorrido, fundamentalmente, en Estados Unidos, Gran Bretaña y Francia. Estos países cuentan con protección legal y una gestión activa como recursos históricos, turísticos y de memoria colectiva; sin embargo, en España, por el momento, las administraciones han mostrado poco interés y se carece de una legislación específica y de una gestión global que ponga en valor los paisajes de guerra.

Aunque hasta ahora la importancia de la Geología en la configuración de la morfología del territorio y en la conformación del mismo, es decir en la definición del paisaje, no había sido tenido en cuenta. Este trabajo trata de solucionar ese problema.

ANTECEDENTES

En el periodo 2016-2022, gracias a la financiación del Instituto Geológico y Minero de España y de la Diputación de Ávila, se realizó un estudio para localizar, catalogar e inventariar los restos de la Guerra Civil en la rama occidental de la Sierra de Guadarrama, a la vez que se caracterizaba el marco geológico y geomorfológico regional y se evaluaban los materiales pétreos empleados (Baltuille Martín et al., 2023).

El estudio abarca un área casi rectangular, de 20 x 12,5 km y orientación N-S (Fig. 1). Ocupa una superficie de 245 km^2, perteneciendo el 54,3 % a la Comunidad de Madrid (términos municipales de Robledo de Chavela, Santa María de la Alameda y Valdemaqueda) y el 45,7 % restante a la provincia de Ávila (términos de Peguerinos y las Navas del Marqués).

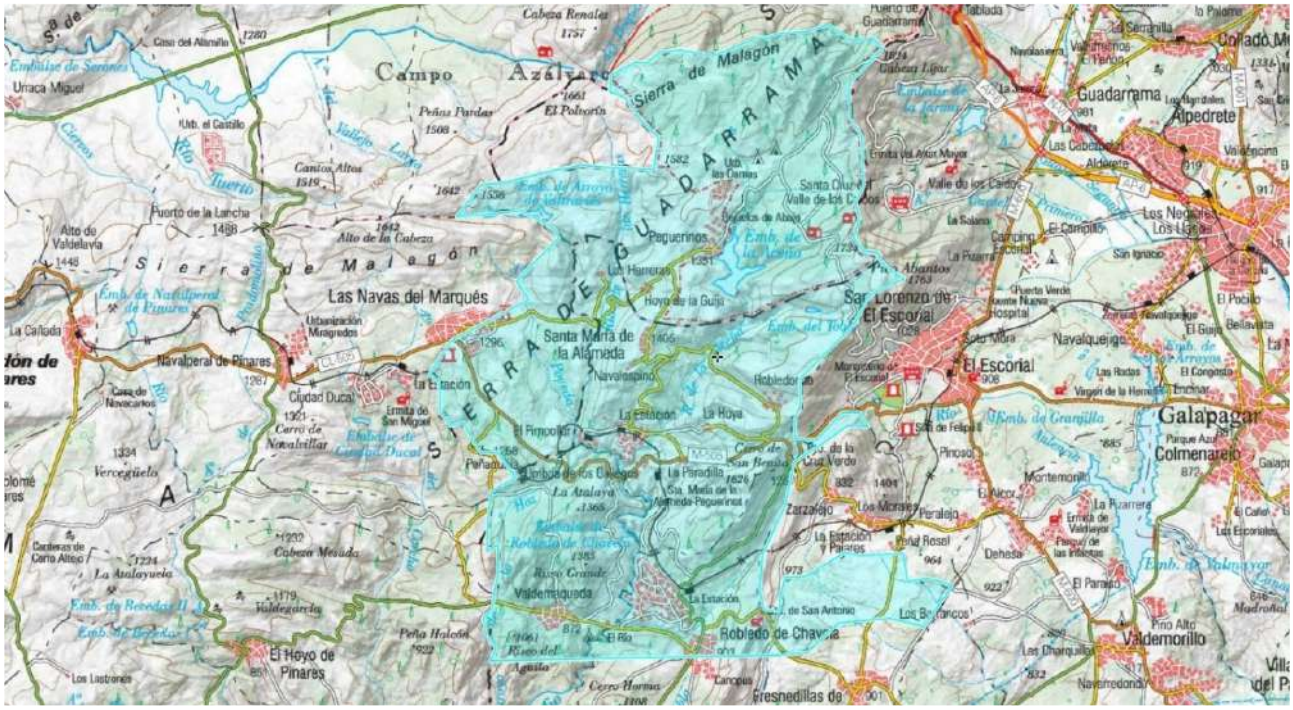


FIGURA 1. *Localización de la zona de trabajo.*

En este tiempo se han reconocido un total 2.039 obras constructivas, integradas en 120 conjuntos defensivos. El 35 % de las obras corresponden al bando gubernamental y el 65 % restante al rebelde; en cuanto a los conjuntos defensivos, 936 se localizan en la provincia de Ávila y 1.103 en Madrid. Muchas de estas obras estaban inéditas y totalmente desconocidas.

METODOLOGÍA

La particularidad del trabajo anteriormente citado (Baltuille Martín et al., 2003) es el desarrollo de una nueva estrategia metodológica para afrontar el estudio de las construcciones defensivas, no considerándolas como restos históricos aislados de su entorno físico, sino como elementos constitutivos de la morfología y del paisaje regional, gracias a los materiales constructivos empleados y a su ubicación espacial en el entorno.

Para la realización de un proyecto de estas características, donde se emplean tanto técnicas históricas y arqueológicas como geológicas: caracterización litológica de la mampostería empleada, petrografía de las rocas del entorno, análisis morfológico del paisaje, determinación de elementos defensivos, análisis documental e histórico, etc., es imprescindible contar con equipos multidisciplinares y transversales.

Este novedoso planteamiento permite poner de manifiesto la importancia de la geología, en su sentido más amplio, en cualquier actividad relacionada con el

patrimonio arquitectónico defensivo del siglo XX, como ya se ha establecido con otros tipos de patrimonio.

Ya en plena Guerra Civil Capdevila (1938) resaltaba, en el que posiblemente sea el tratado de fortificación más completo de toda la contienda, la importancia inequívoca de la geología en el arte de la fortificación:

> *"El terreno, en donde la organización defensiva en general se ha de instalar, debe corresponder ante todo a las necesidades tácticas, pero inmediatamente después a las condiciones geológicas del suelo"*.

El esquema metodológico empleado ha contado con quince actividades diferentes:

- ⇨ *Revisión bibliográfica y de fondos documentales* (privados y públicos). Preferentemente en el Archivo General Militar de Ávila, en el Archivo General Militar de Madrid, en el Archivo General de la Guerra Civil Española-Centro Documental de la Memoria Histórica (Salamanca) y en el Archivo Histórico del Ejército del Aire (Villaviciosa de Odón).
- ⇨ *Localización y georreferenciación de los elementos defensivos.*
- ⇨ *Descripción, estudio y caracterización de los elementos defensivos de fábrica,* principalmente los realizados con mampostería, a hueso o con mortero.
- ⇨ *Definición de una tipología para los diferentes elementos arquitectónicos defensivos.*
- ⇨ *Muestreo de los principales conjuntos defensivos construidos con mampostería, así como de sus entornos geológicos próximos*.
- ⇨ *Definición y carga de una base de datos específica* con 44 campos, para el almacenamiento de la información obtenida.
- ⇨ *Adscripción, de los elementos constructivos estudiados, a sus correspondientes posiciones o conjuntos defensivos (CoDe's).*
- ⇨ *Creación de un fondo documental gráfico.*
- ⇨ *Estudio fotogramétrico.*
- ⇨ *Tratamiento digital de las imágenes obtenidas (modelos en 2D, 3D, MDT, etc.).*
- ⇨ *Caracterización petrológica y petrográfica de la litología empleada en las diversas obras*.
- ⇨ *Estudio geológico regional*
- ⇨ *Análisis geomorfológico del paisaje y su relación con los diferentes emplazamientos defensivos.*
- ⇨ *Carga de un SIG* que permita gestionar la información obtenida.
- ⇨ *Propuesta,* a los distintos municipios concernidos, *de la creación de una serie de rutas geo-militares,* que faciliten la divulgación del patrimonio geológico y bélico y que actúen, como vectores de desarrollo socio-económico, en la zona afectada.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los principales resultados y conclusiones obtenidos a lo largo de estos siete años de trabajo, relacionados con la metodología empleada, han sido:

1.- *Localización y georreferenciación de los elementos defensivos.* A pesar de las características tan particulares del trabajo: alto relieve topográfico (medias de 1.400 m), precariedad de vías de acceso para vehículos, existencia de muchas fincas particulares con el acceso restringido, pequeñas dimensiones de las obras a localizar (media de 8 m^2), mal estado de las mismas (más de 80 años a la intemperie y la acción antrópica y una alta tasa de cobertera arbórea), que nos han obligado a elegir un método prospectivo "deductivo-inductivo", se han localizado un total de 2.039 obras constructivas integradas en 120 conjuntos defensivos.

2.- *Definición de una tipología para los diferentes elementos arquitectónicos defensivos*. Para estudiarlos de una forma ordenada y sistematizada se han establecido 25 tipos distintos.

3.- *Adscripción, de los elementos constructivos estudiados, a sus correspondientes posiciones o conjuntos defensivos (CoDe's);* varios de los cuales, junto con sus diferentes obras defensivas, son documentados y estudiados por primera vez.

4.- *Creación de un fondo documental gráfico* de más de 6.000 fotografías.

5.- *Estudio geológico regional.* Se han caracterizado un total de 16 litologías diferentes. Igualmente, se ha definido un índice de correlación entre los elementos arquitectónicos existentes en cada litología (A_n) y la superficie que ocupa cada una de esas formaciones (B_n), así como la relación de cada tipo de obra con las características reológicas del material pétreo del emplazamiento.

6.- *Análisis geomorfológico del paisaje y su relación con los diferentes emplazamientos defensivos localizados*, constatándose que existe un buen aprovechamiento de las características reológicas y morfológicas del terreno, así como de los rasgos morfo-estructurales del paisaje (Fig. 2).

De cara a determinar la importancia de la aplicación de técnicas geológicas en la resolución de problemas investigativos relacionados con el estudio y definición de los "paisajes de guerra", destacamos: el muestreo y la caracterización de las diferentes facies litológicas, tanto las empleadas en las obras como las del entornos de los CoDe's, el estudio fotogramétrico mediante drones, la modelización digital del territorio, el estudio geológico regional y el análisis geomorfológico del terreno, con el establecimiento de los correspondientes coeficientes de correlación, entre los elementos constructivos y su marco geológico regional.

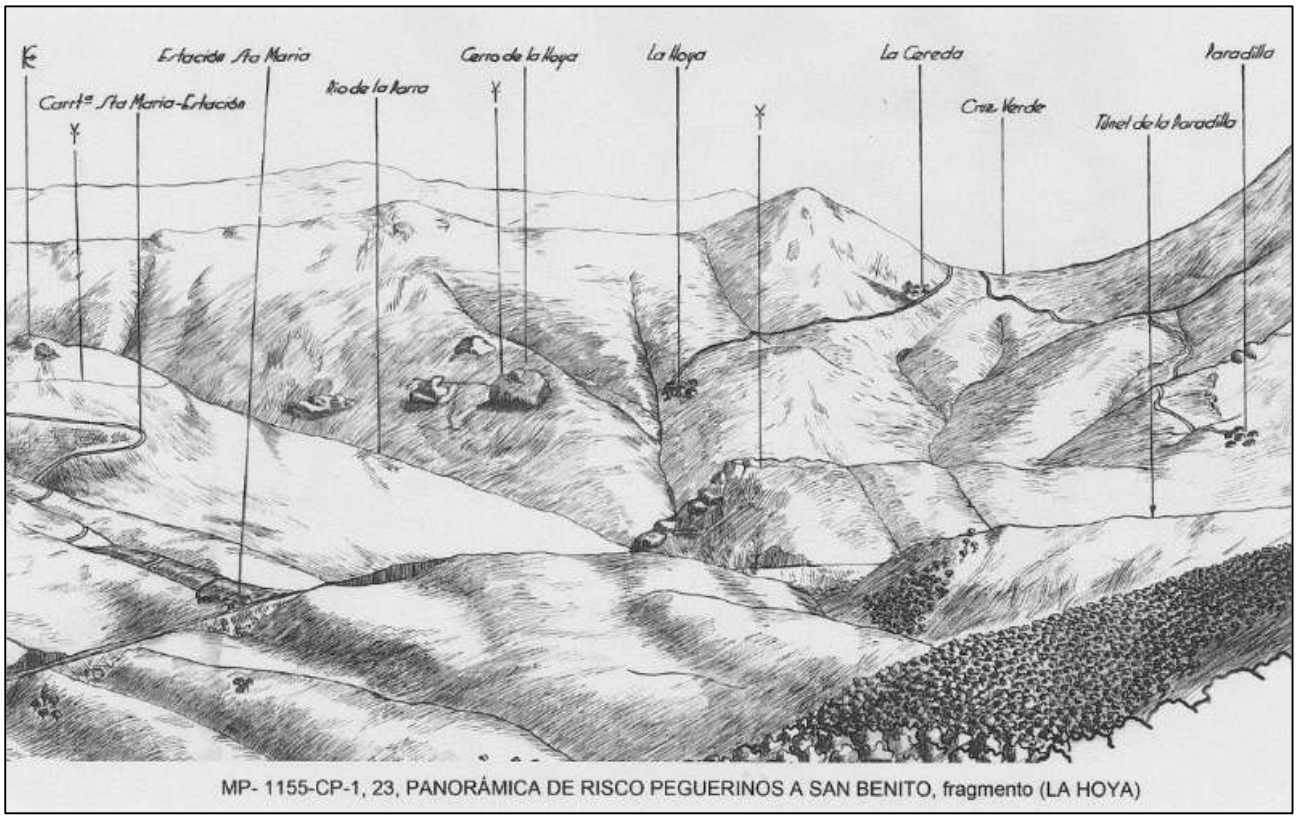


FIGURA 2. *Despliegue de la 34 Brigada Mixta del Ejército Popular de la República en julio de 1937, entre el cerro San Benito y Santa María de la Alameda (Archivo General Militar de Ávila).*

REFERENCIAS

Baltuille, J.M., Gisbert, J., Pereira, D., Sebastián, E., Mota, Mª.I., Gómez Gras, D., Taboada, J., García de los Ríos, J.I., Franco, A. y Fort, R. (2012): CONSTRUROCK. A network at the service of Natural Stone and the Architectonic Heritage. En: *Abstracts of IV Global Stone Congress 2012*, A-042.

Baltuille Martín, J.M., Álvarez Areces, E. y Fernández Suárez, J. (2016): Spanish inventory of historic quarries used in architectural heritage (INCHAPA). En: *5th International Conference YOuth in COnservation of CUltural Heritage YOCOCU 2016*. Book of Abstracts, 25.

Baltuille Martín, J.M., Schnell Quiertant, P. y Rubio Pascual, F.J. (2023): *Las construcciones defensivas de la Guerra Civil Española en el Frente de la Sierra (Subsector de Peguerinos-Robledo de Chavela). Su relación con la Geología y el Paisaje*. Diputación de Ávila, Madrid, 447 p.

Capdevila, J. (1938): *La fortificación de campaña. Sindicato de la Industria de la edificación, madera y decoración*. CNT, Barcelona, 266 p.

Colucci, M.F., Baltuille, J.M. y Gisbert, J. (2007): Canteras históricas de Aragón: Recursos para la restauración. *MACLA*, 7: 87.

La técnica del análisis de cuencas visuales como complemento de los estudios de integración del patrimonio y la geología. Un caso concreto: los observatorios del sector Peguerinos-Robledo de Chavela (1936-1939).

The viewshed análisis technique as a complement to heritage and geology integration studies. A specific case: the observatories of the Peguerinos-Robledo de Chavela sector (1936-1939).

J.M. Baltuille Martín[1], P. Schnell Quiertant[2], F.J. Rubio Pascual[3], J.R. Hernández Manchado[3], E. Álvarez Areces[3] y J. Fernández Suárez[3]

[1] Bravo Murillo, 62. 28003 Madrid. jm.baltu@yahoo.es
[2] Asociación Española de Amigos de los Castillos (AEAC). Prado, 26. 28014 Madrid. pabloschnell@yahoo.es
[3] Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España. (CN IGME-CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. f.rubio@igme.es, r.hernandez@igme.es, .e.alvarez@igme.es j.fernandez@igme.es

Resumen: Entre 2016-2022 un equipo multidisciplinar de geólogos y arqueólogos han realizado un estudio integral: geológico, histórico y arqueológico de la parte más occidental del frente establecido, durante la Guerra Civil Española, en la sierra de Guadarrama; más concretamente en el sector Peguerinos-Robledo de Chavela, localizando y estudiando un total de 1.037 obras en la provincia de Madrid.
Se han caracterizado 16 observatorios, obras que a veces es muy difícil de reconocer si no se cuenta con la correspondiente documentación histórica. Para ello se ha empleado la técnica del análisis de cuencas visuales y así poder tener constancia de los campos de visibilidad reales que tenían cada uno de ellos.
Los resultados obtenidos son muy esperanzadores y nos permiten augurar un uso muy amplio de esta técnica, sobre todo en proyectos relacionados con el patrimonio arquitectónico defensivo.

Palabras clave: Cuencas visuales, observatorios, patrimonio arquitectónico, Guerra Civil Española, Sierra de Guadarrama.

Abstract: *During the years 2016-2022 a multidisciplinary team of geologists and archaeologists carried out an integral study: geological, historical and archaeological on the most western part of the front established during the Spanish Civil War in Guadarrama mountains; more specifically in the Peguerinos-Robledo de Chavela sector, locating and studying a total of 1,037 structures in the province of Madrid.*
Sixteen observatories were characterized, works that are sometimes very difficult to recognize without the corresponding historical documentation. So, the viewshed analysis technique has been used to determine the real fields of visibility that each of them had.
The results obtained are very encouraging and allow us to predict a very wide use of this technique, especially in projects related to defensive architectural heritage.

Key words: *Viewshed, observatories, architectural heritage, Spanish civil War, Sierra de Guadarrama.*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el avance de la Geología en diferentes ámbitos que históricamente le eran cerrados ha sido espectacular, siendo infinidad los campos donde la geología se ha mostrado como una ciencia capaz de aportar soluciones que han permitido, en muchos casos, resolver problemas hasta entonces irresolutos.

Uno de estos campos es del patrimonio histórico y arquitectónico donde aparte de los estudios de caracterización de patologías, históricamente el primer ámbito de colaboración, han seguido los de conocimiento y valoración de las canteras históricas de donde se extrajo el material constructivo (Colucci et al., 2007) y, recientemente, en el campo de los denominados "paisajes de guerra" (Schnell Quiertant y Baltuille Martín, 2017).

Entre 2016-2019 se realizó un estudio para localizar, catalogar e inventariar los restos de la Guerra Civil en la rama occidental de la Sierra del Guadarrama (provincia de Madrid), caracterizándose el marco geológico y geomorfológico regional a la vez que se estudiaban los materiales pétreos empleados (Baltuille Martín et al., 2022), en un proyecto de colaboración entre el IGME y la Asociación Española de Amigos de los Castillos.

ANTECEDENTES

Tras el levantamiento en Melilla de una parte del Ejército el 17 de julio de 1936, dio comienzo una sangrienta y devastadora guerra civil que no finalizó hasta el 1 de abril de 1939 y cuyas consecuencias aún afectan a nuestra sociedad en pleno siglo XXI.

La idea original del alzamiento era la rápida convergencia sobre Madrid de tropas sublevadas y milicias traídas de zonas favorables al golpe (Navarra y

Castilla la Vieja, principalmente) que apoyarían a los cuarteles de la capital que se sublevasen y cercenarían así cualquier acción del gobierno republicano; pero la rápida reacción de las tropas leales y de las organizaciones obreras, armadas por el gobierno, abortó esa posibilidad. Desde entonces el objetivo del mando republicano fue cerrar los pasos montañosos que, a través de la Sierra, comunicaban las amplias llanuras castellanas, en poder de los sublevados, con la capital.

Tras violentos combates, el avance quedó detenido en los puertos de Guadarrama, Navacerrada y Somosierra, a pocos kilómetros de la capital; desarrollándose un tipo de guerra específico marcado por los condicionantes geográficos. Finalmente, y tras el fracaso en la conquista de Madrid en noviembre, la ofensiva en la Sierra también quedó paralizada. La consecuencia fue el establecimiento de un frente de media y alta montaña que permaneció prácticamente estable durante el resto de la guerra y en el que ambos contendientes adoptaron la organización defensiva, atrincherándose y fortificándose.

En el trabajo se ha investigado una superficie de 132 km^2, en los municipios madrileños de Robledo de Chavela, Santa María de la Alameda y Valdemaqueda. Se han localizado y estudiado 1.037 elementos defensivos, el 64 % corresponden a las fuerzas sublevadas y el resto a las gubernamentales. Muchas de estas obras estaban inéditas y totalmente desconocidas.

Queremos señalar que estos elementos deben ser tratados como restos históricos y componentes del patrimonio histórico y cultural, de manera similar a como se hace con otros de mayor antigüedad, dejando a un lado cuestiones de otra índole, que puedan hacer perder de vista su interés histórico y patrimonial y, con ello, poner en riesgo de desaparición estos restos.

Tanto el valor histórico como el geo- paisajístico de estos conjuntos fortificados, hace que estos "paisajes de guerra" tengan un fuerte potencial como dinamizadores económicos en sus municipios, como ocurre en Europa.

METODOLOGÍA

La particularidad del trabajo, juntamente con la ampliación a los municipios vecinos de Ávila (Baltuille Martín, 2003), es el desarrollo de una nueva metodología para afrontar el estudio del patrimonio arquitectónico defensivo relacionándolo con la litología, la morfología y la tectónica de su entorno.

En base a esos estudios se ha querido focalizar la importancia de algunas técnicas de apoyo empleadas en los estudios geológicos del territorio, tales como el uso de drones junto con la definición de Modelos Digitales del Territorio (MDT) y sus posibilidades.

Uno de los principales problemas que se encuentra el investigador a la hora de afrontar trabajos como el que aquí se ha presentado es la poca certeza de tipificar exactamente cada una de las obras encontradas con su uso real, sobre todo cuando la obra está muy deteriorada, bien por la antropización o por los efectos reales del combate y se carece de la información escrita de fondos documentales suficiente, sobre todo cuando se trabaja con unidades militares de pequeña dimensión táctica.

Tal es el caso de los observatorios, obras que sirven para controlar la actividad y los movimientos del enemigo o el efecto del tiro artillero propio, pero que a veces se complementan con otro uso, como puede ser el emplazamiento de un tirador o de un arma automática. Por eso a veces surgen dudas de si la interpretación que se ha hecho del uso de una obra se ajusta a la realidad de la que desempeñó realmente, y es por ello que para conocer la realidad del campo de observación de un observatorio y las superficies de visualización del terreno que abarca hemos contado con la herramienta del cálculo de cuencas visuales.

Esta técnica informática tiene como finalidad obtener las áreas visibles desde cada uno de los puntos de observación recogidos. El software utilizado para el proceso fue ARCGIS PRO 2.9.

El proceso comienza con la conversión de los puntos almacenados en una hoja Excel, donde se recogía la coordenada X e Y además del sistema de referencia, que era para todos los puntos el ETRS89 de Huso 30.

Estos puntos se importan a un fichero ARCGIS mediante la herramienta de conversión *GenerateGeodatabaseFromExcel*.

Para el cálculo de las cuencas visuales, además de la ubicación de los puntos de observación, es necesario un modelo digital del terreno que de información sobre la cota de cada punto del territorio de la zona de interés. Para ello se utilizó el MDT del Centro Nacional de Información Geográfica de 5 m de resolución, sistema de referencia ETRS89 y proyección UTM, seleccionando las hojas topográficas del área de trabajo.

Una vez cargados los puntos de observación y el MDT, se procede al cálculo de las cuencas visuales para cada uno de los puntos de observación elegidos. Para ello se utiliza la herramienta de geoprocesamiento *Viewshed* que determina las ubicaciones de superficies de ráster visibles a un conjunto de entidades de observación, utilizando como parámetros el punto de observación y el fichero raster con el MDT. La salida de esta herramienta es un nuevo fichero raster binario, diferenciando de este modo las zonas visibles desde el punto de observación de las no visibles y por tanto obteniendo la cuenca visual del punto.

RESULTADOS

En la zona de trabajo se han localizado un total de 16 observatorios que representan el 1,87 % del total de las construcciones localizadas, distribuyéndose 11 en el campo nacional y 5 en el republicano.

Para establecer la bondad del método se han elegido un par de observatorios de cada bando. Los del bando

rebelde, ATY-011 y LMR-042, se localizan en los conjuntos defensivos de Atalaya (Valdemaqueda) y Los Morros (Robledo de Chavela), mientas que los del bando gubernamental, SBA-001 y NVS-013, corresponden a San Benito Alto y Las Mesetas-Navalespino (ambos en Santa María de la Alameda).

El observatorio ATY-011 (390971/4488858/1369) es una obra cuadrangular de 4x3 m, de mampostería con mortero de cemento, ubicada en el cerro La Atalaya, en la zona occidental del área de estudio (Fig. 1A).

El observatorio LMR-042 (399054/4484580/1066) se localiza en el bode suroriental de la zona del estudio, controlando las posiciones republicanas al E de Robledo de Chavela y próximas a Fresnedillas de la Oliva. Es un observatorio rupestre o "en caverna", construido bajo dos grandes "bolos" graníticos (Fig. 1B) y que contaba con un amplio campo de observación (Fig. 1C).

El observatorio republicano SBA-001 (397139/4489994/1601) es una obra cuadrangular de mampostería en seco, de 6,50x5m, con la pared trasera apoyada en un afloramiento rocoso (Fig. 1D). En el centro presenta un pilar de piedras cuadradas talladas, para sujetar el techo. Por sus características de construcción, en la pared N se encuentra una chimenea francesa (dadas las condiciones climáticas tan extremas), puede haberse utilizado temporalmente como vivienda; aunque su misión de observación es indudable (está documentado su uso como observatorio de artillería), dado el inmenso campo visual que abarca al estar emplazado en la cumbre del Cerro de San Benito, en la parte oriental del frente. Es el más elevado de los 16 observatorios de esta zona del frente.

El observatorio NVS-013 (392174/4492925/1342) se localiza al O de Valdespino y de Santa María de la Alameda, puesto de mando de la columna gubernamental del Coronel Mangada. Es una obra circular (2,30 m de Ø) de sillares de granito con cemento, acceso trasero a trinchera de fábrica y puerta con dintel. Presenta una tronera y vestigios de techo blindado, al estilo de los Fortines del 5º Regimiento. Estaba muy próximo al frente enemigo, del que le separaba únicamente el río Cofio.

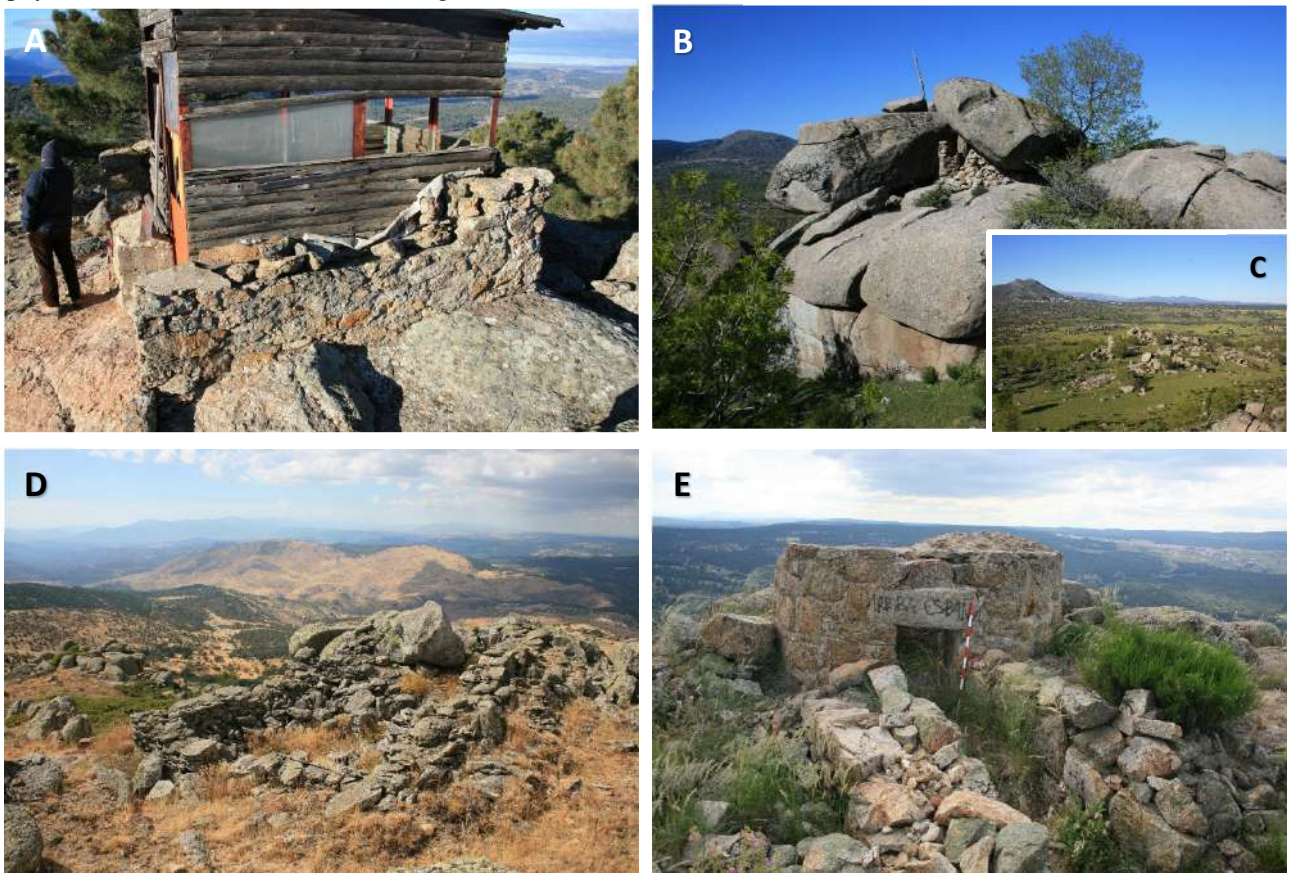


FIGURA 1. *Observatorios evaluados en el trabajo: A). El ATY-011, en la actualidad transformado en una caseta de vigilancia contra incendios. B). El LMR-042es una obra muy sencilla, pero con un amplio campo de observación (ver C). D). Aspecto deteriorado del SBA-001. E). EL NVS-013 se encuentra en bastante buen estado constructivo, aunque ya ha sufrido actos vandálicos (en forma de grafitis), como algunas de las obras estudiadas.*

CONCLUSIONES

En el apartado de Metodología se ha explicado que la aplicación del análisis de cuencas visuales, se hacía para evaluar si era una técnica que, en trabajos como el que aquí se presenta con un gran número de obras constructivas militares y con aunsencia, en muchos casos, de la documentación oportuna para demostrarlo, podía aportar información sobre los campos de visión reales de diferentes puntos que hubiesen podido corresponder a observatorios militares.

Los resultados, como se constata en la Fig. 2, hablan por si mismos y nos van a permitir profundizar en el uso de esta técnica así como aprovechar una mayor información que de su uso se puede extraer; no sólo en trabajos asociados con frentes de guerra, como el caso que aquí se trata, sino también en el análisis de los emplazamientos de muchas de las obras que corresponden al patrimonio arquitectónico defensivo, como: castillos, torres de vigilancia, oppida, etc., donde van a ser fundamentales en un futuro muy próximo.

REFERENCIAS

Baltuille Martín, J.M., Schnell Quiertant, P. y Rubio Pascual, F.J. (2022). Geología, paisaje y materiales pétreos empleados en los elementos defensivos de la Guerra Civil Española (1936-1939), Sierra de Guadarrama, sector suroccidental. Instituto Geológico y Minero de España (informe inédito), 300 pp. Madrid.

Baltuille Martín, J.M., Schnell Quiertant, P. y Rubio Pascual, F.J. (2023). Las construcciones defensivas de la Guerra Civil Española en el Frente de la Sierra (Subsector de Peguerinos-Robledo de Chavela). Su relación con la Geología y el Paisaje. Diputación de Ávila, 447 pp. Madrid. ISBN: 978-84-09-53113-4.

Colucci, M.F., Baltuille, J.M. y Gisbert, J. (2007). Canteras históricas de Aragón: Recursos para la restauración. *MACLA*, 7, 87. Madrid. ISSN: 1885-7264.

Schnell Quiertant, P. y Baltuille Martín, J.M. (2017). Arqueología de la fortificación de la Guerra Civil y asociacionismo en los frentes de Madrid. *Trabajos de Arqueología de Navarra*, 29, 169-202. ISSN: 0211-517

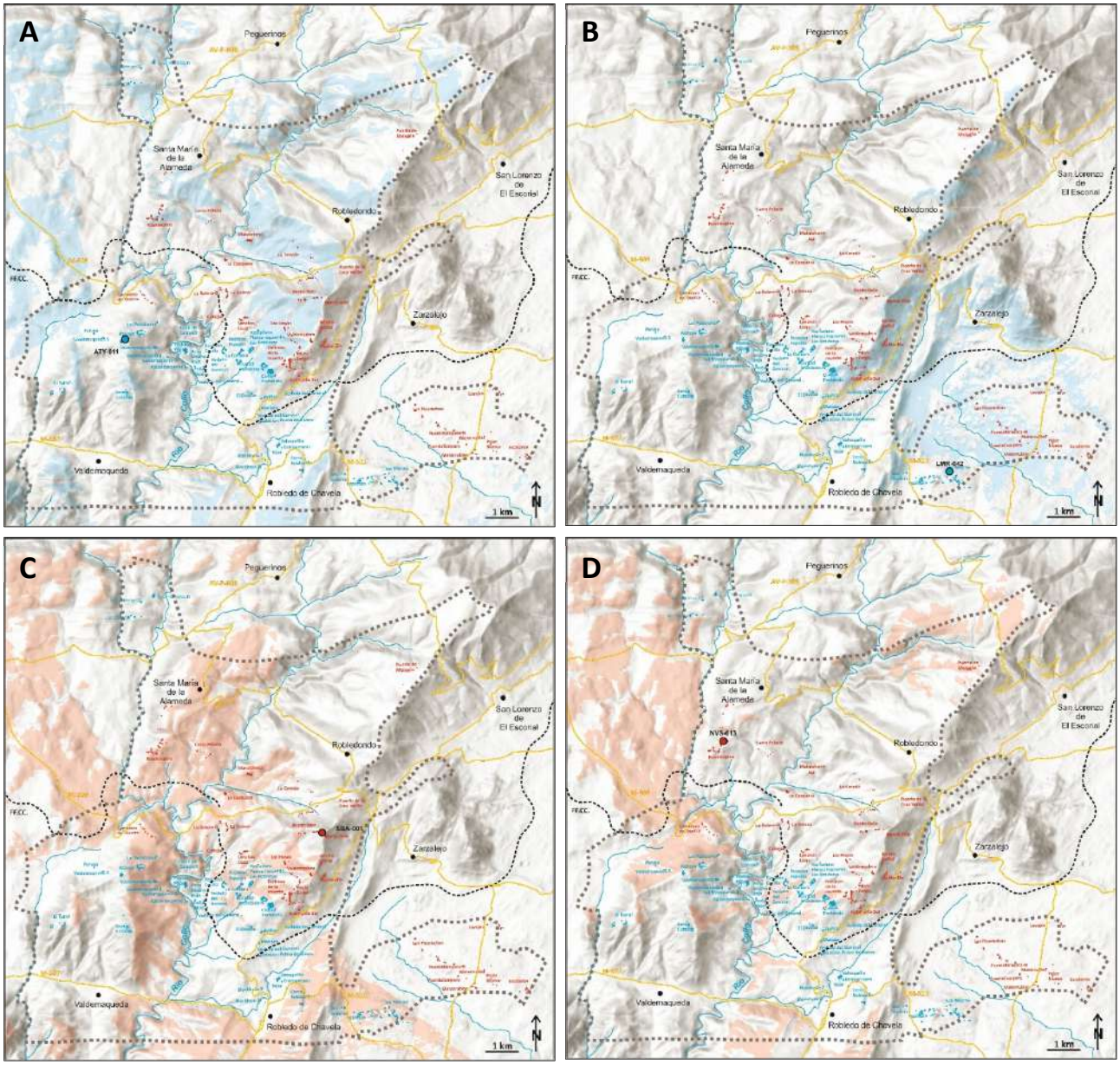


FIGURA 2. *Representación de las cuencas visuales generadas de los observatorios ATY-011 (A), LMR-042 (B), SBA-001 (C) y NVS-013 (D), donde se puede apreciar el alto grado de campo visual que cada uno tiene, tanto del frente enemigo como del propio, de cara a evitar ataques por la retaguardia.*

Caracterización de revestimientos cerámicos del patrimonio histórico: Plaza de España (Sevilla)

Characterization of ceramic tilework in architectural heritage: Plaza de España (Seville)

C. Barba-Brioso[1], L. Toro[2], P. Campos[1], D. Martín[1], J. Delgado[1], A. Romero-Baena[1], A. Miras[1], P. Ortiz[2], I. González[1].

1 Dpto. Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química, Universidad de Sevilla 41012 Sevilla. cbarba@us.es, dmartin5@us.es, jdelgado15@us.es, aromero@us.es, amiras@us.es, pcampos1@us.es.
2 Dpto. de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad Pablo de Olavide 41013 Sevilla. ltormur@upo.es, mportcal@upo.es.

Palabras clave: azulejos, conservación, cerámica, vidriado, Plaza de España.

Resumen

La Plaza de España (Sevilla) es un lugar singular del patrimonio sevillano construida para la Exposición Iberoamericana de Sevilla de 1929. Los azulejos de la mayoría de los bancos y paños que representan las diferentes provincias españolas se han ido restaurando gradualmente en función del deterioro ambiental o el vandalismo. El objetivo principal de este trabajo ha sido el estudio de las composiciones de azulejos y sus esmaltes. Se ha estudiado la composición mineralógica y química, mediante difracción y microfluorescencia de rayos X y por microscopía electrónica. Además, se están estudiando piezas expuestas mediante las mismas técnicas en equipos portátiles, con objeto de determinar su fiabilidad para estudios de materiales cerámicos del Patrimonio Cultural.

Los resultados indican que los bizcochos están compuestos principalmente por 16-30 % diópsido, 22-28 % cuarzo, 13-17 % gehlenita, 8-15 % wollastonita, 9-12 % plagioclasa, <15 % ortosa, y <9 % calcita, apareciendo hematites e illita siempre como fases minoritarias. Estos resultados confirman la utilización de arcillas comunes carbonatadas, típicas en yacimientos de la vega del Guadalquivir, en el entorno de Sevilla, como Santiponce o Dos Hermanas. El estudio combinado de los esmaltes mediante SEM-BSE y µFRX revela amplios rangos composicionales en los elementos mayoritarios (20-53% de PbO_2, 1-17% de SnO_2) y presencia de numerosos metales pigmentantes en cantidades accesorias (Fe, Mn, Cr, Ti, Cu, Co, Zn y Zr). Esto confirma el uso común en la época de vidriados plumbo estanníferos.

Abstract

Plaza de España (Seville) is a unique site in Seville's heritage, built for the 1929 Ibero-American Exposition of Seville. The tiles on most of the benches/panels representing different provinces have been gradually restored based on environmental or human deterioration. The main objective of this work has been the study of tile compositions and their glazes. The mineralogical and chemical composition has been determined using X-ray diffraction and microfluorescence, as well as electron microscopy. Additionally, pieces on display are being studied using the same techniques with portable equipment to determine their reliability for studies of ceramic materials in Cultural Heritage.

The results indicate that the biscuits are primarily composed of 16-30 % diopside, 22-28 % quartz, 13-17 % gehlenite, 8-15 % wollastonite, 9-12 % plagioclase, <15 % orthoclase, and <9 % calcite, with hematite and illite appearing as minor phases. These results confirm the use of common carbonated clays, typical in deposits of the Guadalquivir valley, in the surroundings of Seville, such as Santiponce or Dos Hermanas. The combined study of the glazes using SEM-BSE and µXRF reveals wide compositional ranges in the major elements (20-53% PbO2, 1-17% SnO2) and the presence of numerous pigmenting metals in accessory quantities (Fe, Mn, Cr, Ti, Cu, Co, Zn, and Zr). This confirms the common use at the time of lead-tin glazes.

Cruces de piedra en la Galicia medieval

Stone crosses in the medieval Galicia

S. Brangi

Università di Pisa, Facoltà di Civiltà e Forme del Sapere, Lungarno Pacinotti 43, 56126 Pisa (Italia). brangisarah@gmail.com

Resumen: En este artículo se ha querido exponer una pequeña parte de un estudio más amplio cuyo objetivo principal es el estudio arqueológico, material y productivo de las cruces de camino medievales de Galicia. La metodología adoptada ha implicado un planteamiento analítico y objetivo de los *cruceiros*, para luego continuar con un análisis iconográfico de los mismos, permitiendo hipotetizar su cronología y reconstruir de este modo el posible origen y mecenazgo de dichas cruces. Además, ha sido posible integrar un análisis macroscópico de los materiales, observando sus rasgos texturales, color, constituyentes minerales, tamaño de grano, etc., individualizando los diferentes afloramientos graníticos próximos a las zonas donde se encuentran hoy en día las cruces de piedra analizadas. Este estudio material pretende ser una investigación inicial de análisis futuros que puedan confirmar o profundizar de manera científica las hipótesis empíricas realizadas hasta ahora, analizando posiblemente el material mediante el estudio petrológico de muestras graníticas.

Palabras clave: Cruces de camino, *cruceiros,* granito, época medieval.

Abstract: *In this article we condense a small part of a broader study main whose objective is the archaeological, material and productive study of medieval crossroads from Galicia. The methodology adopted has involved an analytical and objective approach to the crosses, and then continues with an iconographic analysis of them, allowing us to propose an adequate chronology and thus reconstruct the possible origin and patronage of these crosses. In addition, it has been possible to integrate a macroscopic analysis of the materials to study their textural features, color, mineral constituents, grain size, etc., identifying the different granite outcrops nearby the areas that still preserve the stone crosses analyzed today. This material study carried out at the macroscopic level is intended to be a preliminary research for future analyses that can scientifically confirm or deepen the empirical hypotheses made so far, possibly analyzing the material through the petrological study of granitic samples.*

Key words: *Crossroads, cruceiros, granite, Middle Ages.*

INTRODUCCIÓN

Los resultados expuestos son el fruto de meses de investigación arqueológica, material y tipológica sobre cruces de camino medievales que todavía se conservan en Galicia.

A pesar de la longeva tradición y producción de los *cruceiros*[1] en Galicia (se cuentan más de 10.000 ejemplares en el territorio), nunca se han realizado estudios a nivel material, arqueológico o geológico en el ámbito académico. Casi toda la bibliografía es fruto de intereses de eruditos del siglo XX (un gran referente es A. R. Castelao) o de estudiosos no académicos que dedicaron su tiempo al análisis, sobre todo etnográfico, de estas cruces de piedra. Muy interesante es el estudio de Carreño (2019), que realizó un análisis de "la imagen del crucificado", dedicando un capítulo al estudio artístico de algunos *cruceiros* medievales gallegos (Carreño, 2019).

OBJETIVO Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El principal objetivo de este estudio es el análisis material y productivo de las cruces de camino gallegas realizadas en granito durante la época tardomedieval.

La metodología adoptada ha implicado un planteamiento analítico y objetivo de los *cruceiros*, para luego continuar con un análisis iconográfico de los mismos, permitiendo así (dada la carencia de documentos) proponer una cronología aproximada y reconstruir un posible mecenazgo.

Cabe precisar que el análisis predominante realizado es el arqueológico y, utilizando la interacción de diferentes disciplinas, ha sido posible integrar un análisis macroscópico de los materiales observando los rasgos texturales, color, constituyentes minerales, tamaño de grano, etc., y realizar un estudio de los distintos afloramientos graníticos presentes en el territorio gallego y próximos a la zona de origen (hipotética o documentada) de los *cruceiros* analizados.

[1] Término gallego utilizado para indicar las cruces de camino presentes en el territorio de Galicia.

Durante este estudio se han individualizado 8 ejemplares atribuibles a los siglos XIV y XV, tratándose en esta publicación únicamente el más antiguo.

LAS CRUCES DE CAMINO

Entre la época tardo antigua y medieval, con la difusión del cristianismo, se asiste en Europa a una gradual sustitución de las señales de piedra paganas por simples cruces colocadas sobre bloques de piedra que servían para indicar límites territoriales, cruces de caminos o para señalar la cercanía de cementerios, iglesias, monasterios o ciudades.

A partir de los siglos VII-VIII se empiezan a realizar cruces de piedra sobre altas columnas líticas, dando origen a la difusión de las denominadas "cruces de camino", presentes en un primer momento en Gran Bretaña e Irlanda, para después difundirse con gran éxito en Francia, España, Italia, Alemania, etc.

Parece ser que la actividad de monjes itinerantes y la presencia de múltiples vías de comunicación (principalmente los caminos de peregrinación hacia Santiago de Compostela, Roma y Jerusalén) hayan jugado un papel fundamental en la difusión y producción de estos ejemplares.

Como he dicho anteriormente, en este artículo se hablará en particular de las cruces de camino gallegas, los *cruceiros*.

LOS *CRUCEIROS* Y EL GRANITO

En Galicia tradicionalmente se considera *cruceiro* una cruz de piedra (normalmente con figuras esculpidas en la parte anterior y posterior de la cruz) que está elevada sobre una plataforma o escalones, que sostiene un varal y un capitel. La materia prima utilizada para la realización de un *cruceiro* en Galicia es el granito (Fig. 1).

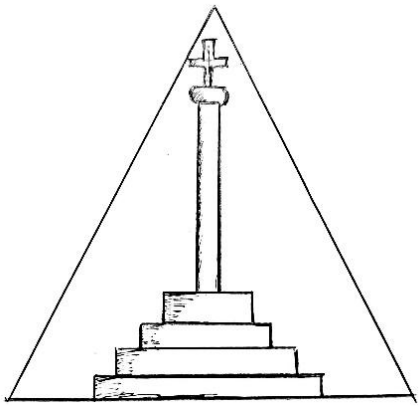


FIGURA 1. *Dibujo que representa la estructura estándar de un cruceiro. (Fuente: elaboración propria)*

Desde la antigüedad, y también en época medieval, se solían utilizar las materias primas presentes en el territorio o a pocos kilómetros de distancia de las poblaciones. Así ha sido el caso de Galicia, que ha visto una explotación de las canteras graníticas desde la época prerromana (Arias Ferrero, 2008), siendo este el material edil más abundante en el territorio (de los 29.574 Km^2 de superficie de la región, el 37% es de naturaleza granítica) (Arias Ferrero, 2008).

Además, la distribución de la superficie granítica se concentraba sobre todo en zonas limítrofes a las vías de comunicación terrestres, marítimas y fluviales, garantizando una mayor extracción y difusión de este material.

En el territorio gallego han sido localizadas canteras históricas de diferentes dimensiones, pero nunca se han estudiado la posible relación entre estas y los *cruceiros* medievales presentes en el territorio. Sería muy interesante en un futuro poder profundizar en el estudio productivo y material de estas cruces de piedra tan importantes e identitarias para la tradición y el patrimonio cultural del territorio.

LA REALIZACIÒN DE UN *CRUCEIRO*

En época medieval la realización de un *cruceiro* preveía diferentes fases que podemos simplificar de esta manera: extracción, elección del tipo de granito, transporte, trabajo del bloque de piedra y posicionamiento de las diferentes partes que forman el *cruceiro*.

Los canteros activos en los proyectos edilicios de la ciudad, como iglesias, edificios o puentes, muchas veces tenían libre acceso a las canteras locales. En otras ocasiones los entes laicos o eclesiásticos poseían parcelas de canteras locales que podían explotar libremente. Probablemente muchas de estas cruces de piedra medievales fueron comisionadas por monasterios o conventos y realizadas con el material presente en las canteras limítrofes por canteros locales, aunque no se excluye la posibilidad de la presencia de canteros forasteros.

El tipo de granito elegido para la realización de la cruz, parte más delicada e importante del *cruceiro*, tenía que ser de grano fino, más fácil de trabajar a la hora de realizar las figuras en relieve presentes normalmente en ambas caras. También la dirección de las superficies de enfriamiento del bloque de piedra tenía que ser respetada para poder trabajar correctamente el granito y así evitar la ruptura del bloque (Gómez Canales, 2008).

El uso del granito para la realización de estos monumentos, además de ser un material económico por su abundancia en el territorio, garantizaba, por su dureza, la conservación y durabilidad de la obra.

Antes del siglo XV, los *cruceiros* gallegos (el más antiguo se remonta a la segunda mitad del siglo XIV) parecen no seguir ningún esquema estándar a nivel iconográfico ni tipológico. Normalmente la parte anterior presentaba siempre la escena de la "Pasión", mientras que en la parte posterior había una mayor libertad iconográfica según los gustos y requisitos de los mecenas. A partir del siglo XVI se asiste a una

estandarización iconográfica, con una mayor presencia de la figura de la "Virgen con el niño" en la parte posterior de la cruz.

La producción de *cruceiros* en Galicia, y en otros territorios de España, se mantuvo ininterrumpidamente hasta el día de hoy. Mientras ahora se usan grúas mecánicas, colas químicas y tornillos de acero inoxidable, en época medieval se solían utilizar grúas y pinzas de madera o metal para el levantamiento de las diferentes partes del *cruceiro*, unidas unas a las otras siguiendo el antiguo sistema de encaje macho-hembra.

EL CRUCEIRO MÁS ANTIGUO DE GALICIA

Tradicionalmente el *Cruceiro de Melide* es considerado el más antiguo de Galicia. Hoy en día se encuentra en la Plaza de San Roque, en Melide (A Coruña), en el cruce de dos caminos muy importantes para la Cristiandad: el Camino primitivo y el Camino francés (Fig. 2). Los estudiosos aún no se han puesto de acuerdo sobre la ubicación originaria del *cruceiro*, quizás provenga del antiguo monasterio de *Sancti Spiritu* de Melide, construido en el siglo XIV.

El material utilizado, como hemos dicho anteriormente, es el granito. A pesar de las dificultades encontradas para el estudio del material, se ha realizado un análisis macroscópico del área geológica próxima a la ciudad de Melide basándose en los datos obtenidos de los estudios realizados por el IGME (2008).

Los dos tipos de afloramiento granítico presentes en el área de Melide son el denominado "Macizo de Agolada – Palas de Rei" y el "Macizo de Chantada - Taboada" cuyas características se resumen en la Tabla I.

Características	Macizo de Agolada Palas de Rei	Macizo de Chantada Taboada
Tipología	Granito de dos micas	Granito biotitico
Tamaño de grano	Fino	Medio/grueso
Color	Gris claro	Gris oscuro

TABLA I. *Características del granito en el área próxima a Melide.*

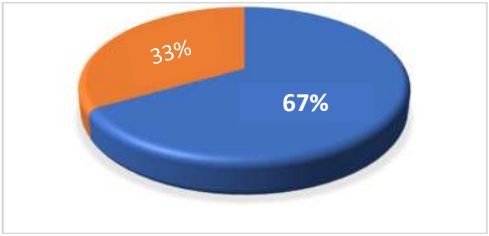


FIGURA 2. *Gráfico que resume la relación entre las cruces de camino gallegas y las vías de peregrinación. A (naranja): el 33% de las cruces medievales analizadas no tienen una aparente relación con los caminos de Santiago. B (azul) el restante 67% ha manifestado una estrecha relación con los caminos de Santiago.*

Además, se señalan algunas de las canteras históricas localizadas cerca de la ciudad de Santiago de Compostela (a pocos kilómetros de Melide) utilizadas en época medieval para la realización de obras urbanas y los kilómetros de distancia entre estas canteras y la ciudad de Melide. De esta manera se puede observar un hipotético cuadro de recursos materiales que pudieron ser utilizados para la realización del *cruceiro* de Melide (Tabla II).

Se presentan diferentes escenarios de los afloramientos graníticos próximas a los lugares donde se encuentran las cruces de camino medievales con la intención de preparar las bases para estudios futuros que puedan constatar, de manera científica, el origen de los materiales utilizados para la realización de los *cruceiros* gallegos (Figura 3).

Canteras históricas	Distancia desde Melide (Km)
Vidán	46
Conxo	45
Vrins	46
Eiripedriña	51
Rocha Vella	47
Aradas	45
Queiroal	44

TABLA II. *Tabla que indica la distancia entre las canteras históricas localizadas cerca de Santiago de Compostela y la ciudad de Melide. En verde la cantera más cercana.*

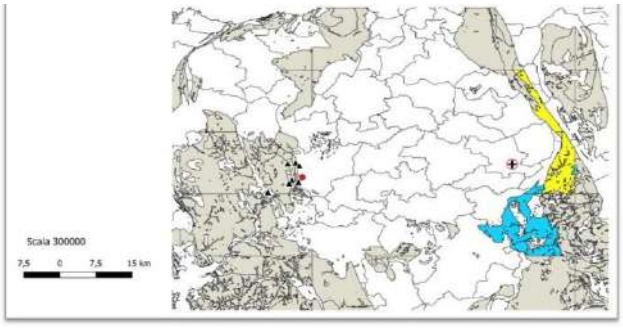


FIGURA 3. *Carta de distribución de la superficie granítica en el área de la provincia de A Coruña. La cruz indica el cruceiro de Melide, en amarillo y azul los afloramientos graníticos limítrofes al área interesada, mientras los triángulos negros indican las canteras históricas localizadas cerca de la ciudad de Santiago de Compostela. (Fuente afloramientos graníticos:copyright IGME-XUNTA de Galicia. Dataset de las cruces de piedra: elaboración propria)*

PRODUCCIÓN E ICONOGRAFÍA

Otro aspecto de fundamental importancia para el estudio de una obra medieval es la comprensión de los diferentes instrumentos utilizados para la realización y las metodologías adoptadas.

Para la producción de un *cruceiro*, después de una primera fase de desbaste del bloque de granito, utilizando cinceles y punteros, se pasaba a la realización de la forma de la cruz y sus relieves, para después eliminar cualquier traza de los instrumentos utilizados mediante la limadura de la superficie con piedra pómez.

La mayoría de los instrumentos utilizados, como los punteros y cinceles de diferentes tamaños, eran aplicados indirectamente sobre la superficie lítica mediante la percusión de una maza redonda típica de Galicia y Portugal.

En el caso particular del *cruceiro* de Melide, solamente la cruz sería reconducible a la época medieval, mientras que los otros componentes serían de épocas más recientes. La cruz se ha obtenido de un único bloque de granito que presenta actualmente un color gris oscuro y se caracteriza por poseer cinco figuras en alto relieve, cuatro en la parte anterior de la cruz y una en la posterior.

En la parte anterior se observa la representación de la "Pasión de Cristo" con tres figuras colocadas a los lados de Jesús: probablemente María (a la izquierda y con las manos unidas a la altura del pecho), María Magdalena (a los pies de María, de rodillas con las manos unidas a la altura del pecho y con la mirada dirigida hacia Jesús) y San Juan (a la derecha y con un libro en la mano).

En la parte posterior se puede observar la imagen triunfadora de la *Maiestas Domini*, Cristo con la corona de diamantes sentado en un rico trono.

Actualmente el *cruceiro*, como casi todos los ejemplares estudiados, se encuentra en un estado de conservación muy precario, debido también a la falta de tutela de este tipo de monumentos, colocados en plazas y calles sometidos a los agentes atmosféricos, como humedad, lluvias, frío, etc., y el desarrollo de bacterias, musgos, líquenes, etc. que forman patinas biológicas alterando el estado de la piedra y poniendo en peligro su correcta conservación.

A través del estudio iconográfico del *cruceiro*, se considera interesante exponer una reflexión sobre el tipo de mecenazgo asociado al mismo. El particular protagonismo de la imagen del Cristo, presente en la parte anterior y posterior de la cruz, así como la ausencia de la imagen de María, generalmente central en la cara posterior de los *cruceiros*, me ha hecho pensar en un posible mecenazgo en ámbito franciscano. Esta orden mendicante ha sido una de las mayores promotoras de la difusión de este tipo de monumentos en Europa y además está estrechamente ligada a la imagen del Cristo. Esta reflexión nos aproxima hacia la tesis de algunos estudiosos que han visto el convento franciscano de *Sancti Spiritu* como posible sede originaria de la cruz.

CONCLUSIONES

En este artículo se condensa una pequeña parte de un estudio más amplio que tiene como objetivo principal el análisis arqueológico de las cruces de camino medievales en Galicia.

Dada la carencia de estudios en ámbito académico, he querido proponer un análisis macroscópico de los afloramientos graníticos cercanos a las zonas consideradas originarias de las cruces analizadas, que se remontan a los siglos XIV y XV. Este primer análisis empírico pretende ser un estudio inicial de análisis futuros que podrían ser realizados analizando directamente las muestras seleccionadas en las cruces y correlacionarlas con el material explotado en las diferentes canteras históricas cercanas que puedan confirmar o profundizar de manera científica las hipótesis empíricas realizadas hasta ahora.

Así mismo, se desarrolla el análisis de la producción de las cruces de camino gallegas y las diferentes técnicas empleadas para su realización, para terminar con un análisis iconográfico fundamental para la reconstrucción histórica de estos monumentos que arriesgan convertirse en "obras mudas".

Se concluye con una reflexión sobre la tutela de estos monumentos, aún hoy en día identitarios para la tradición gallega. La falta de su musealización favorece la comprensión del significado simbólico y cultural que han tenido las cruces de camino desde la época medieval, conservando el vínculo con el contexto originario para el que fueron creadas. Por otro lado, vemos que la falta de tutela y conservación están provocando el deterioro de estas obras medievales, sufriendo daños en muchos casos irreversibles. Los líquenes por ejemplo contribuyen a la disgregación y ruptura de la piedra granítica.

Este es, sin duda, un argumento que, en un futuro, no muy lejano, tendría que ser afrontado.

AGRADECIMIENTOS

Querría agradecer a Enrique Álvarez Areces el gran apoyo que en estos meses de trabajo e investigación me ha ofrecido; si este articulo hoy ve la luz es, sin duda, gracias a él. También querría dar las gracias a mi profesor Riccardo Belcari, que creyó en mí dándome la oportunidad de poder realizar un estudio para mi tesis de fin de carrera fuera de los límites territoriales italianos, permitiéndome estudiar una realidad arqueológica que llevo en el corazón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arias Ferrero A., Fernández Suárez J., Rubio Navas J., Cardán Pérez F., Baltuille Marín J. M. (2008): *Mapa de rocas y minerales industriales de Galicia.* IGME, Madrid, pp.232-266.

Carreño López S. (2019): *La imagen escultórica del crucificado en la Galicia del siglo XIV. Tipos usos y significados*. Santiago de Compostela, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago, p. 443.

Gómez Canales F. (2008): *Manual de cantería.* Palencia, editorial Fund. Santa Maria la Real. Centro de estudios del Románico, p. 167.

Servizo galego de saude 2015, *Saude-publica- GIS – Xeografia – fisica*, <https://www.sergas.es/Saude-publica/GIS-Xeoloxia >, 22 junio 2023.

Patrimonio pétreo de la ciudad de Oviedo, Asturias

Heritage Stone of Oviedo city, Asturias

V. Cárdenes[1], R. Navarro[2], F.J. Mateos[1]

1 Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo, Spain cardenesvictor@uniovi.es, mateosfelix@uniovi.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Rey Abu Said, 4, 18006 Granada, Spain r.navarro@igme.es

Palabras clave: piedra patrimonio, laspra, piedramuelle, Oviedo, patrimonio.

Resumen

La ciudad de Oviedo, capital de la comunidad autónoma de Asturias, atesora una extensa historia que se remonta a los tiempos del bajo Imperio Romano, en el siglo IV d.C. Las distintas sociedades y culturas que se sucedieron a lo largo de los siglos formaron un rico patrimonio arquitectónico, realizado en su totalidad con piedras de las canteras locales (Gutierrez-Claverol et al. 2013). Los dos litotipos más representativos son la caliza de Piedramuelle, y la dolomía de Laspra, ambas extraídas desde mediados de la Alta Edad Media hasta principios del siglo XX. La caliza de Piedramuelle es una caliza bioclástica, con proporción variable de arena, en la que se pueden diferenciar dos facies en función del tamaño de grano. Por su parte, la dolomía de Laspra es una roca con textura microcristalina.

Ambas rocas tienen una gran representación en el patrimonio arquitectónico de Oviedo, siendo componentes principales de edificios tales como la Catedral, el Palacio de Camposagrado, el edificio histórico de la Universidad, o el Palacio de Valdecarzana. Estas rocas han impregnado y dado forma a la arquitectura que caracteriza la ciudad. Es por ello que me (Esbert & Marcos, 1983). recen ser valoradas y puestas en valor, ya que constituyen parte del patrimonio histórico de la ciudad.

Abstract

The city of Oviedo, capital of the autonomous community of Asturias, treasures an extensive history that dates back to the times of the low Roman Empire, in the 4th AD. The different societies and cultures that succeeded one another over the centuries formed a rich architectural heritage, made entirely with stones from local quarries (Gutierrez-Claverol et al. 2013). The two most representative lithotypes are the Piedramuelle limestone and the Laspra dolomite, both quarried from the middle of the High Middle Ages until the beginning of the 20th century. The Piedramuelle limestone is a bioclastic limestone, with variable proportion of sand, in which two facies can be differentiated according to grain size. On the other hand, the Laspra dolomite is a rock with a microcrystalline texture.

Both rocks have a great representation in the architectural heritage of Oviedo, being main components of buildings such as the Cathedral (14th-16th), the Palace of Camposagrado, the historic building of the University, or the Palace of Valdecarzana (Esbert & Marcos, 1983). These rocks have impregnated and shaped the architecture that characterizes the city. That is why they deserve to be valued and put in value, as they are part of the historical heritage of the city.

Referencias

Esbert, R. M. y Marcos, R.M. (1983). *Las piedras de la Catedral de Oviedo y su deterioración*. Ed. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias.

Gutierrez-Claverol, M., Luque, C., Pando, L.A. (2013). *Canteras históricas de Oviedo.* Ed. Hércules

Agradecimientos

Proyecto MINCE (ID proyecto 000X), financiado por el MITERD.

Evaluación de la variación composicional de rocas carbonáticas de uso ornamental mediante el empleo de técnicas espectroscópicas.

Assessment of compositional variation in ornamental carbonate rocks using spectroscopic techniques.

J. A. Cruz[1], I. Coronado Vila[1], M. Ferrer-Julià[1], A. Espín de Gea[2], E. Colmenero-Hidalgo[1], I. Pereira[1] y E. García-Meléndez[1]

1 Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León. Campus de Vegazana, s/n, 24071, León, España. jcrum@unileon.es
2 Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales (CTM). Ctra. de Murcia s/n. 30430, Cehegín (Murcia, España). antonio.espin@ctmarmol.es

Palabras clave: espectroscopía VNIR-SWIR, FTIR, Piedra Natural, análisis composicional, carbonatos.

Resumen

Las rocas carbonatadas son materias primas en el sector de la Piedra Natural y son las segundas con mayor volumen de extracción en España por detrás de la pizarra (Trio y Ortuño, 2019). Dentro de dicho sector, la explotación de las rocas carbonatadas está regulada por una normativa que define propiedades físicas y/o químicas que deben cumplir al iniciar su extracción (Herrera, 2007). Sin embargo, al tratarse de un material natural, las características composicionales pueden variar considerablemente conforme avanza la extracción en el frente de cantera. Este trabajo presenta la caracterización de rocas procedentes de diferentes explotaciones de Piedra Natural de Murcia, con el fin de conocer su variabilidad química. Se han analizado las muestras de distintas canteras con espectroscopía de reflectancia difusa y espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier, y se ha caracterizado su mineralogía y composición química mediante difracción de rayos X. Los resultados muestran que la espectroscopía de reflectancia difusa permite conocer la variabilidad geoquímica de la roca de manera rápida e *in situ*, lo que la convierte en una tecnología útil para optimizar la explotación de las canteras.

Abstract

Carbonate rocks are raw materials in the Natural Stone sector, being the second with the highest extraction volume in Spain behind slates (Trio and Ortuño, 2019). Within this sector, the exploitation of carbonate rocks is regulated by standards that define physical and/or chemical properties that must be met at beginning of its extraction (Herrera, 2007). However, as it is a natural material, the compositional characteristics can vary considerably as the extraction progresses, at the quarry front, and, therefore, also the initially defined characteristics. This work presents the characterization of rocks from different Natural Stone exploitations of Murcia, to know their chemical variability. Samples from different quarries have been analyzed with diffuse reflectance spectroscopy and Fourier transform infrared spectroscopy. Mineralogy and chemical composition have been characterized by X-ray. The results reveal that optical proximity sensors allow to know quickly and *in situ* the geochemical variability of the rock, which makes it a useful technology to optimize the exploitation of quarries.

Referencias

Herrera Herbert, J. (2007). *Explotaciones de Roca Ornamental. Diseño de explotaciones y selección de maquinaria y equipos*. Univ. Politécnica de Madrid. doi: 10.20868/UPM.book.21840.

Trio Maseda, M. y Ortuño, M. G. (2019). *Panorama Minero 2018-20*. Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, España, 732 p.

Agradecimientos

Proyecto HYPOPROCKS (PDC2021-121352-100) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR.

La roca local y la singularidad del paisaje urbano: calizas de Bizkaia

Local stone and the singularity of the urban landscape: Biscay limestones

L. Damas Mollá[1], A. Aranburu[1], A. Bodego[1], M. Ladron de Guevara[1], J. Arbulu[1], A. Franco[2], A. Epelde[2], I. Antiguedad[1] y J.A. Uriarte[1]

1 Grupo Procesos Hidroambientales (IT-1678/22), Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU. Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, Bizkaia. laura.damas@ehu.eus
2 Dpto. de Recursos Geológicos, Dpto. de Desarrollo e Innovación del EVE. Urkixo Zumarkalea, 36 - 1. Bizkaia Plaza Eraikina 48011 Bilbao.

Palabras clave: rocas locales, paisaje urbano, Rojo Ereño, Negro Markina, Gris Mañaria

Resumen

El uso de la roca local en construcciones define, en gran medida, el paisaje urbano y le aporta un carácter distintivo. Los materiales de construcción han ido variando a lo largo de la historia. Mientras que los cascos históricos de las villas están construidos con rocas del entorno, en los últimos tiempos las rocas son utilizadas como un material decorativo que imprimen un cierto grado de exclusividad. La globalización ha traído consigo la posibilidad de utilizar litologías exóticas. En muchos casos, la roca local se sustituye por otros materiales, pétreos o no. Este hecho conlleva la pérdida de la singularidad de las urbes para convertirse en ciudades cliché definidas por las corrientes estéticas del momento.

La realización de inventarios de las variedades de roca local permite la creación de bases de datos que sirven para, al menos: i) caracterizar el tipo de rocas utilizadas a lo largo del tiempo en la ampliación de las ciudades; y ii) ser conscientes de la pérdida de identidad que conllevan las reformas que eliminan las rocas locales del paisaje urbano. En este sentido se ha realizado un proyecto piloto de caracterización de las principales calizas utilizadas como rocas ornamentales y de construcción de la provincia de Bizkaia (País Vasco): Rojo Ereño, Negro Markina y Gris Mañaria. El estudio se ha llevado a cabo en el Casco Viejo de Bilbao y su Ensanche, en Gernika, en algunas poblaciones importantes de la provincia y en los pueblos de origen de dichas litologías (Ereño, Gautegiz-Arteaga, Markina y Mañaria). Los resultados obtenidos en 216 puntos están disponibles en el Portal Geominero del Ente Vasco de la Energía (EVE). Cada emplazamiento está localizado geográficamente, e integra una ficha correspondiente. Se incluirán más emplazamientos con futuras investigaciones y aportaciones ciudadanas.

Abstract

The use of near-source stone in construction defines the urban landscape and gives it a distinctive character. However, building materials have changed throughout history. Avant-garde decorative materials have replaced the local stone used in the growth of historic cities, providing a sense of modernity but also endangering heritage. The substitution of traditional construction stone with exotic lithologies, is, in fact, another result of globalisation. All this leads to the loss of the singularity of the cities, which are shaped with the contemporaneous aesthetic trends, resulting in cliché burgs.

Inventories of local stone varieties allow the creation of databases that are useful for: i) tracking the type of stones used over time in the expansion of cities; and ii) to be aware of the loss of identity caused by reforms that remove local stone from the urban landscape. In this sense, a pilot project has been carried out to characterise the main limestones used as ornamental and construction stones in the province of Biscay (Basque Country): Red Ereño, Black Markina and Grey Mañaria. The study has been carried out in the Old Town of Bilbao and its *Ensanche*, in Gernika, in some important towns in the province and in the towns of origin of these lithologies (Ereño, Gautegiz-Arteaga, Markina and Mañaria). Results incorporating 216 sites of interest are available on the *Portal Geominero* of the *Ente Vasco de la Energía* (EVE). Each site is geographically located in it, and integrates a corresponding file with all the construction elements observed. More sites will be included with future research and citizen contribution.

El desaparecido monumento a Sorolla (Cabanyal, València) y su relación con la fachada de la Fábrica de Platería Martínez (Madrid).

The missing monument to Sorolla (Cabanyal, València) and its relation with the façade of the Fábrica de Platería Martínez (Madrid).

V. Escrivà[1], C. Marín[1] y P. Pascual[1]

1 Servicio de Investigación Arqueológica Municipal, calle Traginers s/n. 46014. Valencia, siam@valencia.es

Resumen: En el año 1933 la ciudad de Valencia levantó un monumento a su insigne pintor Joaquín Sorolla en la playa de Levante, en el límite entre el Cabanyal y la Malvarrosa (València). En la construcción de dicho monumento, y a instancias del Círculo de Bellas Artes, se empleó gran parte del material procedente de la fachada de la Real Fábrica de Platería Martínez de Madrid, que en el año 1920 había adquirido el propio pintor. Desgraciadamente la riada del año 1957 acabó con el monumento. Desde diversos sectores de la ciudad se solicitó la reconstrucción del antiguo "Monumento a Sorolla", y después de muchos años, es ahora, con motivo del centenario de su fallecimiento, cuando se retoma el estudio de viabilidad para erigirlo de nuevo, a ser posible en su emplazamiento inicial.

Palabras clave: Monumento, centenario, Sorolla, playa de Levante, Fábrica Platería Martínez.

Abstract: *In 1933, the city of Valencia built a monument to its famous painter Joaquín Sorolla on Levante beach, on the border between Cabanyal and Malvarrosa (València). In the construction of said monument, and at the request of the Círculo de Bellas Artes, a large part of the material from the façade of the Real Fábrica de Platería Martínez in Madrid was used, which the painter himself had acquired in 1920. Unfortunately, the flood of 1957 destroyed the monument. From various sectors of the city, the reconstruction of the old "Sorolla Monument" was requested, and after many years, it is now, on the occasion of the centenary of his death, when the feasibility study is resumed to erect it again, if possible in its initial location.*

Key words: *monument, centenary, Sorolla, Levante beach, Fábrica de Platería Martínez.*

IINTRODUCCIÓN

Este artículo forma parte del estudio previo sobre el antiguo "Monumento a Sorolla" encargado al Servicio de Investigación Arqueológica Municipal (SIAM) por el Ayuntamiento de Valencia, con motivo del centenario del fallecimiento del pintor valenciano Joaquín Sorolla Bastida. Este estudio se realiza con el fin de evaluar la viabilidad de su posible reconstrucción en la Playa de Levante del Cabanyal, a ser posible en su emplazamiento inicial, contemplando tanto la recuperación, restauración y catalogación de los materiales originales almacenados en dependencias municipales, como la reproducción de aquellos materiales actualmente desaparecidos.

ANTECEDENTES

Tras el fallecimiento en agosto de 1923 del pintor Joaquín Sorolla en Madrid, y trasladado a Valencia para su entierro, cumpliendo sus últimas voluntades, se propuso desde diversos sectores culturales la conveniencia de levantar un monumento a este insigne personaje, pues antes de su fallecimiento había manifestado a su amigo Mariano Benlliure el deseo de que el busto que el escultor le había realizado en mármol, en 1916, formara parte de un monumento en su honor.

El Ayuntamiento, en sesión extraordinaria de 24 de diciembre de 1924, aprobó un dictamen de la Alcaldía que proponía colocar el busto de Sorolla modelado y cedido por Benlliure en la playa del Cabañal.

En enero de 1925 la Academia de San Carlos de Valencia, a instancias de Alcaldía, sugirió se utilizasen para el futuro proyecto del Monumento ciertos elementos arquitectónicos que Sorolla había aportado con destino al Palacio de las Bellas Artes: "valiosos restos de piedra de granito con sus columnas, basas, arquitrabes, etc. que posee el Excmo. Ayuntamiento, que por gestiones del difunto D. Joaquín Sorolla fueron transportados a

Valencia y que están depositados en el Jardín del Real" (A.H.M., 1924).

Al poco tiempo, en sesión 17 febrero de 1925 se encargó un anteproyecto al arquitecto municipal Francisco Mora que fue librado al Ayuntamiento a finales de marzo de ese mismo año. Siguiendo las sugerencias hechas por la Academia, utilizó en su proyecto las piezas procedentes de la Real Fábrica de Platería de Madrid.

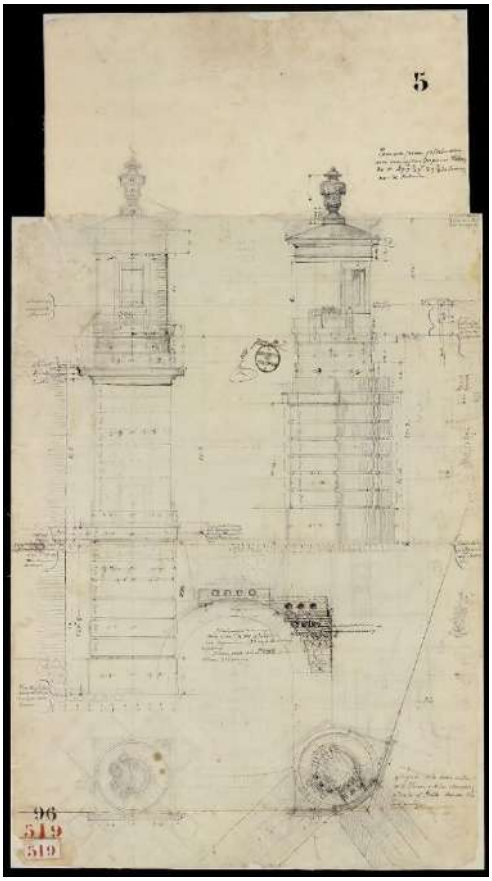


FIGURA 1. *Planta y alzado de las dos arcas cambijas de la calle de San Juan esquina al Paseo de Trajineros, y sección de la alcantarilla del Prado. Archivo de la Villa (1776-1785). Memoria de Madrid, sig. 0,69-52-10.*

El proyecto, paralizado durante algunos años, se retomó finalmente a finales de agosto de 1931, continuando con el anteproyecto de Francisco Mora. Este fue definitivamente aceptado por la Comisión de Monumentos, la Academia de Bellas Artes, y aprobado por el escultor Mariano Benlliure.

LA REAL FÁBRICA DE PLATERÍA MARTÍNEZ (MADRID)

La Real Fábrica y Escuela de Platería de Martínez de Madrid era un edificio neoclásico, construido en 1792 con proyecto de Francisco Ribas, Maestro de obras (Archivo de la Villa, 1792). En el Archivo de Villa de Madrid se conserva el diseño original de la fachada, donde se manifiesta la integración en sus esquinas de las dos arcas cambijas, depósitos de agua de forma turriforme, construidos por Ventura Rodríguez sobre el año 1782 (Fig. 1), en calidad de arquitecto y fontanero mayor de la Villa, como parte de la infraestructura hidráulica de Madrid para suministrar el agua a las fuentes que se habían proyectado en el Prado (Archivo de la Villa, 1776-1785).

El Proyecto de la nueva Fábrica de Platería Martínez, fue supervisado por Juan de Villanueva y presentaba cierto paralelismo con los edificios del Jardín Botánico y con el cercano Museo del Prado, obras significativas de este arquitecto real (Fig. 2). En fachada presentaba pórtico avanzado y dos cuerpos laterales retranqueados, todos ellos con columnas dóricas, dos en el frontal y cuatro en cada lateral. El cuerpo central estaba rematado, en su parte superior, por un ático geométrico. Como en la práctica totalidad de los edificios públicos se utilizó el granito de la Sierra de Guadarrama en columnas, pilastras, arcas cambijas, cornisas y pedestales, mientras que otros elementos, como las basas, los capiteles y los remates eran de piedra caliza de Colmenar (Martín, 2011).

A la muerte de Antonio Martínez, su viuda Ignacia Hartó se hizo cargo de la Fábrica hasta su muerte en 1809. Continúa el negocio en manos de sus hijas y nietos hasta los años 60 del siglo XIX. Entre los años 1864 y 1867 comienza la venta de parte de las propiedades (Diorama y Almacén) y se inicia el proceso de desaparición no solo de la fabricación de objetos de plata, sino también la del propio edificio.

En el año 1884 el edificio fue adquirido por el Estado y salió a pública subasta en 1907. Los nuevos propietarios tenían la intención de destinar la manzana de la antigua platería a la construcción de modernos edificios (Cavestany, 1923). De la demolición se mantuvo en pie la fachada, con la intención de que el Ayuntamiento de Madrid la adquiriera para reutilizarla en otro edificio. Ante la falta de interés de sus gobernantes, Sorolla, por entonces residente en Madrid, realizó las gestiones oportunas para adquirir la fachada con el fin de que ésta pudiera servir para el nuevo proyecto del Palacio de las Artes e Industrias de València. Para ello contó con la ayuda de la Juventud Artística Valenciana, del Círculo de Bellas Artes de València y especialmente de los hermanos Benlliure.

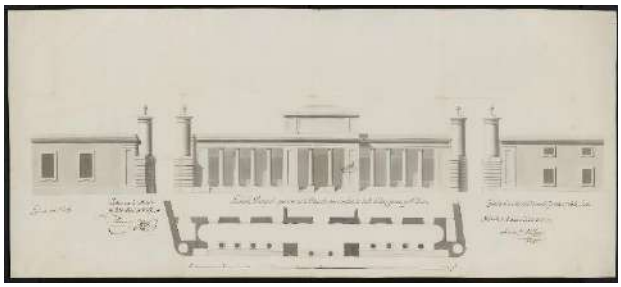


FIGURA 2. *Diseño original de la Fábrica de Platería de Martínez, firmado por Francisco Rivas el 24 de marzo de 1792; con fachada principal y laterales (Archivo de Villa, 1792).*

EL MONUMENTO A SOROLLA. CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES EMPLEADOS

El 7 de Marzo de 1932 se colocó la primera piedra en la playa de la Malvarrosa, entre las antiguas Termas Victoria y el Asilo de Nuestra Señora del Carmen (A.H.M., 1924) (Fig.3).



FIGURA 3. *Inicio de las obras de construcción del Monumento a Sorolla. Año 1932. Archivo Fotográfico Municipal.*

Los trabajos se demoraron por diversas circunstancias, como fueron la escasez de consignación presupuestaria adecuada, la falta de personal, y el "estado deplorable en que muchas de las piedras de granito que debían utilizarse estaban, puesto que la mayor parte de las molduras, lo mismo que las basas de las columnas y otros elementos decorativos aparecían sensiblemente mutilados, lo que ha obligado a que la mayor parte de aquellos tuvieran que hacerse de nuevo" (De las Heras, 2003) (Fig. 4). El monumento finalmente se inauguró el 31 de diciembre de 1933 con importante presencia de las principales entidades culturales de la ciudad e importantes personalidades de la época (Almela y Vives, 1934).

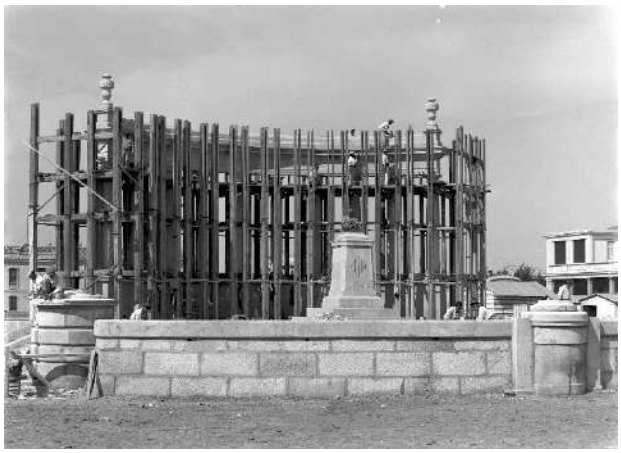


FIGURA 4. *Construcción de la columnata de la Real Fábrica de Platería Martínez. Año 1932-1933. Archivo Fotográfico Municipal.*

El Monumento resultante era una tribuna elevada con vistas al mar, presidido por una réplica en bronce de la obra de Benlliure, situaba en el centro del hemiciclo, y sobre ella, como telón de fondo, se levantaban las diez columnas dóricas procedentes de la Real Fábrica de Platería (Fig. 5).

A mediados de los años 50 del siglo XX el Monumento a Sorolla comenzó a presentar signos evidentes de deterioro por efecto de la acción del mar, tal y como dictaminó, a principios del año 1957, el arquitecto municipal, Carlos Soler (A.H.M., 1957). Pocos meses después, el monumento quedó arruinado por la riada en Octubre de 1957: se desplomó la columnata y la parte posterior del monumento, mientras que se preservaron las basas de columna, el pedestal y escultura de bronce de Sorolla y la plataforma empedrada, quedando los restos de la columnata y el entablamento abandonados en sus inmediaciones. No se tiene constancia sobre el paradero de los restos arquitectónicos, aunque según un informe municipal emitido en 1993 los restos se trasladaron, bajo custodia, a la cárcel de San Miguel de los Reyes y al poco tiempo se volvieron a trasladar al depósito municipal de San Isidro (A.H.M., 1993).



FIGURA 5. *Monumento a Sorolla finalizado. Año 1933. Archivo Fotográfico Municipal.*

Independientemente de la fiabilidad de este informe a fecha de hoy tenemos constancia de que parte del material de derrumbe de la riada de 1957 se encuentra en el edificio Matadero Municipal de Borbotó, como es el caso de la crátera de piedra caliza blanca de Colmenar que, en su momento, remataba el arca cambija de la calle S. Juan con calle Tragineros; en el cementerio de Paiporta se encuentra algún fragmento de columna de granito y en el depósito de San Isidro se conservan algunos pilares reutilizados en el frontal de basamento que formaban parte del ático de la fachada de Fabrica de Platería.

Parte del antiguo monumento, busto de Sorolla y el pedestal, fueron trasladados al nuevo monumento a Sorolla que se levantó en el año 1962 en la plaza de la

Armada Española, actual plaza de la Semana Santa Marinera. Años después, en 1974, el monumento fue remodelado incorporando como fondo arquitectónico la portada del derribado Banco Hispano-Americano de la calle de las Barcas, obra también de Francisco Mora.

En torno a los años 1975-1977 se procedió al desmontaje y desmantelamiento definitivo de la plataforma del monumento. Los restos se depositaron en diversos almacenes y espacios municipales. De este segundo momento se han identificado diversas piezas procedentes de las canteras de Madrid, mientras que el resto, rodeno y calizas, procedían de canteras locales y fueron reutilizadas en otros edificios de la ciudad. De estos elementos arquitectónicos se conservan piezas en los depósitos de San Isidro, como los sillares almohadillados, las piezas circulares y los remates cónicos moldurados, modificados en su puesta a punto, pertenecientes a las arcas cambijas de Ventura Rodríguez, y, en el viejo cauce del río Túria, en el Tramo VII, a la altura del Museo de Bellas Artes, se conservan las diez basas dóricas de piedra caliza de Colmenar y diversas piezas paralelipipédicas de granito de Guadarrama, en fase de estudio.

REFERENCIAS

A.H.M. (1924): Serie Monumentos, año 1924, caja 23 expediente 25.

A.H.M. (1957): Serie Monumentos, año 1957, caja 64, expediente 15.

A.H.M. (1993): Serie Monumentos, año 1993, caja 229, expediente 28.

Archivo de la Villa (1792): Expediente de construcción de la Real Platería Martínez. Madrid, 1-52-97.

Archivo de la Villa (1776-1785): Planta y alzado de las dos arcas cambijas de la calle de San Juan esquina al Paseo de Trajineros, y sección de la alcantarilla del Prado. Madrid, 0,69-52-10.

Almela y Vives, F. (1934): Monumento a Joaquín Sorolla, *Valencia Atracción,* nº. 980, febrero 1934, p. 20-21.

Cavestany, J. (1923): La Real Fábrica de Platería Martínez, en *Boletín de la Sociedad Española de Excursiones (B. S. E. Ex)*, diciembre, 1923, págs. 248-255.

De las Heras Esteban, E. (2003) *La escultura pública en Valencia. Estudio y catálogo*. Departamento de Historia del Arte. Universidad de Valencia.

Martín, F. A. (2011): El platero Antonio Martínez Barrio y su Escuela-Fábrica de platería en Madrid, en *El aragonés Antonio Martínez y su Fábrica de Platería en Madrid.* Madrid. pp. 37.

Base de Datos del Inventario Nacional de Canteras Históricas asociadas al Patrimonio Arquitectónico de España.

T Database of the National Inventory of Historical Quarries associated with the Architectural Heritage of Spain.

J. Fernández[1], E. Álvarez[2], J.M. Baltuille[2], J. Martínez[2] y F.J. López[3].

1 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Matemático Pedrayes, 25, 33005. Oviedo. j.fernandez@igme.es
2 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Ríos Rosas, 23, 28005. Madrid. e.alvarez@igme.es; jm.baltu@yahoo.es; javier.martinez@igme.es
3 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Ríos Rosas, 23, 28005. Plaza de la Constitución, 1 37001 Salamanca. fj.lopez@igme.es.

Palabras clave: Canteras históricas, patrimonio, base de datos, piedra natural, España.

Resumen

La utilización de la piedra natural como material constructivo del patrimonio arquitectónico ha estado íntimamente ligado al desarrollo histórico; se trata de un material muy apreciado, fundamentalmente, por su carácter perdurable y simbólico. Con la construcción de edificaciones y fortificaciones, vías de comunicación, infraestructuras civiles o elementos lúdicos o, simplemente, como testimonio de sus creencias religiosas, las distintas civilizaciones han dejado su impronta mediante las rocas de construcción. Sin embargo, están escasamente estudiadas, y, por tanto, las canteras históricas que han surtido de piedra para la construcción de ese patrimonio cultural no se ha inventariado de manera sistemática.

Este inventario actualizable, disponible como Base de Datos Institucional del CN IGME-CSIC, pone de manifiesto la existencia de un gran número de áreas de extracción de materiales pétreos en el territorio español. Además, se propone la puesta en valor de las mismas como fuente de información científica, histórica, arquitectónica y arqueológica, pues son yacimientos totalmente desconocidos en muchos casos (Fernández Suárez et al, 2020).

Abstract

The use of natural stone as a construction material for architectural heritage has been closely linked to historical development; It is a highly appreciated material, mainly for its enduring and symbolic character. With the construction of buildings and fortifications, communication routes, civil infrastructure or recreational elements or, simply, as a testimony to their religious beliefs, different civilizations have left their mark through construction rocks. However, they are scarcely studied, and, therefore, the historical quarries that have supplied stone for the construction of this cultural heritage have not been systematically.

This updateable inventory, available as the Institutional Database of the CN IGME-CSIC, reveals the existence of a large number of areas of extraction of stone materials in Spanish territory,. Furthermore, it is proposed to enhance their value as a source of scientific, historical, architectural and archaeological information, since they are totally unknown sites in many cases.

Referencias

Fernández Suárez, J, Álvarez Areces, E, Baltuille Martín, JM y Martínez-Martínez, J. (2020). “The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage”, en Álvarez García, R y Ordoñez Alonso, A (eds.), *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Oviedo: Universidad de Oviedo, Servicio de Publicaciones. 2020. pp. 141-151.

Canteras históricas, petrografía, gliptografía y deterioro de los sillares en dos iglesias románicas de la Euroregión Galicia-Norte de Portugal.

Historical Quarries, Petrography, Glyptography and Decay of Ashlars from Two Romanesque Churches of Galicia-North Portugal Euroregion.

D.M. Freire-Lista[1], A. Ramil[2], A.J. López[2]

1 Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, UTAD, Escola de Ciências da Vida e do Ambiente, Quinta dos Prados, 5000-801 Vila Real, Portugal, davidfreire@utad.pt. Centro de Geociências, Universidade de Coimbra.
2 Laboratorio de Aplicacións Industriais do Láser, Campus Industrial de Ferrol, Universidade da Coruña, 15471 Ferrol, Spain.

Resumen: Se presenta el análisis petrográfico y petrofísico de los principales granitos de construcción de dos iglesias románicas del norte de Portugal, Nossa Senhora de Guadalupe en Mouçós y São Tiago de Folhadela, ambas en Vila Real. Se ha realizado un análisis de las marcas de cantero presentes en los sillares románicos para establecer el número de canteros que trabajaron en la construcción de las iglesias originales, así como su dedicación. También se localizaron las canteras históricas de los granitos principales de construcción y se identificaron las sucesivas fases constructivas a partir del análisis rugosimétrico de los acabados superficiales. Todo ello con el objetivo de la conservación y puesta en valor del patrimonio construido en regiones poco pobladas de la Euroregión Galicia-Norte de Portugal. El granito principal de construcción de la iglesia Nossa Senhora de Guadalupe es el de Sanguinhedo. El granito principal de construcción de la iglesia de São Tiago de Folhadela es el de Prezandães de Folhadela. La característica más destacable para la puesta en valor de la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe es la excepcional conservación de sus sillares con marcas de cantero románicas y sus canecillos instalados en su posición original. La característica más destacable de los sillares de la iglesia de São Tiago de Folhadela es la presencia de manchas de óxido de Fe producto de la transformación de la pirita a goetita.

Palabras clave: Granito de construcción tradicional, canecillos, marcas de cantero, pirita.

Abstract: *The petrographic and petrophysical analysis of the main building granites from two Romanesque churches in northern Portugal, Nossa Senhora de Guadalupe in Mouçós and São Tiago de Folhadela, both in Vila Real, is presented. An analysis of the mason's marks on the Romanesque ashlars has been carried out to establish the number of stonemasons who worked on the construction of the original churches, as well as their dedication. The historical quarries of the main building granites were also located, and the successive construction phases were identified based on the rugosymmetric analysis of the surface finishes. All of this is to conserve and enhance the value of the built heritage in sparsely populated regions of the Galicia-North Portugal Euroregion. The main construction granite of the Nossa Senhora de Guadalupe Church is that of Sanguinhedo. The main construction granite of São Tiago de Folhadela Church is the granite of Prezandães de Folhadela. The most outstanding features for the enhancement of Nossa Senhora de Guadalupe Church are the exceptional preservation of its ashlars with Romanesque mason's marks and its corbels installed in their original position. The most remarkable feature of the ashlars of São Tiago de Folhadela Church is the presence of Fe oxide stains resulting from the transformation of pyrite to goethite.*

Keywords: *Traditional building granite, corbels, mason's marks, pyrite.*

INTRODUCCIÓN

La conservación del patrimonio construido implica la localización y estudio de sus canteras históricas, la caracterización de sus piedras de construcción y deterioro, así como su puesta en valor.

Definir qué se considera valioso constituye el primer paso para la conservación del patrimonio cultural. Para ello, es necesario un equipo multidisciplinar con un criterio amplio de inclusión. Variables como la rareza, accesibilidad, demanda e inserción territorial se deben considerar a la hora de diseñar una estrategia de conservación propia para cada bien. Y así, generar una diversidad cultural atractiva para un amplio espectro de público.

Los sillares de construcciones históricas proporcionan información muy útil para los profesionales del patrimonio construido. Los materiales, el acabado superficial, las marcas de cantero, el deterioro y la estratigrafía de los muros deben tenerse en cuenta para un estudio riguroso de conservación y puesta en valor del patrimonio pétreo.

El objetivo de este trabajo es analizar los sillares de dos iglesias románicas: Nossa Senhora de Guadalupe en Mouçós y São Tiago de Folhadela, ambas en Vila Real

(Portugal) con el fin de su conservación y puesta en valor. Para su conservación se localizaron las canteras históricas, se identificaron sus piedras de construcción y se evaluaron las propiedades petrofísicas de las principales piedras de construcción de cada iglesia. A partir del estudio científico, la puesta en valor de cada iglesia se basó en los rasgos que las hacen únicas, teniendo en cuenta aspectos geológicos, históricos y etnográficos.

METODOLOGÍA

Los métodos analíticos utilizados para la caracterización de sillares se han adaptado a las características de cada granito de construcción y a la propia historia constructiva de cada iglesia. El primer análisis ha sido una detallada observación petrográfica de todos los sillares que componen las iglesias con el fin de identificar el granito principal de construcción. Una vez identificado, se inició un estudio geológico para localizar sus canteras históricas a fin de recoger muestras con propiedades petrofísicas similares a las de los sillares originales. Se tomaron muestras de los granitos de Sanguinhedo (SA), de Prezandães de Folhadela (PF) y de Vale das Gatas (VG). Estas muestras se cortaron en cubos de $5 \times 5 \times 5$ cm^3 y se midió la Vp con el equipo CNS Electronics PUNDIT (precisión: ± 0,1 μs) siguiendo la norma UNE-EN 14579 (2005) y las propiedades físicas (porosidad efectiva, densidad aparente, absorción de agua) según la norma UNE-EN 1936 (2007). También se realizaron láminas delgadas de los dos principales granitos de construcción. Las observaciones petrográficas se realizaron con un microscopio óptico de polarización Leica DM4500 P, equipado con una cámara fotográfica FireWire Leica DFC 290 HD y software Leica LAS 4, siguiendo la norma UNE-EN 12407 (2020). Además, se realizaron mosaicos petrográficos (más de veinte microfotografías cada uno) para que el área mostrada fuese lo más representativa posible.

Para determinar las fases constructivas de cada iglesia se realizó un análisis gliptográfico identificando todas las marcas de cantero presentes en los sillares que las componen. Una vez identificadas, se cartografiaron los sillares de las iglesias, distinguiéndolos con relación a su marca de cantero y a su litología. Una vez realizada esta cartografía, se hizo un estudio estadístico para analizar el número y desempeño de los canteros involucrados en la construcción de las iglesias, sus fases constructivas y los granitos utilizados en cada fase. Estos se estudiaron a partir de sus topografías superficiales obtenidas con un perfilómetro láser MEL M2DW conectado a un ordenador portátil a través de Ethernet-BlueBox. Para cada uno de los sillares analizados, se realizaron al menos 5 medidas de una superficie de 4000 mm^2. La rugosidad superficial se caracterizó según la norma UNE-EN ISO 25178-2 (2013) utilizando los parámetros de rugosidad media (Sa) y rugosidad cuadrática media (Sq); nivelando las superficies medidas y ajustándolas a un plano.

Para estudiar el origen del deterioro cromático de los sillares de la iglesia de São Tiago de Folhadela, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) por electrones secundarios y retrodispersados. Los mapas de rayos X se crearon en un microscopio JEOL JSM 6400 a 16 keV acoplado a un analizador espectroscópico por dispersión de electrones (EDS) Oxford 200 Inca Energy EDS.

RESULTADOS

El granito de Sanguinhedo (SA) es la principal piedra de construcción de Nossa Senhora de Guadalupe. Es un monzogranito de dos micas moscovitico > biotitico, equigranular y tamaño de cristal medio-fino.

El granito Prezandães de Folhadela (PF) es la principal piedra de construcción de la iglesia parroquial de São Tiago de Folhadela. Es un monzogranito moscovítico de tamaño de cristal medio, caracterizado por manchas de óxidos de Fe.

El granito de Vale das Gatas (VG) está presente en algunos sillares de ambas iglesias, Es un granito de dos micas moscovitico > biotitico, de tamaño de cristal medio a grueso y porfiroide. Los fenocristales de feldespato, biotita y, más raramente, moscovita están orientados.

En la Tabla I se muestran las principales propiedades petrofísicas de los granitos de SA, el granito de PF y del granito de VG.

Propiedad	Sanguinhedo (SA)	Prezandães de Folhadela (PF)	Vale das Gatas (VG)
Porosidad efectiva (%)	3,2 ± 0,3	3,8 ± 0,3	3,5 ± 0,2
Densidad aparente (kg/m^3)	2566 ± 61	2401 ± 41	2452 ± 35
Absorción de agua (%)	1,2 ± 0,3	4,2 ± 0,4	2,1 ± 0.3
Velocidad de ultrasonidos (m/s)	2920 ± 98	2520 ± 123	2550 ± 153

TABLA I. *Parámetros petrofísicos de los tres granitos estudiados.*

Iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe.

La iglesia románica de Nossa Senhora de Guadupe está construida sobre un promontorio del granito de SA (Lat: 41,32006111, Long: -7.71515134). La iglesia consta de tres volúmenes construidos con sillares de granito: ábside, nave y sacristía. El granito de SA ocupa la mayor parte de la nave, la cual conserva su aspecto original. Las principales canteras históricas se encuentran dentro y cerca de la iglesia. En las coordenadas Lat: 41,3209900, Long: -7,7148996 se descubrieron vestigios de canteras históricas del granito de SA. Existen sillares del granito de VG, aunque en muy pequeño número. Cabe destacar una dovela de la puerta Sur con una marca de cantero. El granito de VG aflora a aproximadamente 300 m de la iglesia.

Se han identificado diez marcas de cantero en las fachadas, de las cuales siete son letras protogóticas (siglos XII-XIII). Diez canteros construyeron las fachadas de la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe, de los cuales, seis participaron desde el principio hasta el final de la obra. La nave de la iglesia no ha sufrido

grandes modificaciones desde su construcción, ya que todas las marcas de cantero están dispuestas según el orden de colocación original. Los canecillos tienen las mismas marcas de cantero que los sillares. Se ha identificado un hecho inédito en la arquitectura románica: los canecillos de la fachada NO representan el mundo masculino y los de la fachada SE, representan el mundo femenino. La mayoría de los sillares del ábside carecen de marcas de cantero y las presentes no siguen el mismo patrón que las de la nave, lo cual indica una posible reconstrucción del ábside. Además, los parámetros de rugosidad del acabado superficial de los sillares románicos originales son muy similares. Hecho que se da independientemente de que estén tallados en granito de SA o en granito de VG. Los parámetros de rugosidad de los sillares tallados posteriormente son diferentes, especialmente los sillares utilizados para tapiar las ventanas orientadas al Sur del ábside. Estos sillares presentan una rugosidad muy superior al acabado superficial original (Tabla II).

Elemento medido	Sa (μm)	Sq (μm)
D. SA nave (MC)	0,3022 ± 0,0062	0,382 ± 0,011
S. SA nave (MC)	0,4812 ± 0,0052	0,6021 ± 0,0062
S. SA ábside	0,4649 ± 0,0049	0,5858 ± 0,0080
S. SA (MC) ábside	0,6028 ± 0,0091	0,747 ± 0,011
D. VG nave	0,383 ± 0,026	0,501 ± 0,040
S. v ábside	1,457 ± 0,034	1,792 ± 0,033

TABLA II. Parámetros *de rugosidad superficial medidos en la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe en dovelas (D) y sillares (S) talladas en granito de Sanguinhedo (SA), granito Vale das Gatas (VG) y el utilizado para tapiar las ventanas del ábside (v). Los elementos con marcas de cantero están indicados con (MC).*

Iglesia de São Tiago de Folhadela.

La iglesia románica de São Tiago de Folhadela se asienta sobre materiales metasedimentarios (Lat: 41,280258, Long. -7,738849). Consta de cinco volúmenes: ábside, nave, sacristía, campanario y escaleras de acceso. Esta iglesia presenta sillares y mampostería de granito que indican sucesivas reconstrucciones. Fueron identificados cinco granitos de construcción, el granito de PF es la principal piedra de construcción. Su cantera histórica está a aproximadamente 1 km de distancia, en las coordenadas Lat: 41,2888223, Long: -7,7446070, de dónde se ha extraído el granito de PF con manchas de óxido de Fe.

Otros granitos identificados fueron el de VG, que se utilizó también en la primera fase románica, el granito de Ragais, en la sacristía (1713), el granito SA, en un canecillo y el granito Amarelo Real que se utilizó en la balaustrada de las escaleras, en la reforma de 2003.

El ábside de la iglesia se conserva prácticamente tal y como se construyó originalmente (aunque se ha levantado una hilera, se han abierto ventanas y una puerta hacia la sacristía adosada). En sus muros se han identificado siete marcas de cantero. La sucesión de diferentes marcas de cantero indica que la fase de construcción románica fue lenta.

El dintel de la puerta principal (siglo XIX) es también de granito VG. Este granito presenta mejores propiedades petrofísicas que el granito de PF, utilizado en la construcción original y que, además, presenta manchas marrones producto de la oxidación de la pirita (FeS_2) a goethita (α $Fe^{3+}O(OH)$), produciendo liberación, migración y retención de hierro. La parte interna de la goethita se vuelve semi-hueca, con la presencia de goethita botrioidal (Fig. 1).

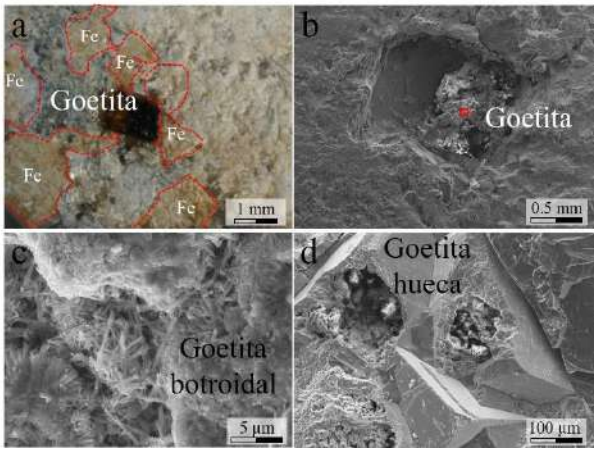


FIGURA 1. *Granito de Prezandães. a: imagen macroscópica del granito pulido con un molde de pirita y minerales arcillosos teñidos por el hierro; b: imagen SEM del molde de pirita con formación de goetita en su interior; c: goetita botroidal en el interior del molde de pirita; d: Goetita que conserva las caras de la pirita original y con su interior semihueco con goetita botroidal.*

El hierro de la parte interna de los cubos de pirita migró, arrastrado por el agua intersticial, predominantemente a través de las microfisuras intercristalinas y se retuvo mayoritariamente en la sericita y a los minerales arcillosos producto de la alteración de los feldespatos.
Los minerales que rodean a la pirita transformada a goethita definieron la trayectoria de migración del hierro, que no fue concéntrica debido a la retención selectiva del hierro por minerales arcillosos (Fig. 1). Además, las caras la de pirita no presentan el mismo ritmo de oxidación.

DISCUSIÓN

Ambas iglesias estuvieron protegidas por cal durante los últimos siglos. En el caso de la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe se eliminó de forma natural, mientras que en São Tiago de Folhadela fueron utilizados métodos abrasivos en el siglo XX, lo que destruyó el acabado original de los sillares (Freire-Lista et al., 2022). De los granitos principales de construcción de cada iglesia, el granito de SA (Nossa Senhora de Guadalupe), es el que mejores propiedades petrofísicas presenta (menor porosidad y menor absorción de agua) (Tabla II). Todo ello, además de las múltiples reconstrucciones que presenta la iglesia de São Tiago de Folhadela explica que la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe conserve la mayoría de las marcas de cantero románicas. Los canteros que tallaron los sillares de la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe fueron los mismos que

esculpieron los canecillos conservados en la nave, que están en el lugar original. Los canecillos de la iglesia de São Tiago de Folhadela no conservan las marcas de cantero ni están dispuestos en el orden original (Freire-Lista et al., 2023). Tanto la gliptografía, como los parámetros de rugosidad (Tabla II) indican que el ábside de Nossa Senhora de Guadalupe ha sido reconstruido y ha perdido todos sus canecillos originales, aunque cuenta con canecillos lisos en la fachada NO, tallados e instalados en la reconstrucción del ábside. Por lo tanto, los sillares del ábside con marcas de cantero son reutilizados del ábside original. Los canecillos originales de la nave de Nossa Senhora de Guadalupe muestran la realidad etnográfica del Norte de Portugal en la Edad Media: mujeres cosechando lino, portando calabazas vinateras (o de peregrino) e hilando son un ejemplo de los trabajos que realizaban.

Los canecillos de São Tiago de Folhadela fueron recolocados en las sucesivas reconstrucciones, los canecillos más modernos son lisos y el único canecillo esculpido en granito de SA de esta iglesia proviene del primer ábside de Nossa Senhora de Guadalupe (a unos 6 km). La mayoría de las iglesias románicas de la Euroregión Galicia-Norte de Portugal muestran una situación similar, los canecillos están actualmente desordenados de acuerdo con su posición original y cuentan con canecillos planos instalados en sucesivas reconstrucciones.

En la iglesia de São Tiago de Folhadela, algunos sillares de granito de VG presentan marcas de cantero y un agujero en el centro que pudo haber sido creado para encajar las pinzas de grúas romanas utilizadas para la construcción el santuario romano de Panoias, construido con el granito de VG sobre el que se asienta, aproximadamente a 6 km de Folhadela. Es decir, hubo un expolio de los sillares de los muros de los templos romanos de Panoias para reutilizarlos en construcciones posteriores. En este caso, en la iglesia de São Tiago de Folhadela construida en la Plena Edad Media.

Cuando la pirita se oxida a un pH cercano al neutro en presencia de suficiente alcalinidad, se desarrollan recubrimientos de oxihidróxido de hierro en su superficie. A medida que estos recubrimientos se hacen más gruesos y densos, bloquean el transporte del oxidante desde la solución a la superficie de la pirita y reducen la velocidad de oxidación de la pirita. Los coloides de oxihidróxido de hierro se forman y se adhieren a la superficie de la pirita para producir una ligera reducción en el transporte del oxidante (Huminicki y Rimstidt, 2009). Por lo tanto, la superficie exterior de los cubos se vuelve más resistente, por esta razón la figura 1d muestra las caras de la pirita original.

CONCLUSIONES

Los sillares son elementos macroscópicos y sus características pueden ser mostradas al público general en acciones de divulgación científica. El acabado superficial de los sillares de sustitución utilizados en las restauraciones de monumentos debe tener una rugosidad similar a la de los sillares originales.

El excepcional estado de conservación y la iconografía de sus canecillos hacen de la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe un ejemplo único de la arquitectura románica.

El granito de Sanguinhedo (SA) debería utilizarse como granito de sustitución en futuras restauraciones de la iglesia de Nossa Senhora de Guadalupe y el de Prezandães de Folhadela (PF) sería el adecuado para posibles futuras restauraciones de la iglesia de São Tiago de Folhadela, aunque se debe considerar su baja calidad como material de construcción.

AGRADECIMIENTOS

FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. (PORTUGAL) en el marco del proyecto UIDB/00073/2020 de la unidad de I + D Centro de Geociencias (CGEO) y Estímulo al Empleo Científico, Apoyo Individual 2017. CEECIND/03568/2017.

REFERENCIAS

Freire-Lista, D.M., Campos, B.B., Costa, R. y Sanjurjo-Sánchez, J. (2022): Main building granite of São Tiago de Folhadela Parish Church (North of Portugal). Petrography, glyptography, construction phases and decay by pyrite oxidation. *Construction and building materials.* 350: 128904.

Freire-Lista, D.M., Campos, B.B., Moreira, P., Ramil Rego, A. y Lopez Díaz, M.J. (2023): Building Granite Characterisation, Construction Phases, Mason's Marks and Glyptography of Nossa Senhora de Guadalupe Church, Mouçós e Lamares, Galicia-North Portugal Euroregion. *Geoheritage*, 15: 24.

Huminicki, D.M.C., Rimstidt, J.D. (2009): Iron oxyhydroxide coating of pyrite for acid mine drainage control, *Appl. Geochem.*, 24: 1626-1634.

UNE-EN 12407 (2020): Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico.

UNE-EN 14579 (2005): Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la velocidad de propagación del sonido.

UNE-EN 1936 (2007). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

UNE-EN ISO 25178-2 (2013): Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Área. Parte 2: Términos, definiciones y parámetros de calidad superficial. (ISO 25178-2).

La piedra de la muralla del castro de Monte Cildá: Investigación sobre su procedencia.

The stone of the wall of the hillfort of Monte Cildá: Research about its origin.

J.I. García de los Ríos Cobo[1]

1 Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A. Valladolid. jigarciarioscobo@gmail.com.

Resumen: Se presenta un nuevo avance sobre la piedra constituyente de la base de la muralla del castro de Monte Cildá (Olleros de Pisuerga, Palencia), en base a un estudio litológico y canteril que complementa los estrictamente históricos y arqueológicos existentes. Se ha constatado que las piezas mayoritariamente utilizadas fueron extraídas exprofeso y con prisas, por la urgencia del momento: son bloques grandes, coincidentes en forma y tamaño con los bloques primarios de las canteras históricas de procedencia; no presentan terminación superficial; y se han explotado muchas areniscas de escasa calidad. En la muralla se han aprovechado numerosas piezas recicladas, procedentes de la población romana más cercana (Maggavi, en la actual Santa María de Mave), pero no sillares. La mayoría de las canteras antiguas de origen se ubican en la formación Utrillas y, en menor proporción, en la formación Escucha. También se utilizaron calizas turonienses, de la meseta de asiento del castro.

Palabras clave: Muralla, cantera histórica, bloque primario, arenisca.

Abstract: *A new advance on the constituent stone of the base of the wall of the hillfort of Monte Cildá (Olleros de Pisuerga, Palencia) is presented, based on a lithological and quarrying study that complements the existing strictly historical and archaeological studies. The work has shown that the pieces mostly used were extracted exprofeso and in haste, by the urgency of the moment: they are large blocks, coincident in shapes and sizes with the primary blocks of the historical quarries of origin; they do not present superficial termination; and many sandstones of poor quality were exploited. Numerous recycled pieces from the nearby roman settlement (Maggavi, in what is now Santa María de Mave) were used in the wall, but no ashlars. Most of the ancient quarries of origin are located in the Utrillas formation and, to a lesser extent, in the Escucha formation. Turonian limestones from the settlement plateau of the hillfort were also used.*

Key words: *Wall, historical quarry, primary block, sandstone.*

ENCUADRE GENERAL

El recinto amurallado de Monte Cildá, está situado en las proximidades de Olleros de Pisuerga (Aguilar de Campóo, Palencia), en un resalte calizo, sobre el cañón de La Horadada y su río Pisuerga (Fig. 1). Se encuentra en lugar de paso desde la Meseta hacia la costa cantábrica (hacia los pueblos norteños) y ha jugado un papel decisivo en la historia de estas tierras septentrionales, en épocas de cántabros, romanos y visigodos, e incluso con posterioridad, hasta su abandono, a partir del siglo X (Iglesias Gil y Ruiz Gutiérrez, 2006).

La meseta fortificada, de 13,6 ha, está emplazada a 985 m de altitud, sobre el primer nivel carbonatado del Cretácico superior, dominando el valle del Pisuerga, emplazado 115 m más bajo, que llega, por el sur, hasta Santa María de Mave. Es de forma alargada, según SE-NO, con ligero basculado al NE y cerrada por su parte más accesible, el NO, con una muralla de 152 m de desarrollo (Fig. 2), de doble muro de grandes piedras en la base y tacos de menor tamaño en el resto, hasta completar al menos los 3 m de altura (García Guinea et al., 1966; Iglesias Gil y Ruiz Gutiérrez, 2006).

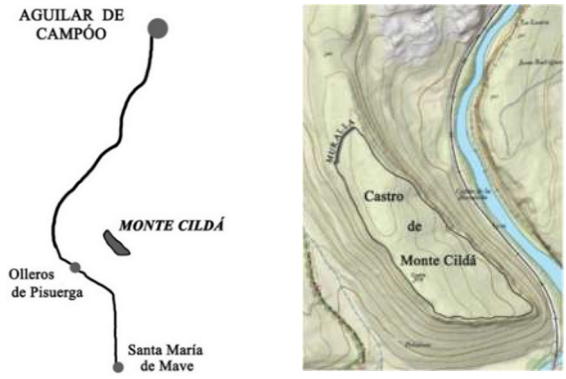


FIGURA 1. *Situación general y topografía del castro.*

MATERIALES DE LOS MUROS

De lo que queda de la muralla, en los tramos más originarios, desde el extremo NE hasta la torre III, o incluso hasta la IV –al menos la hoja interior– (Iglesias Gil y Ruiz Gutiérrez, 2006), se ven, en sus dos lienzos, unas hiladas inferiores conformadas básicamente por bloques de piedra arenisca de importantes dimensiones. Bloques de buscada buena estabilidad, asentados a hueso o con argamasa de cal y dispuestos, más o menos, a soga, según hiladas irregulares; que soportan los mayores

esfuerzos y sirven, a su vez, de perfecto asiento a otros menores, todavía más imperfectos, de la parte superior, de mampostería (tacos aplanados de caliza). De esos bloques, que no sillares, llaman la atención sus formas, grandes dimensiones y rusticidad.

En Cildá, además, es notable el reaprovechamiento de piezas variadas, como numerosas estelas funerarias, aras, cornisas, fustes de columna, etc.; bloques de cualquier tamaño y forma, a los que se recurrió, aunque cumplieran peor con las exigencias volumétricas y de colocación que requería la obra. Tan solo el conjunto epigráfico reúne a más de 50 piezas (Iglesias Gil y Ruiz Gutiérrez, 2006). Esas piezas provendrían de la población romana más próxima, *Maggavi*, ubicada en la actual Santa María de Mave, a 4.350 m (García Guinea et al., 1966; Quintana et al., 2018), lugar en el cual las excavaciones (yacimiento de La Capilla) han ofrecido piezas de areniscas bien elaboradas (Quintana López et al., 2018) y que, por tanto, nos indica la presencia de canteros con cierta cualificación.



FIGURA 2. *La muralla, con sus 6 torres, y la puerta de entrada, entre las V y VI. Delante una primera defensa menos consistente.*

Por delante de la estructura que nos ocupa, en paralelo, se adivina, al menos, otra línea defensiva de refuerzo, conformada por un muro-barrera de piedra suelta tomada por los alrededores (Fig. 2).

LOS BLOQUES DE PIEDRA

Respecto de los bloques de arenisca, se observan muchas piezas cuadradas o tendentes a esta forma, con la dimensión larga no muy acusada y con la altura menor que el ancho. Medidas comunes pueden ser 57-80 cm de largo por 40-66 cm de ancho y 30-42 cm de alto. Habitualmente, sobresale el gran volumen de casi todos los bloques, lo que agilizaría su extracción en cantera (menor número de piezas) y aportaría mayor solidez a la obra, aunque penalizaría su manipulación, obligando a la instalación de algún potente ingenio de carga. La mayoría pasan de los 150 kg, hay bastantes bloques de 300-400 kg y alguno pasa de los 800 (reciclado). Suponen la mayoría de los bloques, unos 240 (Fig. 3).

Los bloques calizos predominan sobre los de arenisca en el primer tramo NE, en las torres I y II, y, en los lienzos exteriores a continuación de la torre III hasta el final NO. Estamos hablando, también, de piezas de buenas dimensiones; de grosores 20-34 cm, longitudes variadas, de unos 75-100 cm y uno de 142 cm, y anchos de 40-60 cm. Son bloques más o menos regulares, tendentes a prismáticos, que en realidad simularían grandes tacos de mampostería, muchos de 300-400 kg. Puede haber unos 105 bloques de este tipo, en las hiladas más bajas de los muros.

La premura en la obtención de los bloques rocosos se podría deducir también de la necesidad de reutilización de otras piezas ya existentes en edificios o incluso en una necrópolis; muchas de ellas lápidas dedicadas a unos antepasados relativamente cercanos (García Guinea et al., 1966). Esas piezas reutilizadas sí presentan los rasgos propios de una piedra bien terminada: mejores calidades de roca, buenos escuadrados, aristas y esquinas más vivas, la cara vista muy plana y con una terminación fina, etc. La mayoría de las piezas reutilizadas se debieron acomodar en lugares constructivos menos exigentes, como las hojas interiores de la muralla (García Guinea et al., 1966).



FIGURA 3. *Tramo de muralla previo a la torre I (a la derecha de la fotografía), el de mayores bloques. El señalado, pesa más de 800 kg.*

ROCAS UTILIZADAS

Nos encontramos en el sector suroeste de la Cuenca Vasco-Cantábrica y más concretamente en la banda plegada definida por dos grandes fallas de direcciones SE-NO, –la de Ubierna por el norte, y la de Villela o Becerril por el sur, que a su vez separa a La Ojeda de la Zona del Pisuerga (López Olmedo et al., 1997; Pujalte et al., 2004)–; existiendo un registro casi completo desde el Triásico superior hasta el final del Cretácico. Los materiales rocosos y su disposición definen un relieve típico de media montaña, con un amplio valle de bordes alomados dominados por materiales detríticos relativamente blandos, como son las areniscas, arcillas y conglomerados, y todo ello enmarcado por los resaltes calizos que constituyen las denominadas *loras*, las mesas o potentes bancos carbonatados que dominan el paisaje, a unos 1.100 m de altura.

En la secuencia del Cretácico inferior detrítico se pueden distinguir dos grandes unidades superpuestas (Pujalte y Robles, 2008): Las canteras de beneficio de las areniscas se ubican en la Fm. Escucha, en el paraje de Las Berzosas, y en la Fm. Utrillas, al sur de La Rebolleda y

en el paraje de Las Huertas (García de los Ríos Cobo, 2017). Todas son areniscas moderadamente blandas, con una cierta desgranación superficial al tacto, a pesar del fuerte empaquetado de sus granos. Estos son generalmente de tamaño medio (0,2-0,5 mm), uniformes, subredondeados y subangulosos, y de cuarzo translúcido. Están bien clasificadas, aunque puede haber cantos (en ciertos casos), en las facies más groseras; con porosidad baja y escasa matriz; y contactos alargados, bastante completos.

Las más antiguas (Fm. Escucha) se caracterizan por la presencia de hierro, que genera los característicos colores rojizos, amoratados, lilas o grises-amarillentos (muy pocos); la escasa presencia de moscovita; la resistencia a la compresión de 36-40 MPa; y un peso específico de 2,2 g/cm^3 (García de los Ríos Cobo y Báez Mezquita, 2001). En ocasiones presentan niveles de grano más fino.

En los niveles inferiores de la potente Fm. Utrillas, con los bancos de arenas, en general groseras –con muchos niveles con cantos, o incluso conglomeráticas– alternan otros de areniscas con cierta compacidad (aunque bajo grado de cementación) (Fig. 4). Esas últimas también presentan hierro, que tiñe de tono pálido ocre-amarillento el color general gris blanquecino de origen; además, pueden presentar nódulos, costras u otros indicios de ese metal; contienen mayor cantidad de láminas de moscovita que la Fm. Escucha; y son ligeramente menos resistentes mecánicamente, con índices de compresión de unos 30 MPa. Su peso específico estaría en los 2,05 g/cm^3 (García de los Ríos Cobo y Báez Mezquita, 2001). En la parte superior de algunos yacimientos aparecen numerosas grietas de retracción, por perdida de la humedad; proceso que afecta, tan solo, a los centímetros más superficiales de rocas con cierta fracción limoarcillosa.

La resistencia al esfuerzo de compresión simple de estas rocas ha sido tomada mediante mediciones con un *Martillo de Schmidt* –esclerómetro– (del tipo N, de una energía de impacto de 2.207 Nm).

En la muralla predominan mayoritariamente las del segundo tipo, en proporción de treinta a uno.

Las calizas de Cildá (y su continuación hacia el SE en la zona de El Portillo) pertenecen a la Fm. Calcarenitas y Calizas con Rudistas de Villascusa de las Torres, de edad Turoniense (López Olmedo et al., 1997). La parte intermedia de esa formación, la aprovechable, consta de dos bancos más duros y tableados. El banco inferior se inicia con micrita mayoritaria, tipo *wackestone*, con pocos miliólidos, de tono beige, muy poco grisáceo y uniforme. A continuación, la roca está algo más recristalizada y es de tono más gris, con abundantes miliólidos y granos (Fig. 4). El tramo termina similar al inicio. El banco superior comienza muy parecido al final del anterior, pero presentando pequeños cristalitos de pirita (0,03 mm), en parte oxidados. Posteriormente el tamaño de grano pasa a ser más grueso, *packestone*, con predominio de esparita y más motas de Fe. Se van acrecentando esos rasgos, con textura *grainstone* y tono más beige, grosero y jaspeado. Se termina con esparita, *packestone*, y color beige uniforme. De estos metros superiores, más tableados, provienen las piezas de época romana (Quintana López et al., 2018).

Estas calizas presentan una homogénea compacidad, con resistencia a compresión del orden de los 90 MPa (García de los Ríos Cobo y Báez Mezquita, 2001), mucho mayor que la de las areniscas. Por tanto, son más costosas de cortar mediante surcos, aunque sean menos abrasivas. Sin embargo, al tener gran rigidez y cierta fragilidad, se quiebran mediante un fuerte impacto. Presentan resistencias al impacto de 2-3 J, (más o menos la mitad que las areniscas) y un peso específico de unos 2,45 g/cm^3 (García de los Ríos Cobo y Báez Mezquita, 2001).



FIGURA 4. *Aspecto de una arenisca de la Fm Utrillas (cantera de Las Huertas) (fotografía de la izquierda) y de una caliza turoniense (cantera El Portillo) (fotografía de la derecha).*

EL TRABAJO DE LA PIEDRA

Ante la limitación de piedra local (grandes bloques de caliza) se recurre al otro material próximo que puede servir, las areniscas. La mayoría de los bloques de arenisca provienen de canteras próximas a vías de comunicación de época romana que comunicaban con la vía principal, la vía Pisoraca-Ivliobriga, que pasaba a pie de Monte Cildá (Moreno Gallo, 2011-2020) (Fig. 5). Canteras abiertas por los alrededores del centro de consumo, *Maggavi*. Los bloques de areniscas provienen de esos lugares mencionados, emplazados a 5.000, 4.200 y 6.500 m respectivamente. Los de caliza probablemente fueran arrancados de las proximidades o, más dudoso, de la cantera de El Portillo, a 3.800 m.

En las areniscas se aprovecha su desgranamiento al roce para cortar los bloques de piedra. El corte se realizó con un pico, hasta llegar a la altura del bloque a extraer. La maniobra de corte produce unas acanaladuras o surcos perimetrales con anchos de 10-20 cm en superficie y 5-8 cm en la base (Fig. 6). Una vez que el bloque queda aislado del macizo, se procede a dar el "levante", su despegue en el plano horizontal (aprovechando la "veta", la estratificación), mediante cuñas metálicas hincadas a golpe de maza grande; o, con un plano de fractura muy marcado, tan solo presionando con el auxilio de palancas. Las piezas se debían obtener con el lado más largo paralelo a los planos de debilidad de la roca, marcados por la estratificación u orientación mineral, con el fin de

lograr la máxima resistencia a compresión en el muro (colocadas a la "ley" de cantera).
En las canteras históricas mencionadas, se ven bloques primarios mayores que las piezas de destino (sillares), que posteriormente se dividían en dos (se "desdoblaban" una o dos veces), con el empleo de cuñas anchas y muy planas (García de los Ríos Cobo et al., 2011). Son bloques de 0,9-1,2 m de largo, por 0,6-0,8 m de ancho por 0,2-0,5 m de alto; serían bloques similares, algo mayores, que los de la muralla, aunque se trate posiblemente de trabajos posteriores, si bien efectuados con técnicas y herramientas similares.

Las piezas calizas, al presentarse con acusado tableado, se arrancan fácilmente del banco extractivo con palancas y se dimensionan a golpe de maza.

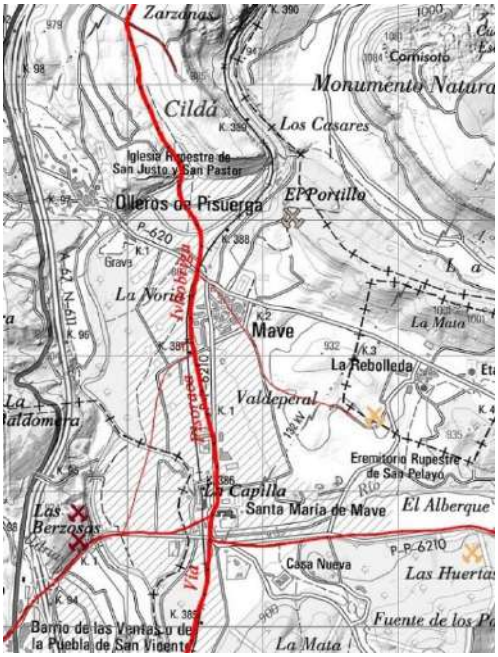


FIGURA 5. *Vías romanas (en rojo) utilizadas para el transporte de los bloques de la muralla desde las canteras.*

En los muros del castro, hay bloques primarios de cantera; además, muchas de las piezas están confeccionadas con materiales de poca calidad, groseros (con cantos, nódulos de hierro, etc.), blandos e incluso con fisuras. No se parecen a los sillares de un edificio, ni en volumen (son mucho mayores), ni en forma (la mayor dimensión es corta), ni en calidad, ni en el tipo de terminación superficial (o no tienen o es basta). Son bloques cortados con prisas, quizás por personas poco profesionales de la cantería, o al menos en parte. Se ven bloques colocados a la contra de la ley de cantera.

Varios bloques presentan las hendiduras/cajas confeccionadas para ajustar los sistemas de elevación, de dos tipos: largas y profundas en bloques muy pesados, destinadas a algún tipo de clavija/castañuela; y, las de otras piezas menores, que se elevarían con unas garras/pinzas, algunas de considerables dimensiones. También hay bloques con rebajes, en el borde, para grapas de hierro. Otro rasgo muy observado es la labra para rebajar un borde, *in situ*, en piezas alargadas, para un buen encaje y asiento con el bloque colindante.



FIGURA 6. *Bloque primario en la cantera de Las Huertas (izquierda). Bloque con huellas del pico, en arco de 90 cm (trabajador de 1,74 m de estatura) y rebaje lateral (derecha). Obsérvese la escasa calidad de la piedra.*

REFERENCIAS

García de los Ríos Cobo, J.I. (2017): *Las canteras históricas de Castilla y León*. SIEMCALSA. Valladolid. Informe interno.

García de los Ríos Cobo, J.I. y Báez Mezquita, J.M. (2001): *La piedra en Castilla y León*. Junta de Castilla y León, Valladolid, 346 p.

García de los Ríos Cobo, J.I., García Talegón, J., López Plaza, M., López Moro, F.J. e Íñigo, A.C. (2011): Los granitos silicificados del Este de Sayago (Zamora): canteras históricas y comparación de sus propiedades físico-mecánicas con los de areniscas y conglomerados. En: *De los plutones a los monumentos: un recorrido temático por la piedra del este de Sayago (Zamora)*. Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo, Zamora, 51-67.

García-Guinea, M.A., González Echegaray, J., y San Miguel Ruiz, J.A. (1966): *Excavaciones en Monte Cildá. (Olleros de Pisuerga, Palencia) (campañas 1963-1965). Excavaciones Arqueológicas en España nº 61, 68 p.* Madrid.

Iglesias Gil, J.M. y Ruiz Gutiérrez, A. (2006): Epigrafía y muralla de Monte Cildá (Aguilar de Campóo, Palencia): Cuestiones en torno a la cronología. En: *Actas y Comunicaciones del Instituto de Historia Antigua y Medieval*, 3: 1-14.

López Olmedo, F., Enrile Alvir, A. y Cabra Gil, P. (1997): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 133 (Prádanos de Ojeda*). I.T.G.E., Madrid.

Moreno Gallo, I. (2011-2020): *Vía romana de Pisoraca a Ivliobriga*. Vías romanas de Castilla y León. www.viasromanas.net

Pujalte, V., Hernández, J.M., Robles, S. y Alonso, J.L. (2004): Extensión del Jurásico final-Barremiense en la Cuenca de Aguilar. En: *Geología de España*. (J.A. Vera, ed.). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico de España, Madrid, 339-341.

Pujalte, V. y Robles, S. (2008): Parasecuencias Transgresivo-Regresivas en un Cortejo Transgresivo: parte superior de la Fm Utrillas en Olleros de Pisuerga, Palencia. *Geogaceta*, 44: 187-190.

Quintana López, J., García de los Ríos Cobo, J.I. y Estremera Portela, M.S. (2018): Investigaciones arqueológicas en el yacimiento de La Capilla en Santa María de Mave (Aguilar de Campóo, Palencia). *Sautuola,* 23:171-186.

La influencia de la insolación en la distribución anisótropa del deterioro por cristalización de sales del patrimonio arquitectónico.

The influence of insolation on the anisotropic distribution of salt crystallization decay in built heritage.

M. Gomez-Heras[1], L. López-González[2], M. T. Gil-Muñoz[3], D. Benavente[4] y J. Martínez-Martínez[5]

1 Departamento de. Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid, miguel.gomezheras@uam.es
2 Arquitecta independiente aloplag@gmail.com
3 Departamento de Pintura y Conservación-Restauración, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, mariatgi@ucm.es
4 Departamento de Ciencias de la Tierra y el Medioambiente, Universidad de Alicante, 03690 Alicante, david.benavente@ua.es
5 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), 28760 Tres Cantos (Madrid), javier.martinez@igme.es

Palabras clave: Meteorización, insolación, anisotropía, conservación del patrimonio arquitectónico.

Resumen

La radiación solar sobre las superficies y la baja conductividad térmica generan diferencias térmicas en las rocas utilizadas como materiales de construcción que pueden afectar a los procesos de cristalización de sales. El sobrecalentamiento de los elementos que reciben mayor radiación solar puede modificar las condiciones de sobresaturación, donde cristalizan las sales y cambios de fase en sistemas con diferentes fases hidratadas (como es el caso del $MgSO_4 \cdot nH_2O$). Este trabajo analiza el deterioro diferencial de los capiteles y arquivoltas de la portada sur del Monasterio de Santa María de Bonaval (Guadalajara). Estos capiteles presentan un fuerte deterioro por cristalización de sales que produce descamados y disgregación granular que afecta en mayor medida a los elementos que reciben la radiación solar desde el sureste. El objetivo principal de este trabajo es establecer la relación entre las diferencias en las temperaturas superficiales con la posibilidad de la existencia de ciclos de transiciones de fase epsomita-hexahidrita que pudiesen haber generado el deterioro diferencial de los elementos de la portada estudiada. Para ello, se presentan datos de distribuciones de temperatura aparente superficial obtenidas a partir de termografía de infrarrojos y se relacionan con los análisis realizados sobre las sales presentes en estos elementos constructivos, así como con las formas de deterioro generadas.

Abstract

The solar radiation on the surfaces of buildings and the low thermal conductivity generate thermal differences on the of the rocks used as construction materials that can affect salt crystallization processes. The overheating of elements that receive greater solar radiation can modify the conditions of supersaturation, the position of salt crystallization, and phase changes in systems with different hydrated phases (such as $MgSO_4 \cdot nH_2O$) compared to other elements that receive less direct insolation. This work analyses the differential deterioration of the capitals and archivolts of the southern portal of the Monastery of Santa María de Bonaval (Guadalajara). These capitals exhibit severe deterioration due to salt crystallization (mainly epsomite) which causes flaking and granular disintegration, affecting to a much greater extent the elements that receive solar radiation from the southeast. The main objective of this work is to establish the relationship between differences in surface temperatures and the possibility of the existence of epsomite-hexahydrite phase transition cycles that may have caused the differential deterioration of the elements of the studied façade. For this purpose, data on apparent surface temperature distributions obtained from infrared thermography are related to the analyses conducted on the salts present in these building elements, as well as with the forms of deterioration generated.

Agradecimientos

Esta publicación es parte de los proyectos de I+D+i PID2020-116896RB-C21 y PID2020-116896RB-C22, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (Ministerio de Ciencia e Innovación).

Granitoides utilizados en la ciudad de Salamanca: contraste geológico y papel desempeñado en su historia constructiva.

Granitoids rocks used in the city of Salamanca: contrasting geological features and role played on its construction history.

M. González Sánchez[1], F.J. López-Moro[2], M. López-Plaza[3], A. C. Íñigo Íñigo[1] y J.I. García de los Ríos Cobo[4]

1 Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNASA-CSIC), Cordel de Merinas, 40-52. 37008 Salamanca, España. m.g@csic.es, adolfo.inigo@irnasa.csic.es
2 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), Oficina de Salamanca, Plaza de la Constitución 1, 37001, Salamanca, España. fj.lopez@igme.es
3 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca Plaza de los Caídos, s/n. 37008 Salamanca, España. milplaz@usal.es
4 SIEMCALSA, Av. Rodrigo Zamorano, 47151 Boecillo, Valladolid, España. jigarciarioscobo@gmail.com

Palabras clave: Granitoides, plutones, canteras, contrastación, historia constructiva de Salamanca.

Resumen

A lo largo de los siglos se han utilizado en la ciudad de Salamanca tres tipos principales de granitoides procedentes de las siguientes localidades: 1) Los Santos, 2) Martinamor, y 3) Villavieja de Yeltes. Se ha abordado una contrastación geológica y sistemática de estos granitoides, incluyendo los siguientes aspectos: (i) modo de yacer (borde de gran batolito; complejo laminar deformado; y plutón circunscrito tardío, respectivamente), (ii) geoquímica y petrogénesis (tipo I contaminado; tipo S fuertemente peralumínico y evolucionado; y "serie mixta" o híbrido H, respectivamente, (iii) petrografía (biotítico con textura porfídica y color gris azulado; turmalinífero con textura nodulosa y color blanco; de dos micas con textura porfídica y tono ocre, respectivamente), y iv) comparación litológica y composicional de los respectivos tipos y subtipos entre cantera y monumento. La utilización de cada uno de ellos implicó los siguientes contextos respectivos: 1) construcción del Puente Romano, transportando el material por la Vía de la Plata, y reintroducción en el Renacimiento; 2) enlosado del Puente Romano del siglo XVI, reforzamiento de la Catedral tras el terremoto de Lisboa de 1755, y construcción del neoclásico Palacio de Anaya; y 3) construcción de genuinos monumentos del eclecticismo salmantino, tras la puesta en marcha del ferrocarril al oeste de la provincia. Durante los siglos XIX y XX los tres tipos de granito han competido y se han relevado según sus propiedades litológicas, su caché y el contexto socioeconómico cambiante.

Abstract

Over the centuries, three main types of granitoids have been used in the city of Salamanca, from the following localities: 1) Los Santos, 2) Martinamor and 3) Villavieja de Yeltes. A systematic geological comparison of these granitoids was carried out, including the following aspects (i) emplacement (large batholith margin; deformed laminar complex; and well-defined late pluton, respectively), (ii) geochemistry and petrogenesis (contaminated type I; highly peraluminous and evolved type S; and "mixed series" or hybrid H, respectively), (iii) petrography (biotite-bearing granite or granodiorite with porphyritic texture and bluish-grey color; tourmaline-bearing alkali-feldspar granite with nodular texture and white color; and two-mica bearing granite with porphyritic texture and ochre color, respectively), and iv) lithological and compositional comparison of the respective types and subtypes between quarry and monument. The use of each of them was connected to the following respective contexts: 1) the construction of the Roman Bridge, transporting the material through the Vía de la Plata, and its reintroduction in the Renaissance; 2) the tiling of the 16th century Roman Bridge, the reinforcement of the Cathedral after the Lisbon earthquake of 1755, and the construction of the neoclassical Palacio de Anaya; and 3) construction of genuine eclectic monuments from Salamanca, after the railway was launched to the west of the province. During the 19th and 20th centuries, the three types of granite competed with each other and were relieved according to their lithological characteristics, their cache and the changing socioeconomic context.

Rocas vaugneríticas utilizadas en el Renacimiento y Barroco de la ciudad de Salamanca: singularidad geológica y patrimonial.

Vaugneritic rocks used in the Renaissance and Baroque of the city of Salamanca: geological and heritage singularity.

M. González Sánchez[1], F.J. López-Moro[2], M. López-Plaza[3], A.C. Íñigo Íñigo[1] y J.I. García de los Ríos Cobo[4]

1 Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNASA-CSIC), Cordel de Merinas, 40-52. 37008 Salamanca, España. m.g@csic.es, adolfo.inigo@irnasa.csic.es
2 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), Oficina de Salamanca, Plaza de la Constitución 1, 37001, Salamanca, España. fj.lopez@igme.es
3 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de los Caídos, s/n. 37008 Salamanca, España. milplaz@usal.es
4 SIEMCALSA, Av. Rodrigo Zamorano, 47151 Boecillo, Valladolid, España. jigarciarioscobo@gmail.com.

Palabras clave: Vaugneritas evolucionadas, plutón zonado, cromatismo, Renacimiento, Barroco.

Resumen

Las vaugneritas utilizadas en Salamanca, ciudad Patrimonio de la Humanidad, proceden de un pequeño plutón (1,5 km^2) de zonación compleja, situado a 40 km al oeste de la capital. Petrográficamente, oscilan entre cuarzomonzodioritas y cuarzomonzonitas, con notables variaciones en la textura (de vaugnerítica gruesa a fina) y en el índice de color, M' (de 19 a 44). Geoquímicamente, el plutón, datado en 318 ±1,4 Ma por U-Pb TIMS en circón (López-Moro et al., 2017), muestra un alto grado de diferenciación con respecto a otros vaugneríticos del Macizo Ibérico, con facies de hasta un 61% en SiO_2. Sus características ambivalentes, técnicas y estéticas, han sido aprovechadas en los monumentos en un triple sentido: 1) como material resistente, usado en zócalos y pavimentos; 2) como material selecto para las columnas, jambas y dinteles de los palacios del Renacimiento; y 3) para las portadas barrocas por los contrastes cromáticos, entre las facies más finas oscuras y las gruesas biotíticas más claras. La continuidad en el uso de las vaugneritas, desde el Renacimiento de la segunda mitad del siglo XVI y el barroco de las primeras décadas del siglo XVII hasta el barroco evolucionado, contribuyó a armonizar la *varietas* salmantina, un concepto muy valorado artísticamente, pero poco reconocido por esta recurrencia pétrea.

Abstract

Vaugneritic rocks used in Salamanca, a World Heritage City, come from a small pluton (1.5 km^2) with complex zoning, located about 40 km west of the capital. Petrographically, they are quartzmonzodiorites to quartzmonzonites, with notable variations in texture (from coarse to fine vaugnerite) and color index (from 19 to 44). Geochemically, the pluton, dated at 318 ± 1.4 Ma by U-Pb TIMS on zircon (López-Moro et al., 2017), shows a high degree of differentiation compared to other vaugnerites from the Iberian Massif, with facies up to 61% in SiO_2. Its ambivalent technical and aesthetic characteristics have been used in monuments in a triple sense: 1) as a resistant material, used for plinths and pavements; 2) as a selected material for the columns, jambs and lintels of Renaissance-style palaces; and 3) for Baroque-style doorways due to the chromatic contrasts between the finer, dark facies and the coarser, lighter biotite facies. The continuity in the use of vaugnerites, from the Renaissance of the second half of the 16th century, through the Baroque of the first decades of the 17th century, to the late Baroque, contributed to the harmonization of the Salamanca *varietas*, a concept that was highly valued artistically, but little recognized by this recurring stone.

Referencias

López-Moro, F.J., Romer, R.L., López-Plaza, M., González Sánchez, M. (2017). *Geologica Acta* 15, 395-408.

Cambiando paradigmas en el NW peninsular: geología, arqueología y arqueometría del mármol de Gondrame.

Changing paradigms in the NW: geology, archaeology and archaeometry of the Gondrame marble.

A. Gutiérrez García-M. [1], M.C. Savin[1,2], S. González Soutelo[3], I. Pianet[4], M. Brilli[5] y M.P. Lapuente Mercadal[6,1]

1 Institut Català d'Arqueologia Clàssica (ICAC). Plaza Rovellat s/n. 43003 Tarragona. agutierrez@icac.cat
2 Departament de Ciències de l'Antiguitat i de l'Edat Mitjana, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra 08193 Cerdanyola del Vallès, mcsavin@icac.cat
3 Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, silvia.gonzalezs@uam.es
4 Archéosciences Bordeaux, UMR CNRS-Université Bordeaux-Montaigne 6034, Maison de l'archéologie, Esplanade des Antilles, 33600 Pessac, Francia, isabelle.pianet@u-bordeaux-montaigne.fr
5 Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria – CNR, 00015 Roma, Italia, mauro.brilli@cnr.it
6 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza (UNIZAR), C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza, plapuent@unizar.es

Palabras clave: canteras, mármol, Arqueometría, época romana, Galicia

Resumen

En este trabajo presentamos los resultados del estudio interdisciplinar llevado a cabo en el marco del proyecto *Marmora Galicia* y que ha sacado a la luz un mármol hasta la fecha desconocido en el panorama de la Hispania romana. Gracias a la multiplicidad de aproximaciones (desde la geología, la arqueología y la documentación histórica) y a la aplicación de una variedad de métodos analíticos, se ha podido confirmar que el mármol blanco de grano grueso que aflora cerca de Gondrame fue empleado desde época romana. Expondremos la metodología empleada, los afloramientos localizados, las canteras y los elementos elaborados en este mármol que hemos documentado en diferentes museos y monumentos del patrimonio cultural gallego. A pesar de lo reducido de la explotación y de la producción documentadas hasta la fecha, la constatación del empleo del mármol de Gondrame implica un cambio de paradigma sobre lo tradicionalmente considerado sobre la explotación de los recursos líticos en este territorio; es decir, que no únicamente el mármol de O Incio fue explotado en la antigüedad y que necesariamente debemos revisar lo asumido hasta muy recientemente. Así, el mármol de Gondrame es un ejemplo del potencial para avanzar en el conocimiento histórico-arqueológico y geológico de un territorio a través de sus recursos geológicos, incluso cuando, como en este caso, éste es relativamente escaso a nivel geológico y patrimonial.

Abstract

We present the results of an interdisciplinary study carried out within the framework of the *Marmora Galicia* Project, which has led to reveal a previously unknown marble in the Roman Spain scene. Thanks to the multiple approaches (from geology, archaeology, and historic sources) and the implementation of a variety of well-tested analytical method, we have confirmed that the coarse-grained white marble outcropping near Gondrame was used since the Romans. We will show the methodology applied, the outcrops and quarries found, as well as the objects made with this marble that we have identified in different Galician museums and monuments of cultural heritage. Despite the reduced size of the exploitation and production recorded so far, a paradigm shift emerges in the previous conceptions on stone resources exploitation in Roman Galicia; that is, that not only the marble from O Incio was exploited in Antiquity and that a reviewing of the previous assumptions is needed. The marble of Gondrame is, therefore, an ideal case study showing the possibilities for the advancement of historical, archaeological and geological knowledge of a given territory through their geological resources even when, as in this case, these are comparatively scarce in both the geological and heritage record.

El “lapidario” del Camino de Santiago en el CN IGME-CSIC: un muestrario petrológico del Camino Francés.

The “lapidary” of the St. James Way at the CN IGME-CSIC: a petrological sample of the French Way

R. Jiménez Martínez[1], E. Álvarez Areces[1] y R. González Laguna[1]

1 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. r.jimenez@igme.es e.alvarez@igme.es ruth.gonzalez@igme.es

Palabras clave: Camino de Santiago, divulgación científica, Museo Geominero, patrimonio geológico mueble, petrología.

Resumen

Algunos proyectos generan un importante patrimonio geológico mueble, a partir de las muestras recogidas en los trabajos de campo. De esta forma, entre 2006 y 2009 se desarrolló en el Instituto Geológico y Minero de España el proyecto “Caracterización tecnológica de las piedras de construcción empleadas en el patrimonio cultural del Camino de Santiago”, dedicado al estudio de las rocas del rico patrimonio arquitectónico de esta vía de peregrinación, intentando encontrar la procedencia de las canteras que aportaron los materiales (Jiménez Martínez y Díaz Martínez, 2013; Álvarez Areces, 2016).

Se muestrearon un total de 43 litologías principales y otras de menor importancia, donde se observan los caracteres distintivos de los tres grupos genéticos de rocas (sedimentarias, metamórficas e ígneas).

En el presente trabajo se describe este “lapidario” de rocas del Camino, detallando los elementos que lo constituyen. Así mismo se señalan las principales canteras de procedencia y las construcciones más relevantes donde se han utilizado estas rocas. Finalmente, este trabajo también sirve de presentación de este muestrario petrográfico, que una vez depositado en el museo pasará a estar a disposición de cualquier persona interesada, en especial alumnos, docentes y grupos de investigación.

Abstract

Some projects generate an important movable geological heritage, based on samples collected during field work. In this way, between 2006 and 2009, the project “Technological characterization of construction stones used in the cultural heritage of the St. James Way” was developed at the Geological and Mining Institute of Spain, dedicated to the study of the rocks used in the rich architectural heritage of this pilgrims way, trying to find the origin of the quarries that provided the materials (Jiménez Martínez & Díaz Martínez, 2013; Álvarez Areces, 2016).

A total of 43 main lithologies and others of lesser importance were sampled, where the distinctive characters of the three genetic groups of rocks (sedimentary, metamorphic and igneous) can be observed.

In this work, this “lapidary” of rocks from the Way is described, detailing the elements that constitute it. Likewise, the main quarries of origin and the most relevant constructions where these rocks have been used are indicated. Finally, this work also serves as a presentation of this petrographic sample, which once deposited in the museum will become available to anyone interested, especially students, teachers and research groups.

Referencias

Álvarez Areces, E. (2016). *De Piedra. Cómo el estudio de los materiales pétreos de construcción ofrece una nueva visión del legado cultural del Camino de Santiago.* Editorial Catarata-Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Colección Planeta Tierra, 15, Madrid, 127 p.

Jiménez Martínez, R. y Díaz Martínez, E. (2013). *Las piedras del Camino de Santiago en Galicia.* Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 268 p.

Los recursos geológicos de la ciudad romana de *Segobriga*: Las canteras urbanas y las canteras de Diana

Geological resources of the roman city of *Segobriga*: the urban quarries and the Diana quarries.

R. Jiménez Martínez[1], J. Luengo[1], J. Martínez-Martínez[1], R. Cebrián[2].

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. r.jimenez@igme.es, j.luengo@igme.es, javier.martinez@igme.es
2 Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid. Calle Profesor Araguren s/n. 28040 Madrid. marcebri@ucm.es

Palabras clave: dolomías, calizas, Cabeza de Griego, Segóbriga, estratigrafía.

Resumen

El presente trabajo pretende un acercamiento al marco extractivo y caracterización geológica de las rocas empleadas en las construcciones públicas de Segóbriga en época romana. Las huellas romanas de extracción de piedra se encuentran, *in situ* en la propia ciudad de Segóbriga y principalmente en la zona denominada canteras de Diana. Las grandes construcciones públicas de la ciudad (teatro, anfiteatro, foro) se construyeron sobre la ladera del cerro Cabeza de Griego, aprovechando el desnivel natural para generar "canteras asociadas a estructuras" en las que el frente de cantera formaba parte de la propia construcción. Las canteras de Diana, por otra parte, se ubican en el paraje de El Almudejo a unos 1500 m al SO de la ciudad, y constituyen un conjunto de explotaciones a cielo abierto en distintos sectores paralelos de trabajo próximos entre sí, pero autónomos (Abascal y Cebrián, 2010).

El análisis geológico de este paraje y del cerro Cabeza de Griego muestra que ambos relieves están formados principalmente por secuencias de dolomías y calizas y en menor medida de areniscas y margas de las formaciones Cuevas Labradas, Utrillas, Villa de Ves, Casa Medina y Ciudad Encantada (Cretácico). Los resultados revelan que la explotación de los recursos geológicos locales se produjo de forma selectiva, explotando principalmente determinados niveles de dolomías blancas de textura muy fina y homogénea de la Formación Villa de Ves. Únicamente en algunas estructuras del conjunto urbano se llegan a explotar volúmenes minoritarios de la formación Cuevas Labradas (cerro Cabeza de Griego).

Abstract

Present work aims to approach the extractive sector and geological characterization of the rocks used in the public constructions of Segóbriga in Roman times. Roman exploitation can be found, in situ in the city of Segóbriga itself but mainly in the so-called Diana quarries. The large public constructions of the city (theater, amphitheater, forum) were built on the slope of the Cabeza de Griego hill, taking advantage of the natural unevenness to generate "quarries associated with structures" in which the quarry front was part of the construction itself. The Diana quarries are located in the El Almudejo area about 1500 m SW of the city, and constitute a group of open-cast quarries in different parallel working sectors (Abascal and Cebrián, 2010). The geological analysis of the El Almudejo area and the Cabeza de Griego hill shows that both reliefs are mainly formed by dolostone and limestone sequences and to a lesser extent by sandstones and marls of the Cuevas Labradas, Utrillas, Villa de Ves, Casa Medina and Ciudad Encantada formations (Cretaceous). Results reveal that the exploitation of local geological resources was selectively focused on certain levels of white dolostone of very fine and homogeneous texture of Villa de Ves Formation. A few urban structures exploit the Cuevas Labradas formation obtaining a small rock volume.

Agradecimientos

Este trabajo se inserta en el marco del proyecto PID2022-137051NB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE (IP: R. Cebrián).

Referencias

Abascal, J. M. y Cebrián, R. (2010). En: *Las áreas suburbanas en la ciudad histórica. Topografía, usos, función* (D. Vaquerido, Ed.). Universidad de Córdoba, Córdoba, 289-308.

Caracterización geológica de los granitos de Cardeñosa utilizados en los monumentos de Ávila: elemento clave para geoturismo.

Geological characterization of Cardeñosa granites used in the monuments of Avila: a key element for geotourism.

F.J. López-Moro[1], M. López-Plaza[2] y J.I. García de los Ríos Cobo[3]

1 IGME-CSIC, Oficina de Salamanca, Plaza de la Constitución 1, 37001, Salamanca (Spain). fj.lopez@igme.es
2 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca. milplaz@usal.es
3 Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A., Av. Rodrigo Zamorano, 47151 Boecillo, Valladolid. jigarciarioscobo@gmail.com

Palabras clave: Meso-estructuras, petrografía, geoquímica, geoturismo.

Resumen

Se realiza una caracterización geológica de distintos afloramientos de granito con atractivo para el diseño de rutas geoturísticas. Estos granitos se usaron con profusión en la construcción de los principales monumentos de Ávila. Las rutas se ubican fundamentalmente en el área de Cogotas, zona también de gran interés arqueológico. La detallada cartografía y el estudio petrográfico realizado nos ha permitido diferenciar distintos tipos graníticos (hasta 5) con distinto tamaño de grano, mineralogía y grado de deformación. Los granitos más gruesos y con mayor abundancia en minerales máficos (oscuros) son anteriores a los finos, que, a la vez, son más leucocráticos (claros), y, además, apenas registran una orientación mineral, que es muy visible en los gruesos. La secuencia de emplazamiento de los distintos tipos graníticos se observa en varios puntos de la zona de Cogotas, donde aparecen meso-estructuras como "stoping" (i.e., bloques angulosos de un granito anterior que se hunden desde el techo en un magma granítico posterior), bandeados de micas en las zonas de borde, bordes de enfriamiento ("chilled margins") de tamaño de grano muy fino y máxima nucleación mineral, así como la entrada de pulsos de magma reducidos (diques) en otro magma todavía no consolidado, dando lugar a los denominados diques sin-plutónicos. También es posible observar la fase volátil, que quedó ocasionalmente fosilizada en unas estructuras ovoides denominadas cavidades miarolíticas. Por último, cada granito presenta una signatura geoquímica característica que nos sirve para ahondar en su petrogénesis, aspecto que puede ser también utilizado como elemento divulgador.

Abstract

A geological characterization of different granite outcrops with attractive for the design of geotourism routes is carried out. These granites were widely used in the construction of the main monuments of Avila. The routes are located mainly in the Cogotas area, also of great archaeological interest. The detailed mapping and petrographic study carried out has allowed us to distinguish different granite types (up to 5) with different grain size, mineralogy and degree of deformation. The coarser granites, with a greater abundance of mafic minerals (dark), are older than the finer ones, which are at the same time more leucocratic (light) and, in addition, hardly register a mineral orientation, which is very visible in the coarser ones. The sequence of emplacement of the different granitic types is observed in several places in the Cogotas area, where mesostructures such as stoping (i.e., angular blocks of an earlier granite sinking from above into a later granitic magma), mica banding in the margin zones, chilled margins of very fine grain size and maximum mineral nucleation, as well as the intrusion of small magma pulses (dykes) into another not yet consolidated magma give rise to the so-called syn-plutonic dykes. It is also possible to observe the volatile phase, sometimes fossilized in ovoid structures called miarolitic cavities. Finally, each granite has a characteristic geochemical signature that allows us to study its petrogenesis, an aspect that can also be used as an educational element.

Las canteras históricas de granito de la zona de Cardeñosa (Ávila): tipos, distribución, técnicas de corte y potencial geoturístico.

The historical granite quarries of Cardeñosa (Ávila): types, distribution, splitting techniques and geotourism potential.

F.J. López-Moro[1], M. López-Plaza[2] y J.I. García de los Ríos Cobo[3]

1 IGME-CSIC, Oficina de Salamanca, Plaza de la Constitución 1, 37001, Salamanca. fj.lopez@igme.es
2 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca 37008 Salamanca. milplaz@usal.es
3 Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A., Av. Rodrigo Zamorano, 47151 Boecillo, Valladolid. jigarciarioscobo@gmail.com

Palabras clave: Cuñera, castro de Las Cogotas, orientación mineral, diaclasado, Gris Cardeñosa

Resumen

Se presenta un inventario exhaustivo de cerca de 270 canteras de granito de la zona Cardeñosa (Ávila), cuya actividad se ha extendido desde la Edad de Hierro hasta nuestros días, con un importante suministro de piedra en el Siglo de Oro Español, tanto a Ávila capital, como hacia la ciudad de Valladolid. Las labores aparecen en todos los tipos graníticos: granito grueso ± porfídico biotítico (Gris Cardeñosa), granito medio inequigranular, granito fino biotítico, granito fino noduloso, y granito fino-medio de dos micas ± turmalina (Rubio Cardeñosa). Se observa una mayor densidad de explotaciones antiguas en la proximidad a caminos que se dirigían a molinos medievales. La orientación mineral (fábrica) fue determinante para su explotación, siendo las facies más orientadas las más beneficiadas. El estudio de la blocometría realizado en canteras (i.e., direcciones de diaclasas y sus espaciados) revela que las facies graníticas gruesas permiten obtener bloques paralelepipédicos grandes, mientras que en las finas, los bloques son de menores dimensiones, al menos en cuanto a su anchura. Las labores históricas son todas pequeñas y superficiales. Se explotaba el berrocal de bolos, o bien aquellas zonas en pendiente hasta el segundo levante, lo que originaba una estructura escalonada. Se deduce una evolución en las técnicas de corte, desde cuñeras muy antiguas, de gran longitud (30 cm), pasando por cuñeras de 10-15 cm en frentes antiguos, hasta cuñeras de menos de 10 cm en frentes más modernos. Las marcas de barreno caracterizan a las labores más modernas, que suelen aparecer superpuestas a las históricas en el mismo lugar. Todos estos aspectos hacen que estas canteras históricas presenten un alto potencial para elaborar rutas geoturísticas que preservarían, además, dichas canteras.

Abstract

An exhaustive inventory is presented of some 270 granite quarries in the area of Cardeñosa (Ávila), whose activity spans from the Iron Age to the present day, with an important supply of stone in the Spanish Golden Age, both to Avila and to Valladolid. The quarries show all types of granite: coarse granite ± biotitic porphyritic (Gris Cardeñosa), medium inequigranular granite, fine biotitic granite, fine nodular granite and fine-medium granite of two micas ± tourmaline (Rubio Cardeñosa). A higher density of old exploitations is observed in the vicinity of ancient roads leading to medieval mills. The mineral orientation (fabric) was determinant for its exploitation, the most oriented facies being the most exploited. The study of the blocometry carried out in quarries (i.e., directions of diaclases and their spacing) reveals that the coarse granitic facies yields large parallelepipedal blocks, while in the fine ones, the blocks are smaller, at least in terms of width. The historic quarries are all small and shallow. The granite boulders were exploites, as well as those areas on slopes up to the second subhorizontal exfoliation joint, which gave rise to a stepped structure. An evolution in splitting techniques can be deduced, from very old wedge marks of great length (30 cm), to wedge marks of 10-15 cm in old quarries, to wedge marks of less than 10 cm in more modern quarries. Auger marks characterize the more modern workings, which usually appear superimposed on the historical ones in the same place. All these aspects make these historic quarries have a high potential for the design of geotourist routes that would also preserve these quarries.

Localización y contextualización de las canteras históricas de las calizas coloreadas de Espejón (Soria).

Location and contextualization of the historical quarries of the colored limestones of Espejón (Soria).

J. Martínez-Martínez[1], J.F. Mediato[1], V. García-Entero[2].

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. javier.martinez@igme.es, jf.mediato@igme.es
2 Departamento de Prehistoria y Arqueología. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Calle Senda del Rey, 7. 28040 Madrid. vgarciaentero@geo.uned.es

Palabras clave: marmor, cantera romana, cantera renacentista, caliza jurásica, Espejón

Resumen

Las calizas coloreadas (amarillo y morado) explotadas en Espejón (Soria) han sido un material de reconocido prestigio a lo largo el tiempo. Especialmente se reconocen dos periodos de gran relevancia: en época romana (presencia en *Clunia*, *Legio*, *Termes* y en la *villa* de La Olmeda, siglos I d.C. al V d.C.) y en el Renacimiento (en edificios como el palacio de los Condes de Miranda en Burgos, la Catedral de Toledo, el monasterio de las Descalzas Reales o en la Basílica del Monasterio de El Escorial, entre los más destacados). Sin embargo, a partir del siglo XVIII y especialmente en el siglo XIX, la explotación de estas calizas coloreadas decae, entrando en el abandono y en el olvido en el siglo XX.

El objetivo de este trabajo es localizar y recopilar los principales frentes de cantera preservados, analizando el sistema de explotación y el paisaje de cantera asociado, contextualizándolo en el ámbito geológico e histórico-cultural. En rasgos generales, las calizas amarillas y moradas de Espejón (Jurásico-Dogger) se explotaron en bancos estratificados con buzamientos moderados-altos (habitualmente 30º-90º), empleando el sistema de barra-palanca para el arranque de los bloques, su deslizamiento ladera abajo y un primer escuadrado de bloques en plazas próximas a los frentes. De estos paisajes originales apenas se preservan, en el mejor de los casos, algunos frentes con cicatrices de arranque, vías de saca y unos escasos bloques abandonados, siendo las escombreras el máximo exponente de la imponente actividad extractiva que acumularon estas canteras a lo largo del tiempo.

Abstract

The colored limestones (yellow-purple) exploited in Espejón (Soria) have been a material of recognized prestige and great appreciation over time. In particular, two main are recognized: in Roman times (attested in the cities of Clunia, Legio, Termes and in the villa of La Olmeda, 1st to 5th century AD) and in the Renaissance period (in civil and religious buildings, such as the palace of the Counts of Miranda in Burgos, the Cathedral of Toledo, the monastery of the Descalzas Reales or in the Basilica of the Monasterio de El Escorial). However, from the 18th century and especially in the 19th century, the exploitation of these colored limestones declined, becoming abandoned and forgotten in the 20th century.

The objetive of this work is to locate and compile the main preserved quarry fronts, analyzing the exploitation system and the associated quarry landscape, constextualizing them in the geological and historical-cultural field. In general terms, the yellow and purple limestones of Espejón (Jurassic-Dogger) were exploited in stratified banks with moderate-high dips, using the bar-lever system to start the blocks, their sliding down the slope and a first block squaring in places close to the fronts. Of these original landscapes, in the best of cases, only a few fronts with scars from block removal, extraction routes and a few abandoned block are barely preserved. Waste dumps are, however, the greatest exponent that reflects the significant extractive activity that these quarries accumulated over time.

Agradecimientos: Estudio financiado por Fundación Palarq, IPs.: Virginia García-Entero y Javier Martínez-Martínez.

Recursos geológicos a lo largo del tiempo para construir una villa: el ejemplo de la villa romana de Noheda (Cuenca)

Geological resources along time for the constraction of a *villa*: the example of the roman *villa* of Noheda (Cuenca).

J. Martínez-Martínez[1], D. Sanz[2], N. Valverde[3], M.A. Valero[4].

1 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. javier.martinez@igme.es
2 Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Campus Universitario s/n. 16071 Cuenca. david.sanz@uclm.es
3 Escuela Politécnica de Cuenca. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Campus Universitario s/n. 16071 Cuenca. Nelia.Valverde@uclm.es
4 Facultad de Ciencias de la Educación y Humanidades. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Avenida de los Alfares, 44. 16071 Cuenca. MiguelAngel.Valero@uclm.es

Palabras clave: canteras históricas, arenisca, mampostería, sillería, mortero.

Resumen

En el patrimonio arquitectónico en general, y en las construcciones romanas en particular, es posible reconocer dos ámbitos en los materiales de construcción. Por una parte, los materiales empleados para el levantamiento de estructuras de carga y cerramiento (muros, bóvedas, arcos, pilares); y por otra parte, aquellos utilizados para la decoración y ornato de espacios interiores. Estos últimos (materiales ornamentales) suelen emplearse para reflejar el estatus, el poder y la importancia del edificio o del promotor de su construcción. Sin embargo, los primeros (los materiales estructurales) reflejan el aprovechamiento y la optimización de los recursos locales, más disponibles y económicos. En este trabajo se analizan los materiales estructurales empleados en la construcción de la Sala Triabsidiada de la villa romana de Noheda (Villar de Domingo García, Cuenca). Su ornamentación (estilo, calidad, tamaño y materiales) es un ejemplo extraordinario de tricora en pars urbana. Sin embargo, en este trabajo se aborda la selección de materiales (caliza, arenisca y yeso), su procedencia (canteras locales) y la técnica constructiva empleada para la erección de este monumental edificio (mampostería y sillería). Se analiza, además, la evolución de las técnicas y materiales a lo largo del tiempo: desde las fases más primitivas (siglos I a.C. y I d.C.), hasta la fase de monumentalización del espacio (finales del siglo III e inicios del siglo IV d.C.), incluyendo la remodelación posterior del conjunto (siglo IV d.C.).

Abstract

In architectural heritage in general, and in Roman constructions in particular, it is posible to recognize two types of construction materials. On the one hand, the materials used for the erection of load-bearing and enclosing structures (walls, vaults, arches, pillars); and on the other hand, those used for the decoration and ornamentation of interior spaces. The latter (ornamental materials) are usually used to reflect the status, power and importance of the building or the promoter of its construction. However, the former (structural materials) reflect the used and optimization of local resources, which are more available and economical. In this work, the structural materials used in the construction of the Triabsid Hall of the roman *villa* of Noheda (Villar de Domingo García, Cuenca) are analyzed. Its ornamentation (style, quality, size and materials) is an extraordinary example of urban tricora in a urban pars. However, this work addresses the selection of materials (limestone, sandstone and gypsum), their origin (local quarries) and the construction technique used for the erection of this monumental building (ashlars and blocks). The evolution of techniques and materials over time is also analyzed: from the most primitive phases (1st centuries BC ad 1st centuries AD), to the phase of monumentalization of the space (end of the 3rd century and beginning of the 4th century AD), including the later remodeling of the complex (4th century AD).

Guía de rocas -petrología y cromática-

Rock guide -petrology and chromatic-

R. Meseguer Mayoral[1] y E. Álvarez Areces[2]

1 Facultad de Bellas Artes. Universidad Complutense de Madrid (UCM). C/ Pintor El Greco, 2, 28040, Moncloa-Aravaca, Madrid. rosell.meseguer@pdi.ucm.es

2 Dpto. Recursos Geológicos para la Transición Ecológica, Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. e.alvarez@igme.es

Resumen: La relevancia e innovación del proyecto, *Guía de rocas -petrología y cromática-*, radica en la colaboración interdisciplinar de arte y geología, que se unen y dialogan para la creación de una guía nacional de rocas patrimoniales. Esta guía, creada con un cuidado diseño de su contenido gráfico y un lenguaje cercano, no se trata de un documento técnico, sino que acerca al ciudadano las canteras como fuentes para la obtención de recursos, proporcionando información detallada sobre las características petrológicas de cada tipo de roca. Incluye texturas, colores y composiciones mineralógicas de las mismas, además de resaltar sus usos particulares en el patrimonio arquitectónico, mostrando como la elección de los materiales ha influido en la estética y funcionalidad de los proyectos edilicios. Esta iniciativa presenta las principales rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas empleadas en el patrimonio histórico español, con el objetivo de fomentar la apreciación de su riqueza cultural, estética e histórica, contribuyendo así a la preservación y valorización del legado arquitectónico del país.

Palabras clave: Guía de rocas, petrología, arquitectura, arte, geología.

Abstract: *The relevance and innovation of the project, Rock guide -petrology and chromatic-, lies in the interdisciplinary collaboration of art and geology, which come together and dialogue for the creation of a national guide to heritage rocks. This guide, created with a carefully designed graphic content and a friendly language, is not a technical document, but rather brings the quarries closer to the public as sources for obtaining resources, providing detailed information on the petrological characteristics of each type of rock. It includes their textures, colors and mineralogical compositions, as well as highlighting their particular uses in architectural heritage, showing how the choice of materials has influenced the aesthetics and functionality of building projects. This initiative presents the main sedimentary, metamorphic and igneous rocks used in Spain's historical heritage, with the aim of promoting the appreciation of their cultural, aesthetic and historical richness, thus contributing to the preservation and enhancement of the country's architectural legacy.*

Key words: *Rock guide, petrology, architecture, art, geology.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El proyecto *Guía de rocas -petrología y cromática-*, se desarrolla con el objetivo de crear una guía para divulgar las rocas que han hecho posible la construcción de gran parte del patrimonio arquitectónico español. Con un lenguaje sencillo y un contenido visual cuidado se acerca al público en general a las principales características de las rocas empleadas históricamente, acentuando sus características petrológicas y estéticas: color, textura, acabados, etc., así como sus lugares de procedencia (canteras), y el patrimonio arquitectónico en las que han sido empleadas.

Los autores de la guía, colaboraran conjuntamente desde hace más de una década en diversos proyectos de investigación, para desde el arte divulgar y presentar los resultados científicos de diversos proyectos en el ámbito de la minería, rocas y minerales industriales. Ejemplos de estos trabajos son: (i) *Tamarugal* (Meseguer Mayoral, 2013) un archivo como metáfora del presente en la reconstrucción de la identidad social, política e historia en la Pampa del Tamarugal (Chile) y su actividad minera, (ii) el proyecto *Cáceres Abierto* (Meseguer Mayoral, 2019), con la inclusión de las rocas empleadas en el patrimonio arquitectónico de la provincia de Cáceres (Fig. 1), y (iii) *Quadra Minerale* (Meseguer Mayoral, 2021), en el que se desarrolla un repaso a los elementos del sistema periódico que forman parte de nuestra cotidianeidad, presentándolos como un diccionario a modo de vademécum (Fig. 2).

En esta ocasión la *Guía de rocas -petrología y cromática-* (GRPC), supone una publicación inédita, acercando a la ciudadanía a contenidos en relación a las rocas de construcción históricas y sus canteras. En las últimas décadas, se han publicado numerosos manuales, catálogos e inventarios en relación con las rocas de construcción, todos ellos publicaciones con contenidos técnicos para los profesionales del sector y la empresa,

cuyo objetivo era la comercialización de los productos, informar sobre sus características petrofísicas y con numerosas referencias a la situación del sector de la piedra natural (Roc Maquina, 2007).



FIGURA 1. *Documento de divulgación, Guía de mano (petrográfica). Cáceres Abierto 2019.*



FIGURA 2. *Quadra Minerale, 2021, diccionario en el que se incluyen las aplicaciones prácticas de los elementos de la tabla periódica y sus derivados.*

DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL

El proyecto pretende realizar una guía de mano nacional de rocas de uso patrimonial, en la que se presentan un total de 70 rocas empleadas en el patrimonio arquitectónico español, algunas de ellas no comerciales, y otras presentes, a día de hoy, en el mercado comercial de piedra natural. Todos los ejemplares propuestos tienen asociado un patrimonio cultural, y han sido empleados en la construcción de obra civil (palacios, casonas, etc.), religiosa (monasterios, iglesias, etc.) y otras obras, como pueden ser puentes, fuentes, etc., dejando un importante legado histórico arquitectónico. Así mismo, muchas de las rocas presentadas forman parte de la arquitectura popular, creando conjuntos uniformes en los que se emplea el mismo material pétreo, otorgando color y personalidad al paisaje y su arquitectura. Por ejemplo, los pueblos negros de La Cabrera (León), con el uso de pizarras, o el empleo de calizas cretácicas en Burgos, piedra de Hontoria, que proporciona luminosidad por su color blanco a todas sus construcciones históricas, como la Catedral o la Casa Cordón, entre muchas otras (Álvarez Areces, 2016).

El empleo de los materiales pétreos y sus relaciones con la arquitectura es uno de los aspectos que la GRPC quiere destacar. La interacción entre las propiedades de las rocas y las técnicas arquitectónicas históricas ofrece una ventana para una nueva interpretación de la arquitectura, y plantea desafíos interesantes y necesarios para la preservación del legado cultural construido (Álvarez Areces et al., 2017).

El patrimonio arquitectónico de España es un rico tapiz de estilos y materiales que refleja su diversidad geológica y su historia cultural. Las rocas empleadas en su construcción han dado forma y carácter a sus edificios históricos, desde la robustez del granito, hasta la elegancia del mármol, pasando por un gran número de materiales que en esta guía de presentan.

DESCRIPCIÓN FORMAL

Con una cuidada presentación, la GRPC, se estructura en relación con su génesis en tres grandes apartados: rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas, desmarcándose de otras guías o catálogos de rocas ornamentales que suelen clasificar estas como calizas, pizarras, mármoles y areniscas, sin agruparlas según su origen, sino como productos comerciales y materiales para la construcción.

De un total de 70 rocas presentadas, 30 de ellas pertenecen al conjunto de rocas sedimentarias, con ejemplos como la caliza de los páramos (Valladolid), piedra de Marés (Mallorca), piedra de Boñar (León) o arenisca de Juarros (Burgos). En el apartado de rocas metamórficas, se presentan un total de 20 ejemplares, entre los que destacan las pizarras de Bernardos (Segovia) o de La Cabrera (León), empleadas como elementos para cubiertas o solados, o el mármol de Macael (Almería), utilizado en multitud de elementos decorativos y proyectos arquitectónicos con proyección nacional e internacional. Por último, en el apartado de rocas ígneas, se señalan 20 de ellas, destacando el granito de Alpedrete (Madrid), granito de Porriño (Pontevedra) o granito de Trujillo (Cáceres), materiales empleados como elementos estructurales en un patrimonio histórico con una gran distribución territorial.

La información asociada a cada tipo de roca, en español e inglés, presenta los siguientes apartados:

nombre, clasificación, localización, área extractiva, características petrológicas y patrimonio arquitectónico asociado (Fig. 3).

Así mismo, con un lenguaje cercano, se aclaran conceptos técnicos y se reflexiona sobre el uso de las rocas en el patrimonio histórico y su utilización en función de sus propiedades. Por ejemplo, como el tamaño de grano condiciona la talla de elementos decorativos, como la cercanía de recursos pétreos favorece el desarrollo de conjuntos monumentales o el papel que juegan las texturas y colores a la hora de la selección de los materiales para la construcción.

Respecto al contenido gráfico de la GRPC, una cuidada selección de fotografías, documentos, dibujos, pinturas, plaquetas pulidas, etc., enriquecen y proporcionan un contenido inédito para el lector, acercándolo visualmente al mundo de las rocas históricas de construcción (Fig. 4).



FIGURA 3. *Guía de rocas, contenido técnico en referencia a sus características petrológicas, áreas extractivas y patrimonio arquitectónico asociado.*

ARTE, UNA HERRAMIENTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

La experiencia de anteriores proyectos nos demuestra como el arte participa positivamente en la etapa de divulgación y difusión de datos científicos. Así lo demuestran anteriores experiencias e iniciativas llevadas a cabo en el campo de la geología y la minería detalladas en el presente artículo.

El arte como herramienta de divulgación científica es un enfoque innovador que cruza fronteras disciplinarias, combinando la estética con la rigurosidad de los datos científicos. Esta sinergia entre arte y ciencia no solo promueve una mayor apreciación pública de la ciencia, sino que también estimula el pensamiento creativo en la investigación científica.

La utilización del arte para explicar la ciencia abre las puertas a nuevos horizontes de educación y comunicación, haciendo que el conocimiento científico sea más accesible y atractivo para un público más amplio.

Las investigaciones científicas, como en el caso de la GRPC presentan un gran interés científico-técnico, pero cuando la ciencia se formula con arte, las investigaciones no sólo tienen valor disciplinar, sino que también son capaces de inspirar y acercar a la sociedad a la formación de una cultura científica, siendo este uno de los objetivos de esta guía.

En este sentido, la simbiosis entre ciencia, tecnología y arte que presenta esta publicación, permite transformar conceptos complejos y datos en experiencia visuales, haciéndolos accesibles y atractivos para un público más amplio.

En definitiva, el arte no sólo complementa la divulgación científica, sino que también la enriquece, creando puentes entre la ciencia y el publico en general, estimulando el interés, la comprensión y la apreciación de la ciencia en la sociedad.



FIGURA 4. *Guía de rocas, entre su contenido destaca la presentación de plaquetas pulidas de los materiales pétreos empleados en el patrimonio arquitectónico español, en este caso la correspondiente a la caliza de Hontoria (Burgos).*

CONCLUSIONES

Las rocas de construcción empleadas en el patrimonio arquitectónico, los espacios de canteras históricas y las relaciones entre geología y arquitectura, están siendo objeto de numerosos estudios de carácter científico en la última década, traduciéndose en la publicación de un gran número de artículos científicos, contribuciones a congresos y material científico que por su contenido tienen un público receptor muy especializado y concreto.

El proyecto *Guía de rocas -petrología y cromática-* pretende un avance en la divulgación y valorización de las rocas que han hecho posible la construcción del patrimonio arquitectónico español. Su principal fortaleza radica en la eficaz colaboración interdisciplinar entre arte y geología, una fusión que no sólo enriquece el contenido de la Guía, sino que también lo hace accesible y atractivo para un público amplio y diverso.

La innovación del proyecto se desmarca de un enfoque puramente técnico, acercando la complejidad de la petrología a través de un lenguaje cercano y un diseño gráfico cuidadosamente elaborado. Esta estrategia hace que la Guía sea una herramienta educativa, tanto para aficionados como para profesionales, promoviendo una mayor comprensión y sensibilización por las rocas en el contexto del patrimonio arquitectónico.

La inclusión detallada de características petrológicas, texturas, colores, composiciones mineralógicas, junto con la explicación de sus usos en la arquitectura, ilustra de manera práctica la influencia directa de estos materiales en la estética y funcionalidad de edificios históricos y la importancia de las canteras como fuentes de recursos para la producción de estos conjuntos (Figs. 5 y 6).



FIGURA 5. *Cantera de arenisca de Villamayor (Salamanca), material con el que fue construido gran parte del conjunto monumental de la ciudad de Salamanca.*

Así mismo, al presentar las principales rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas empleadas en el patrimonio histórico, la Guía fomenta una apreciación de la riqueza cultural, estética e histórica de las rocas, contribuyendo a la conservación de este patrimonio.

Este proyecto no sólo es un tributo a la diversidad geológica de España a través de sus rocas de construcción, sino que también es un recurso para educar y sensibilizar al público en general sobre la importancia del patrimonio arquitectónico, las rocas y las canteras, demostrando como el diálogo entre arte y ciencia puede ser un poderoso aliado para la divulgación científica.



FIGURA 6. *La ciudad de Salamanca, en la que se emplea mayoritariamente, junto a otras litologías, la conocida como arenisca de Villamayor. Foto de la Catedral de Salamanca (Spain.info, 2024).*

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) por la documentación técnica y material para el desarrollo de la guía. A Marie Geneviève Alquier y por el diseño de la guía, a Antonio Tabernero por las tomas fotográficas de las rocas y a Raúl Bravo, por la inclusión de algunos de sus dibujos y pinturas.

REFERENCIAS

Álvarez Areces, E. (2016): *De Piedra. Cómo el estudio de los materiales pétreos de construcción ofrece una nueva visión del legado cultural del Camino de Santiago.* Catarata-Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Colección Planeta Tierra, 15, Madrid, 127 p.

Álvarez Areces, E., Utrero Agudo, M.A. y Baltuille Martín, J.M. (2017): *Geología y arqueología. Estratigrafía de la tierra, estratigrafía del patrimonio.* Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, 234 p.

Meseguer Mayoral, R. (2021): *Quadra Minerale.* Fundación Didac, Dardo, Meseguer, Madrid, 416 p.

Meseguer Mayoral, R. (2019): *Guía de Mano (Petrográfica). Cáceres Abierto 2019.* Junta de Extremadura, Consorcio Museo Vostell Malpartida, Fundación Helga Alvear y Museo de Cáceres, 40 p.

Meseguer Mayoral, R. (2013): *TAMARUGAL. Archivos del desierto minero.* Ayudas a la Promoción del Arte Español en el Exterior 2012 Ministerio de Cultura, Educación y Deportes de España, Madrid, 288 p.

Roc Maquina (2007): *La piedra natural de España,* 19ª edición. Red Bussines, Madrid, 544 p.

Spain.info (2024): *Catedral de Salamanca* [Imagen]. https://www.spain.info/es/lugares-interes/catedrales-salamanca/

Enfoque interdisciplinar de los factores de deterioro y condiciones microclimáticas de la Catedral de Cádiz.

Interdisciplinary approach to deterioration factors and microclimatic conditions of the Cathedral of Cadiz.

E. Molina-Piernas[1], M.J. Pacheco-Orellana[1], A. Sánchez-Bellón[1], F. Ladrón de Guevara[2], V. González Pérez[2], A. Sánchez Casas[3], J. Martínez-López[1], y S. Domínguez-Bella[1]

1 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz 11519, Puerto Real, Cádiz. eduardo.molina@uca.es, mariajesus.pacheco@uca.es, angel.sanchez@uca.es, javier.martinez@uca.es, salvador.dominguez@uca.es
2 La Consulta Arquitectos, Av. Ana de Viya, 7, 11009 Cádiz. curro@lcarquitectos.com, venancio@lcarquitectos.com.
3 Diócesis de Cádiz y Ceuta. Dpto. Obras, 11001, Cádiz. arquitecto@obispadocadizyceuta.es

Palabras clave: Piedra natural, morteros, sales, mapa de patologías, control microclimático.

Resumen

En la década de los 90, varios autores realizaron algunos estudios sobre la caracterización de los materiales constructivos de la Catedral de Cádiz, así como la identificación de sus principales patologías y sus consecuencias. Sin embargo, desde entonces poco o nada se ha vuelto a hacer para continuar con el control del estado de este edificio histórico. Considerando que la Catedral de Cádiz es uno de los edificios históricos más emblemáticos de esta ciudad y que ha estado expuesto durante décadas a sucesivos problemas, el Cabildo de la Catedral y la Diócesis de Cádiz y Ceuta, contando en todo momento con las autorizaciones administrativas necesarias, están realizando un gran esfuerzo mediante diferentes actuaciones para mejorar su estado de preservación. Esto ha propiciado recientemente la colaboración interdisciplinar entre varias entidades y profesionales (arquitectos, operarios, restauradores e investigadores del patrimonio, etc.) para llevar a cabo diversas actividades y, de entre las propuestas, una de ellas ha reconsiderado la toma no destructiva de muestras de las distintas variedades de piedra natural y morteros para su estudio petrológico y químico que permitirá la identificación e interpretación de las patologías. Adicionalmente se hará la toma de datos de valores termo-higrométricos, para controlar las condiciones microclimáticas del edificio. Con toda esta información se pretende establecer una base robusta de conocimiento actualizada para apoyar el correcto desarrollo y aplicación de los próximos proyectos de conservación y mantenimiento que en un futuro cercano se planteen.

Abstract

In the 90s, several authors carried out some studies about the characterization of the construction materials of the Cathedral of Cádiz, as well as the identification of their main pathologies and their consequences. However, since then practically no work has been done to continue monitoring the condition of this historical building. Considering that the Cathedral of Cádiz is one of the most emblematic historical buildings of this city, but exposed for decades to successive problems, the Chapter of the Cathedral and the Diocese of Cádiz and Ceuta are making a great effort through different actions to improve its state of preservation, always with the necessary administrative authorizations. This situation has recently led to establish an interdisciplinary collaboration between various entities and professionals (architects, workers, restorers, and heritage researchers, etc.) to carry out several activities and, among the proposals, one of them has reconsidered the non-destructive sampling of the different varieties of natural stone and mortars for petrological and chemical study which will allow the identification and interpretation of pathologies. Additionally, data on thermo-hygrometric values will be collected to control the microclimatic conditions of the building. With all this information, the aim is to establish a robust base of updated knowledge to support the correct development and application of the next conservation and maintenance projects that may be proposed in the near future.

La caliza de Sierra Elvira en la arquitectura de Granada (siglos XVI-XIX): significado histórico y potencial geoturístico

Sierra Elvira limestone in Granada's architecture (16th-19th centuries): historical significance and geotouristic potential

M. Naranjo-Marrero[1], R. Navarro-Domínguez[2] y G. García-Contreras Ruiz[1]

1 Dpto. de Historia Medieval y Ciencias y Técnicas Historiográficas, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Granada. C/ del Prof. Clavera, s/n 18071 Granada. mnarmar05@gmail.com; garciacontreras@ugr.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Rey Abu Said, 4, 18006 Granada. r.navarro@igme.es

Resumen: La caliza de crinoides de Sierra Elvira (Atarfe, Granada) del Lías inferior (Subbético Medio), conocida comercialmente como Bronceado Gris Sierra Elvira, es uno de los materiales de construcción más prominentes de la ciudad de Granada (sur de España), siendo especialmente empleada con fines decorativos entre los siglos XVI al XIX. En este trabajo se recopila y analiza información detallada sobre sus canteras históricas y su utilización en diferentes elementos civiles y religiosos por toda la ciudad. La mayor parte de ellos están considerados como Bien de Interés Cultural (BIC). Asimismo, se analizan los factores históricos y sociales que influyeron en su utilización en este periodo concreto. El objetivo es dar a conocer su valor dentro del patrimonio granadino y evidenciar su relevancia en la arquitectura religiosa y civil de la ciudad y proponer la creación de rutas geoturísticas que integren la información histórica y la relacionada con el turismo de naturaleza, debido al gran auge turístico que vive la ciudad en la actualidad.

Palabras clave: Caliza, Sierra Elvira, Bronceado Gris, patrimonio, geoturismo.

Abstract: *The limestone with crinoids from Sierra Elvira (Atarfe, Granada) of the Lower Lias (Middle Subbetic), commercially known as Bronceado Gris Sierra Elvira, is one of the most prominent building materials in the city of Granada (southern Spain), especially employed for decorative purposes during the 16th to 19th centuries. This work compiles and analyses detailed information about its historical quarries and its use in various civic and religious elements throughout the city. Most of them are catalogued as Asset of Cultural Interest (BIC, in Spanish). In addition, the historical and social factors that influenced its utilization in this specific period in analysed. The objective is to highlight its value within Granada's heritage and underscore its relevance in the religious and civil architecture of the city, proposing the creation of geotouristic routes that integrate historical information with nature tourism due to the great tourist boom that the city is currently experiencing.*

Key words: *Limestone, Sierra Elvira, Bronceado Gris, heritage, geoturism.*

INTRODUCCIÓN

Granada destaca como una ciudad con un significativo enfoque cultural y social, evidenciado por su amplia oferta turística que incluye construcciones emblemáticas reconocidas a nivel mundial, la Alhambra y los Palacios Nazaríes y el barrio del Albaycin (declarados como Sitios Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1985 y en 1994, respectivamente). La ciudad alberga, además, un patrimonio arquitectónico de gran interés que data en su mayoría del s. XVI en adelante, y en el que se han empleado tradicionalmente cuatro rocas de construcción: la caliza de Sierra Elvira, el travertino de Alfacar, la calcarenita de Santa Pudia y el mármol blanco de Macael. De entre ellas, la caliza de Sierra Elvira es la más destacada a nivel de la configuración estética de la ciudad (Valverde Espinosa et al., 2016).

La utilización de la caliza de Sierra Elvira como material de construcción se remonta al menos al s. I d.C., evidenciado por la presencia de diversos elementos como basas, cipos, columnas, losas funerarias y fragmentos de solería, algunos de los cuales se encuentran expuestos en el Museo Arqueológico Provincial de Granada. También fue muy destacado su empleo en la construcción del principal asentamiento árabe en la Vega de Granada, la ciudad de Medina Elvira (*Madinat Ilbira*) entre los siglos VIII y XI (González Escudero, 2010; Malpica Cuello, 2012), en los que se emplea en múltiples elementos, aunque principalmente como muros de mampostería sobre los que se levantaba el tapial (González Escudero, 2010).

En el presente trabajo se propone examinar la relevancia de la caliza de Sierra Elvira en el diseño de construcciones históricas, considerándola un elemento a valorar desde una perspectiva patrimonial y turística. Específicamente, se aborda el papel de esta caliza como

material de construcción durante los siglos XVI al XIX, periodo en el que juega un papel fundamental en la configuración estética de la ciudad, con continuidad hasta nuestros días. Para ello se destacan una serie de construcciones, como iglesias, conventos, colegios, casas palaciegas o fuentes y pilares que se encuentran distribuidos por toda la ciudad y en los que la caliza de Sierra Elvira tiene un uso prominente. Esto podría ser la base para el diseño de una propuesta de itinerarios geoturísticos urbanos en Granada, destacando el notable uso de este tipo de piedra y su influencia en la transformación estética, social y estructural de la ciudad, conectando así la ciudad actual con su entorno natural, fuente de aprovisionamiento de recursos geológicos, y con su pasado. Esta propuesta podría integrarse en los diversos tipos de lugares de interés geológicos aptos para actividades geoturísticas, siendo las piedras de construcción el elemento central de enfoque, buscando transferir el conocimiento geológico y los usos históricos de rocas y minerales a un público más genérico, además del científico o profesional. En consecuencia, resulta esencial promover activamente la divulgación y conservación de este patrimonio pétreo, con el objetivo de darlo a conocer y preservarlo, en beneficio de las generaciones futuras.

LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

La caliza de Sierra Elvira se explota en las canteras situadas en Sierra Elvira, en Atarfe (Granada, Sur de España) (Fig. 1).

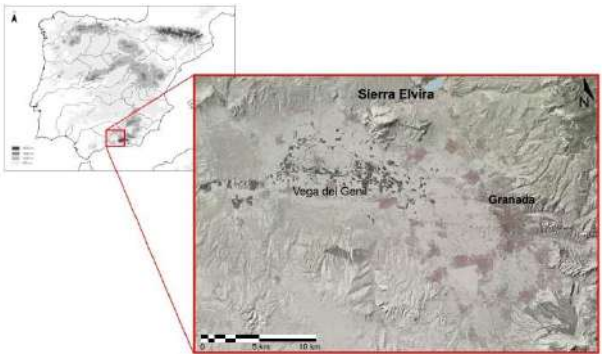


FIGURA 1. *Localización de la ciudad de Granada y Sierra Elvira (Modelo Digital del Terreno base tomado de Iberprix).*

Geológicamente, pertenece al Subbético Medio (Zonas Externas, Cordilleras Béticas), y se configura como un *horst* tectónicamente elevado respecto al relleno mioceno y cuaternario de la Vega de Granada. Los materiales de mayor interés extractivo son las calizas del Lías Inferior (Carixiense), que están compuestas por calcarenitas con abundantes bioclastos de crinoides y peloides, generalmente en forma de *packstone* o *grainstone*, interpretados como depósitos de alta energía de una plataforma externa (Reolid et al., 2018). La potencia es de entre 5 y 20 metros. Puntualmente también se extraen las calizas micríticas infrayacentes.

CANTERAS Y MATERIALES

La cantería en Sierra Elvira se ha desarrollado a lo largo de diversos siglos, evidenciando su explotación desde la época antigua hasta el s. XI (Fig. 2). A partir de aquí y hasta finales del s. XV, se registra un periodo en el que no hay constancia de su empleo, sugiriendo la posible interrupción de esta actividad. No será finalmente hasta principios del s. XVI cuando estas canteras vuelvan a estar en funcionamiento hasta la actualidad. Aunque son necesarios estudios más detallados, parece que las canteras iniciales empleadas en la configuración de Medina Elvira estaban en la falda del "Cerro del Sombrerete" (Malpica Cuello et al., 2005), mientras que las que se han explotado en tiempos más recientes, especialmente desde mitad del s. XX, están algo más al este, en la zona de la "Ermita de los Tres Juanes", en el "Cerro del Tajo" o en "Los Pajaricos". La instalación de la fábrica de cementos "Centauro" en la zona, en el año 1903 hace que se abran por toda la zona numerosas canteras, lo que, sin duda, provocó numerosos daños, tanto en el yacimiento como en las canteras históricas (Rebkowski et al., 2021).

Mineralógicamente está formada por calcita, con pequeños cristales de dolomita, junto con cuarzo, glauconita u óxidos de hierro rellenando estilolitos (Sebastián-Pardo et al., 2008). Se comercializa con las denominaciones de Bronceado Sierra Elvira, con las variedades de "Claro" y "Oscuro" y más recientemente como "MX", "Gris Venecia" o "Cinneo Ocean".



FIGURA 2. *Vista de un frente de las canteras antiguas (posiblemente pre s. XX) de Sierra Elvira en el paraje de "Cerro del Sombrerete", cercana al yacimiento de Medina Elvira.*

En la Tabla I se muestran algunas de las principales propiedades físicas y mecánicas que determinan su uso como piedra ornamental:

Parámetro	Valor medio
Porosidad accesible al agua (%)	0,20[1]
Densidad real (g/cm^3)	2,71[1]
Densidad aparente (g/cm^3)	2,71[1]
Absorción de agua a presión atmosférica (%)	0,09[1] – 0,60[2]
Coeficiente de saturación (%)	0,26[1]
Resistencia a la compresión simple (MPa)	135,30[1] – 85,68[2]
Resistencia a la flexión (MPa)	16,10[2]

TABLA I. *Parámetros tecnológicos de la caliza de Sierra Elvira. Fuente: (1) Sebastián-Pardo et al. (2008); (2) Stone contact (2024).*

USOS ARQUITECTONICOS EN LA CIUDAD DE GRANADA

La presencia de la caliza de Sierra Elvira se extiende por prácticamente toda la ciudad de Granada. Sus usos son muy variados debido a que sus propiedades mineralógicas y mecánicas facilitan su modelado mediante cincelado. Los más destacados son los elementos ornamentales en portadas y fachadas, jambas, dinteles, balcones, columnas, pedestales, balaustradas, solerías, fuentes y pilares, zócalos, e incluso en forma de adoquines y bordillos en calles. Estos materiales, especialmente en solerías, se combinan con el mármol blanco de Macael para construir un mosaico arlequinado, presente en la mayor parte de los edificios religiosos granadinos.

Algunos de los principales edificios construidos o reformados entre los s. XVI y XIX en los que se emplea la caliza de Sierra Elvira de forma destacada son:

- **Iglesias y monasterios:** monasterio-iglesia de San Jerónimo (1496), Capilla Real (1505), Catedral de Granada (1523), iglesia de Sta. Ana (1540), parroquia de S. Pedro y S. Pablo (1559), parroquia de Ntro. Salvador (1565), parroquia de S. Justo y Pastor (1574), Ntra. Sra. de las Angustias (1664), parroquia de Sta. María Magdalena (1677), Basílica S. Juan de Dios (1737).
- **Arquitectura asistencial:** hospital Real (1551), hospital de San Juan de Dios (1552), hospital de Santa Cruz (1565).
- **Conventos:** de la Concepción (1513), de S. Antón (1534), de Ntra. Sra. del Carmen (actual Ayuntamiento) (1572), Comendadoras de Santiago (1501/reformado 1772).
- **Colegios:** Sta. Cruz de la Fe (actual Curia Eclesiástica) (1527), Centro Colegio de los Jesuitas (actual Fac. de Derecho) (1597).
- **Palacios:** Real Chancillería (1531), Córdovas (1532), casa de Castril (1539), casa de los Tiros (1540), Beneroso (1553), Caicedo (s. XVI), Ansoti (s. XVII), Castillo-Palacio de Bibataubín (1752), de la Madraza y calle Oficios (1349/reformado 1729).
- **Esculturas:** Cristo de los Favores (1640), Virgen Inmaculada del Triunfo (1803), monumento a Mariana Pineda (1873).
- **Fuentes:** de los Cuatro Leones (s. XVII), de los Gigantones (s. XVII), plaza de la Trinidad (s. XVII), del Triunfo (1879), Plaza Nueva (s. XIX), paseo de los Tristes (1609), de las Batallas (s. XIX).
- **Pilares:** Campo del Príncipe (1518), Carlos V (1545), pilar del Toro (1550), de Santa Inés (s. XVI).

Desde el abandono definitivo del asentamiento de Medina Elvira, no solo como ciudad en el s. XI, sino incluso como alquería durante la Baja Edad Media, el uso de la caliza de Sierra Elvira en la ciudad de Granada no se extendió ni generalizó, principalmente por la disponibilidad de otros materiales de construcción más económicos y accesibles, hasta su auge a partir del s. XVI. La expulsión de los moriscos tuvo un impacto significativo en la arquitectura y provocó una crisis económica y social (López Guzmán, 1987). Tras esta expulsión, se inició un proceso de reconstrucción que se prolongó hasta la segunda mitad del s. XVII, empleándose la piedra de Sierra Elvira como principal elemento decorativo.

En la Figura 3 a-e, se muestran algunos ejemplos.

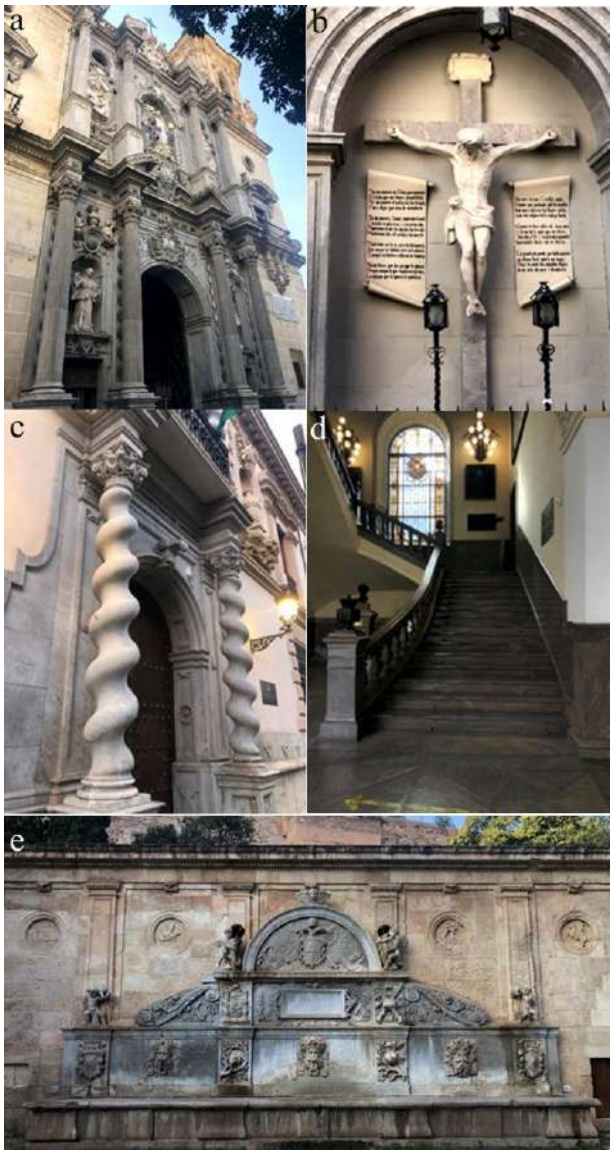


FIGURA 3. *Caliza de Sierra Elvira en los s. XVI-XIX: a) portada Basílica San Juan de Dios; b) cruz en la Iglesia de Ntra. Sra. de las Angustias; c) portada del Palacio de Bibataubin; d) escaleras del Convento de Ntra. Sra. del Carmen; e) pilar de Carlos V.*

En el s. XVI, la arquitectura estuvo fuertemente influenciada por factores socio-religiosos, con un importante patrocinio por parte de la jerarquía eclesiástica y la participación destacada de las órdenes religiosas y organismos católicos, que fueron los principales promotores de la arquitectura, especialmente en la primera mitad del siglo. La influencia de esta piedra en la configuración urbana y arquitectónica de Granada se volvió más evidente a medida que se expandía su uso en estructuras emblemáticas y en distintas partes de la ciudad. Esta preferencia puede atribuirse al hecho de que la caliza de Sierra Elvira, con la llegada de una nueva

sociedad, sea considerada como una piedra de carácter noble junto con mármoles y otros tipos de rocas. Por lo tanto, su marcado uso en las zonas relevantes y centrales busca destacar ciertas clases sociales, asociando la caliza de Sierra Elvira con símbolos de poder y ostentación. Es por esto por lo que se utiliza en lugares tan visibles y monumentales como las fachadas (Valverde Espinosa et al., 2016), especialmente en la zona centro. Esto contrasta con su uso en barrios periféricos como el Albaicín, donde la presencia de caliza de Sierra Elvira se restringe a las adaptaciones internas y externas de antiguas mezquitas conforme a la liturgia cristiana, como en el caso de la Iglesia del Salvador (Martínez Jimenez, 2022). En general, su uso en la ciudad se destacó debido a su disponibilidad y su aspecto acorde con el período de reconstrucción, caracterizado por la oscuridad y la tragedia asociadas a esa época (Arance García y Medina López, 1998), continuando esta línea hasta el s. XX.

CONCLUSIONES

En este trabajo se pone de manifiesto la importancia de la caliza de crinoides de Sierra Elvira en la configuración estética e histórica de la ciudad, especialmente entre los s. XVI-XIX, con la instauración de numerosas órdenes religiosas católicas en la ciudad. Su uso perdura hasta la actualidad, siendo un material muy empleado en las sucesivas reformas urbanísticas y estilísticas realizadas en la ciudad.

La mayor parte de los edificios construidos en este periodo están catalogados como Bienes de Interés Cultural (BIC), estando, además, ubicados cerca de los principales atractivos turísticos de la ciudad. Dado su innegable valor histórico-patrimonial, sería de gran interés el diseño de rutas geoturísticas por los diferentes distritos que aúnen detallada información histórica sobre las características del edificio. Estos datos podrían contemplar aspectos como fases constructivas, arquitecto, maestro de obras, periodo o estilo, detalles relacionados con el uso de la piedra y los diferentes elementos y ornamentos realizados en cada material, con especial hincapié en la caliza de Sierra Elvira, al ser la que presenta usos más variados. De esta forma, se complementaría la información histórica con la relacionada con la naturaleza, lo que contribuye a generar nuevos conocimientos y perspectivas para la interpretación del patrimonio natural y cultural, promoviendo así la aceptación de medidas de conservación y la accesibilidad a la información.

El plan de difusión implicaría desarrollar una aplicación móvil gratuita que aúne toda la información para promover el conocimiento previamente presentado, que debe estar adaptada a un público no experto y con un rango de edades variada.

De esta manera, la caliza de Sierra Elvira, como elemento central de un discurso histórico de interés, se convierte en el centro de un itinerario accesible, dinámico y educativo para el patrimonio de Granada, poniendo de manifiesto la importancia significativa que esta piedra posee en la historia y la identidad de esta ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de la Cátedra Gómez Moreno para la investigación en Medina Elvira y la puesta en valor del yacimiento de la Universidad de Granada, que financian Ibox Energy, Magnon y Verbund.

REFERENCIAS

Arance García, J. y Medina López, L.J. (1998): *Piedra de Sierra Elvira como material de construcción tradicional en Granada*. EUAT. Universidad de Granada, Granada. 495 p.

González Escudero, A. (2010): Las técnicas constructivas en la primera época de Al-Andalus, el caso de Madinat Ilbira. En: *Historia de Andalucía: VII Coloquio "¿Qué es Andalucía? Una revisión histórica desde el Medievalismo"*. (A. Malpica, A. Fábregas y R. Peinado, eds.). Universidad de Granada, Granada 29-48.

López Guzmán, R. (1987): *Tradición y clasicismo en la Granada del XVI. Arquitectura civil y urbanismo*. Diputación Provincial, Granada. 794 p.

Malpica Cuello, A. (2012): Madinat Ilbira y los orígenes de la ciudad en al-Andalus. *Debates de Arqueología Medieval*, 2: 383-406.

Malpica Cuello, A., García Porras, A., María Martín Civantos, J.M. y Álvarez García, J. (2005): *Informe de la Primera Campaña de Excavación Arqueológica de la ciudad de Madinat Ilbira (Atarfe, Granada)*. Junta de Andalucía, Granada, 132 p.

Martínez Jiménez, N. (2022): De mezquita a colegiata: las primeras reformas de la iglesia del Salvador de Granada. *Cuadernos de Arte de la Universidad de Granada*, 53: 23-39.

Rebkowski, M., Martínez Álvarez, C. y García-Contreras Ruiz, G. (2021): Archaeological research on Madīnat Ilbīra-an Umayyad town in al-Andalus. Course and problems. *Quaestiones Medii Aevii Novae*, 26: 147-171.

Reolid, M., Molina, J.M., Miguel, L. y Rodríguez-Tovar, F.J. (2018): *The Toarcian Oceanic Anoxic Event in the South Iberian Palaeomargin*. Springer Nature, Cham, Switzerland, 127 p.

Sebastián-Pardo, E.M., Cultrone, G., Garibaldi, V., Rodríguez-Navarro, C., De la Torre, M.J., y Valverde, I. (2008): La caliza de Sierra Elvira: comportamiento petrofísico de una piedra significativa del Patrimonio Arquitectónico Andaluz. *Materiales de Construcción*, 58: 51-63.

Stone Contact (2024): Stone, Marble, Granite - Global Stone Trade. https://www.stonecontact.com/bronceado-sierra-elvira-limestone/s182

Valverde Espinosa, I., Valverde Palacios, I. y Fuentes García, R., (2016): La influencia de la piedra de Sierra Elvira en la configuración urbana del casco histórico de Granada. En: *La cultura y la ciudad* (J. Calatrava, F., García Pérez y D. Arredondo Garrido eds.). Universidad de Granada, Granada, 625-632.

Análisis preliminar de los litotipos y la calidad del yeso sacaroideo/alabastrino como roca ornamental en Los Gallardos (Almería).

Preliminary analysis of lithotypes and quality of saccharoid/alabastrine gypsum as dimension stone in Los Gallardos (Almería).

R. Navarro Domínguez[1] y J. Gisbert Aguilar[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ Rey Abu Said, 4, 18006 Granada. r.navarro@igme.es
2 Dpto. de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12 50009 Zaragoza. gisbert@unizar.es

Resumen: Se exponen los resultados preliminares de la caracterización de muestras de alabastro procedentes de Los Gallardos (Almería), tomadas a partir de testigos de sondeos para su uso como roca ornamental. Desde el punto de vista petrográfico, se trata de niveles de anhidritas y yesos sacaroideos y nodulosos con tamaño de grano de 100 a 250 μm, y niveles de magnesita y esquistos. Junto con el yeso y la anhidrita, aparecen magnesita, dolomita, cuarzo, feldespato, mica del tipo flogopita y sulfuros como la pirita. Tienen un color que varía entre los tonos azulados de la anhidrita y los grises azulados-amarillentos del yeso, y una translucidez media-alta, similar a la de los alabastros de Aragón, y una resistencia a la flexión algo inferior a estos. Estos resultados preliminares parecen favorables para su uso como roca ornamental. No obstante, sería recomendable continuar con las investigaciones en la zona para incrementar el muestreo de cara a determinar su potencialidad como roca ornamental de forma más precisa, antes de su puesta en explotación.

Palabras clave: Alabastro, yeso, roca ornamental, Almería, translucidez.

Abstract: *The preliminary results of the characterization of alabaster samples from Los Gallardos (Almería), taken from borehole cores for their application as dimension stone, are presented. Petrographically, levels of anhydrites and saccharoid and nodular gypsum with grain sizes 100 to 250 μm are encompassed, along with levels of magnesite and schists. Accompanying gypsum and anhydrite, other minerals such as magnesite, dolomite, quartz, feldspar, phlogopite-type mica, and sulfides like pyrite are encountered. A colour variation is exhibited, ranging from the bluish tones of anhydrite to the bluish-grey to yellowish-grey hues of gypsum, featuring a medium to high translucency akin to that of alabaster from Aragon, with a flexural strength somewhat inferior to the latter. These preliminary results seem favourable for its use as an ornamental rock. Nevertheless, it is recommended that further work be conducted in the region to increase sampling, aiming to determine the potential for the exploitation of this resource as dimension stone with more accuracy, before its exploitation.*

Key words: *Alabaster, gypsum, dimension stone, Almería, translucency.*

INTRODUCCIÓN

El alabastro es un yeso natural microcristalino, con un tamaño de cristal inferior a 60 μm, un grado variable de translucidez (Mandado Collado, 1987), y color blanco, aunque puede variar con tonos rosas, amarillos o grises. Ha sido muy frecuentemente empleado con fines ornamentales a lo largo de la historia, debido principalmente a su translucidez y a la facilidad para su tallado, derivado de su baja dureza (2 en la escala de Mohs).

La definición del término alabastro sigue teniendo lagunas importantes, pues los alabastros más típicos y de mayor calidad ornamental, como los aragoneses, poseen interpenetraciones de microcristales (cristales inferiores a 60 μm) con macrocristales sacaroides (de hasta 800-1000 μm), y con extinción no uniforme (CENU) de origen no tectónico. Los yesos sacaroideos clásicos serían pues aquellos de tamaños superiores a 60 μm y extinción normal. El problema sigue abierto, pues estos últimos podrían sufrir deformación y extinción ondulante por esfuerzos tectónicos.

En España, tanto en la antigüedad, como actualmente, las principales canteras donde se ha extraído alabastro se localizan en las provincias de Teruel y Zaragoza (Aragón), aunque hubo otras explotaciones en Gerona y Tarragona (Ortí Iglesias, 2005) y Valencia (Martí, 2018) entre otros lugares. Los principales yacimientos están ligados a materiales evaporíticos del Mioceno principalmente, aunque también del Eoceno y Oligoceno. En la actualidad, Aragón es la única comunidad en España con producción de alabastro.

En la provincia de Almería se ha explotado tradicionalmente el yeso como material de construcción. No obstante, este material se ha destinado tradicionalmente a morteros y productos derivados en la industria de la construcción.

En el presente trabajo se describen, a partir del análisis de muestras de tres sondeos, las características de un yacimiento de yeso/anhidrita, localizado en Almería, que podría ser empleado como fuente de alabastro con fines ornamentales, lo que puede suponer un valor añadido a los yacimientos yesíferos de la zona.

LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio se localiza en la provincia de Almería, en el término municipal de Los Gallardos, en el paraje conocido como Pago de Ángela Antonia.

Geológicamente, la zona se encuentra en las Cordilleras Béticas, en el contacto entre el Complejo Nevado Filábride (CNF), de las Zonas Internas, y el relleno de las cuencas neógenas postorogénicas (CNP), concretamente en la cuenca de Vera (Fig. 1).

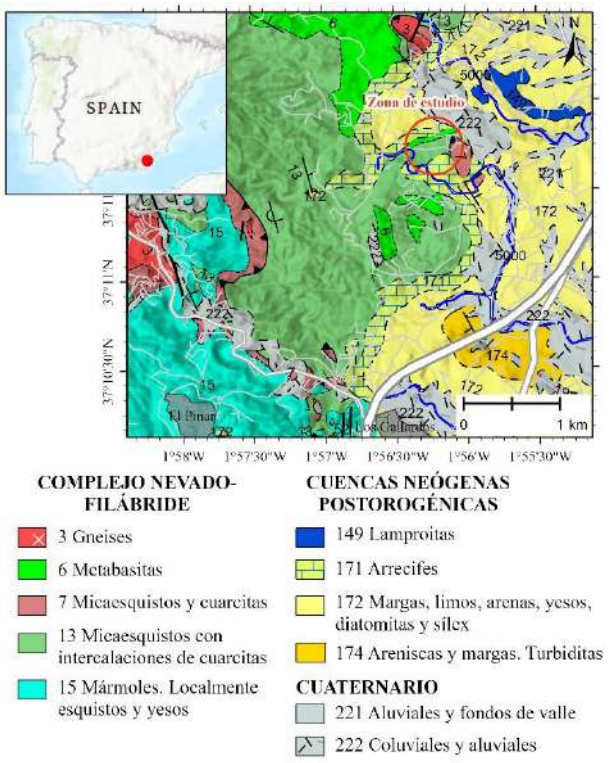


FIGURA 1. *Mapa de localización y geológico de la zona de estudio (IGME, 2024).*

Los materiales aflorantes están compuestos por micaesquistos (7) (entre paréntesis se indica el número de identificación de la leyenda de la Fig. 1), con granates ricos en materia orgánica, con intercalaciones de cuarcitas, mármoles calcíticos y/o dolomíticos muy deformados, gneises (3) y anfibolitas (6) y esquistos anfibólicos, de la formación Nevada; cuarciesquistos claros (13) de la Formación Las Casas, y mármoles con intercalaciones de esquisto y yesos de la formación Huertecicas (15) del CNF (Paleozoico). En las CNP, y de forma interdigitada en la zona de contacto, aparecen un conjunto de margas y areniscas de carácter turbidítico (172), con lamproitas interestratificadas (140). Sobre este conjunto, se superpone una serie de margas limosas blancuzcas entre las que se intercalan potentes bancos de conglomerados (174). A techo aparece de forma discordante, un tramo de formado por yeso, travertinos, y areniscas, con olistolitos de tamaño muy variable, desde centimétrico hasta grandes bloques más de más de 50 m^3. Según Barragán (1987) y referencias incluidas, regionalmente, estos materiales son correlacionables con los del "Olistostroma de Garrucha", referido como Plioceno Inferior.

Son necesarios nuevos estudios más detallados para tratar de establecer la edad de esta serie con seguridad, pero la intercalación de dolomías, magnesitas amarillas y un metamorfismo de tipo regional apunta más hacia yesos triásicos (formación Huertecicas).

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se han estudiado un total de 12 muestras de diferentes litologías y espesores, tomadas a diferentes profundidades (entre 52 y 89 metros) a partir de los testigos de tres de los sondeos realizados en la zona (sondeos 1, 15 y 16). Las características mineralógicas y petrográficas se han estudiado mediante microscopía óptica de luz polarizada (MOP) sobre un total de 20 láminas delgadas y mediante Difracción de Rayos X (DRX) (4 muestras) con un difractómetro Philips PW 1729. La estimación de las proporciones minerales se ha realizado en base a la densidad aparente de las probetas. Para ello, se ha medido con precisión la densidad de las probetas mediante un micrómetro, procediendo después a su pesaje. La densidad aparente de la roca cumple la ecuación:

$$D_{aproca} = \sum D_{abs}Min_i \times \%Min_i + D_{abs}P \times \%P \qquad [1]$$

Siendo D_{aproca}, la densidad aparente de la roca total, $D_{abs}Min_i$, la densidad absoluta del mineral i, $\%Min_i$ el porcentaje del mineral i, y $D_{abs}P$ es la densidad de los poros, que es 0, y %P es la porosidad. Además, debe cumplirse que:

$$\sum \%Min_i + \%P = 100 \qquad [2]$$

En el presente caso, la composición mineralógica se reduce a cuatro minerales: yeso (D_{abs}=2,32 g/cm^3), anhidrita (D_{abs}=2,97 g/cm^3), dolomita (D_{abs}=2,85 g/cm^3), magnesita (D_{abs}=3,00 g/cm^3). Para simplificar los cálculos se ha considerado una densidad media para la anhidrita, la dolomita y la magnesita de 2,94 g/cm^3 (ganga), y una porosidad media del 0,2%, de tal forma que en la ecuación [2], tan solo quedan dos términos, el % de yeso y el % de ganga.

Las características cromáticas se han medido en muestras sin pulir (24 muestras) y pulidas (16 muestras) con un espectrofotómetro XRite (coordenadas L a*b*, C, Hº y color Munsell). La translucidez se ha medido con un luxómetro LX1010BS (9 muestras) con una fuente de 16.000 lux.

La resistencia a la flexión bajo carga concentrada (UNE-EN 12372, 2007) se ha determinado en 8 probetas, de dimensiones medias 15 x 46 x 100 mm y con un

número máximo de 7 probetas en yeso y una en anhidrita, con lo que los resultados hay que tomarlos con precaución. Para poder establecer comparativas, también se ha realizado este ensayo en 8 probetas de alabastro aragonés, procedente de Gelsa (Zaragoza) realizando las probetas con idénticas dimensiones.

RESULTADOS

Desde el punto de vista mineralógico y textural, mediante MOP y DRX, los principales litotipos observados son:

- Anhidritas: Masivas y brechoides, con, contenido en yeso variable (10%-25% en peso), siendo mayor en las anhidritas brechoides. Estas son propensas a presentar clastos de dolomía dispersos. Contienen entre un 2 y un 15 % de cristales de dolomita, dispersos o en láminas, junto a la anhidrita. El contenido en opacos, está formado por pirita en la mayoría de los casos, siendo muy escaso. La textura, suele ser de dos tipos: granuda en mosaico o en haces decusados/fibrosos. Cristales de 400 a 1200 µm.
- Yesos: Son muy translucidos, sacaroideos, de grano fino (100-250 µm), pero pueden llegar a 1500 µm. Aparecen en dos tonalidades (gris y verde amarillento). Accesoriamente en la masa de yeso hay cristales de dolomita o micas de tipo flogopita, cuarzo, feldespato y opacos (pirita). La textura es alotópica o subidiotópica en los tramos de yeso masivo.
- Otros: Intercalados en los sondeos aparece tramos de magnesitas, de color amarillento; dolomías grises a negras, en mosaicos inequigranulares alotópicos; cuarcitas, compuestas por areniscas de grano fino metamorfizadas, con laminaciones de limo—arena fina y media (composición cuarzo—albítica) y láminas micáceas de moscovita-flogopita; esquistos miloníticos de tonos claros (marrón amarillento-grisáceo) a oscuros (verde oscuro), en función de que dominen los términos arenosos -más cuarcíferos- o lutítico–flogopíticos, respectivamente; rocas híbridas, posiblemente cenizas volcánicas ligeramente metamorfizadas.

En lo que respecta al color (Tabla I), se observa que las anhidritas tienen tonos cercanos al azul-púrpura, que, con mucho son los más espectaculares y llamativos, ya que el azul es el color menos frecuente en rocas ornamentales y por ello el más cotizado, siendo, además, moderadamente traslúcidas (Tabla I). En los yesos, se diferencia un tipo masivo (A) y otro más noduloso (B), siendo siempre gris claro con dos variantes, la primera más azulada y la segunda verdoso—amarillenta. En todos los casos las variedades pulidas tienen un tono/saturación de color mayor que sus equivalentes sin pulimento.

La traslucidez en las dos variedades de yeso es de un 6% de disminución en la intensidad luminosa por mm de material atravesado, que resulta ser del mismo orden que la de los alabastros aragoneses.

Muestra	L*	a*	b*	C	h	Chroma
Anhidritas sin pulir	61,2	0,0	-2,3	2,5	262,6	9PB
Yesos sin pulir (A)	58,2	-0,7	-0,4	0,8	203,7	8,7BG
Yesos sin pulir (B)	70,1	-0,7	2,7	2,7	104,2	1,2GY
Anhidritas pulidas	55,7	0,5	-3,7	3,7	276,9	7,5PB
Yesos pulidos (A)	52,4	-0,9	-2,0	2,2	242,6	10B
Yesos pulidos (B)	74,1	-0,4	1,6	1,7	110,6	3,5Y

TABLA I. *Resultados promedio de la medida del color. Los yesos poseen dos tonos distintos; los A son grises y los B verde amarillentos.*

En la Figura 2 se muestra el aspecto macroscópico de algunas de las muestras estudiadas.

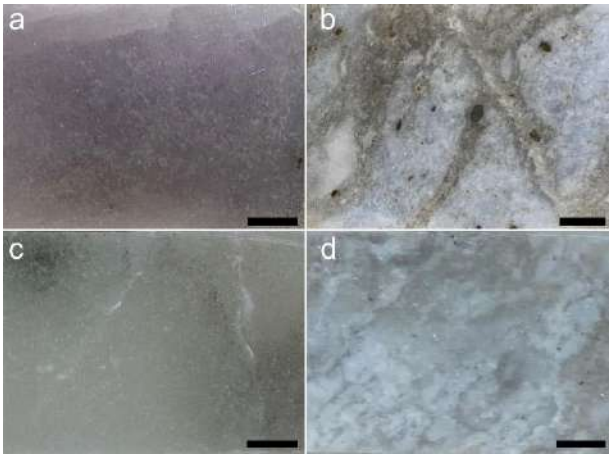


FIGURA 2. *Aspecto macroscópico y color de las muestras estudiadas: a) anhidrita azul/gris masiva; b) anhidrita gris brechoide con cristales de dolomita; c) yeso sacaroideo verde—amarillento; d) dolomías anhidrítico/yesíferas. Barra de escala: 1 cm.*

Con respecto a la resistencia a la flexión (RF), los valores medios obtenidos se muestran en la Tabla II:

Muestra	Dimensiones probeta (mm)	RF (MPa)
Los Gallardos (Almería)	15 x 46 x 100	13,4 ± 6,1
Gelsa (Aragón)	15 x 46 x 100	20,2 ± 2,3
Gelsa (Aragón) (1)	50 x 100 x 300	7,9 ± 1,3

TABLA II. *Valores de resistencia a la flexión bajo carga concentrada y desviación estándar en probetas de Los Gallardos (Almería) y de alabastros de Gelsa (Zaragoza). Se muestran también valores de alabastros ensayados conforme a la norma UNE EN 12372 (2007) (1), procedentes de estudios previos (Gisbert, 2015).*

DISCUSIÓN

En general, el tamaño de grano de los yesos de interés es algo superior a lo establecido para el alabastro, que se considera inferior a las 60 µm (Mandado Collado, 1987). Otro problema de estos materiales se da durante el pulido. Los yesos, en general, se pulen con mucha facilidad dada su escasa dureza (2 en la escala de Mohs) y, en este caso, una elevada coherencia. Sin embargo, la presencia de cristales aislados y dispersos en la matriz de minerales de mayor dureza como dolomita (3,8 en la escala de Mohs) y anhidrita (3,5 en la escala de Mohs), da problemas debido a que, durante este proceso, los cristales más duros se desprenden y rayan la superficie ya pulimentada. También hay que tener en cuenta la presencia de sulfuros como la pirita, pues al oxidarse genera manchas y, si

están en cantidad apreciable, suele inhabilitar a la roca para el uso ornamental. Afortunadamente, la pirita se concentra en los tramos más esquistosos y dolomíticos y está ausente en el yeso y la anhidrita.

A pesar de esta mayor granulometría, la traslucidez de los yesos es semejante si se comparan con yesos aragoneses procedentes de Gelsa, en Zaragoza (Gisbert, 2015). Los alabastros aragoneses aquí empleados poseen una traslucidez media-alta, dentro de lo que son las calidades locales aragonés.

En lo referente a la RF, se observa que los yesos estudiados tienen una resistencia un 34% inferior a los alabastros aragoneses, aunque en algún caso (e.g., probeta 16.3) hay valores del mismo orden que los aragoneses. La anhidrita (una probeta) da valores superiores (10 MPa) a todas las muestras ensayadas. Con respecto a los ensayos normalizados según UNE-EN, los alabastros aragoneses presentan valores de 6,3 a 8,0 MPa. Si se extrapolan de forma lineal los valores a las probetas de Almería esta variación es de 3,1 a 6,1 MPa.

En el caso del alabastro, las propiedades geomecánicas, incluyendo la resistencia a la flexión, son mejores conforme disminuye el tamaño de grano (Yilmaz, 2007), hecho que se confirma en el presente caso, como se muestra en la Figura 3.

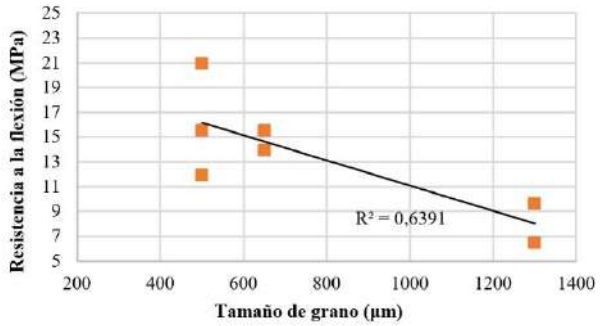


FIGURA 3. *Relación entre la granulometría media de las muestras de Almería y la resistencia a la flexión. Se incluye la recta de regresión y su grado de ajuste.*

CONCLUSIONES

Tras este estudio preliminar de los niveles de yeso/anhidrita extraídos en varios sondeos en la zona de Los Gallardos (Almería) para evaluar el posible uso como alabastro ornamental, se puede concluir que, *a priori*, tienen potencial como roca ornamental.

Si bien la granulometría es algo superior al alabastro *s.s.*, los valores de color, con tonos azulado, especialmente en los niveles de anhidrita, las puede hacer atractivas para su comercialización debido a la escasez de estos tonos en la industria. Los valores de translucidez, se asemejan también a otros alabastros comercializados en España, mientras que los valores de resistencia a la flexión son algo inferiores.

No obstante, es importante tener en cuenta la presencia de minerales de diferente dureza que pueden afectar al pulido y otros, como la pirita que pueden inducir manchas por oxidación en la roca pulida.

Ante estos resultados, y dado que los niveles de interés se ubican a más de 50 metros de profundidad, sería recomendable ampliar este estudio analizando un mayor número de muestras para incrementar la representatividad. Además, es deseable ajustarse, en el caso del ensayo de resistencia a la flexión, a las dimensiones de las probetas establecidas en la norma UNE, y realizar ensayos adicionales para determinar la idoneidad de estos materiales como roca ornamental. Esto permitirá valorar de forma más adecuada las inversiones a realizar para su beneficio.

Mediante esta investigación, se pone de manifiesto la importancia del desarrollo de nuevos usos hasta ahora no contemplados para la industria del yeso en Almería, lo que puede permitir incrementar el valor y la sostenibilidad de las explotaciones en la zona, ya que el alabastro es un material muy valorado y requerido en la industria ornamental.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado mediante un convenio OTRI de investigación y desarrollo entre la UNIZAR y Minera de Órgiva, S.L. Las preparaciones microscópicas y las difracciones de RX se realizaron en los Servicios de Apoyo a la Investigación de la UNIZAR y los ensayos de resistencia a la flexión en la empresa Control7, S.A.U.

REFERENCIAS

Barragán, G. (1987): Una nueva interpretación de la sedimentación neógena en el sector suroccidental de la Cuenca de Vera. *Acta Geológica Hispánica*, 21-22: 449-457.

IGME (2024): *GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España (en línea).* IGME, Madrid.

Gisbert, J. (2015): *Caracterización del alabastro de las cortas Lopin y Gelsa*. Contrato OTRI Empresa Exportadora Turolense S.L. Univ. de Zaragoza. 97 p.

Mandado Collado, J.M.A. (1987): *Litofacies yesíferas del Sector Aragonés de la Cuenca Terciaria del Ebro. Petrogénesis y Geoquímica.* Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza. 469 p.

Martí, M. (2018): El alabastro valenciano y un libro de cantera de piedra del siglo XIV. En: *I Congreso Internacional Usos artísticos del alabastro y procedencia del material: actas*, 255-272.

Ortí Iglesias, M. (2005): El alabastro en la Edad Media y la edad moderna. El caso de Sarral (Tarragona). *De Re Metallica*, 5: 45-61.

UNE-EN 12372 (2007): *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 20 p.

Yilmaz, I. (2007): Differences in the geotechnical properties of two types of gypsum: alabastrine and porphyritic. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66: 187-195.

Las calizas de Rodadero de Lobos (Córdoba, España). Análisis de los frentes de cantera y caracterización arqueométrica de las rocas localizadas en el Cortijo Piquín.

The limestones of Rodadero de Lobos (Córdoba, Spain). Analysis of the quarry outcrops and archaeometric characterization of the rocks located in the Cortijo Piquín.

E. Ontiveros Ortega[1], M.L. Loza Azuaga [2], J. Beltrán Fortes [3], J.C. Moreno Escribano [4], A. Monterroso Checa [5], D. Becerra Fernández [6]

1Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico Avda. de los descubrimientos S/N 41092 Seville Spain. esther.ontiveros@juntadeandalucia.es
2.Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico Avda. de los descubrimientos S/N 41092 Seville Spain. marial.loza@juntadeandalucia.es
3. Depto. de Prehistoria y Arqueología. Universidad de Sevilla. María de Padilla S/N 41004. jbeltran@us.es
4.Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Córdoba. Plaza del Cardenal Salazar, 14071 Córdoba, Spain. aa2moesj@uco.es
5.Universidad de Córdoba .Facultad de Filosofía y Letras. Plaza del Cardenal Salazar, 14071 Córdoba, Spain. amonterroso@uco.es
6. Depto. Ciencias Históricas. Universidad de Málaga. Campus de Blvr. Louis, 2. 29071 Málaga, Spain. dbecerra@uma.es

Palabras clave: canteras**,** piedra ornamental, *marmora*, arqueología, petrográfico, geoquímico.

Resumen

Este trabajo aborda el estudio de las canteras del Cortijo del Piquín (Córdoba, España) donde se localiza la denominada caliza de Rodadero de Lobos. El uso de este material pétreo se constata desde principios del siglo I d.C.; en un amplio catálogo de piezas arquitectónicas y epigráficas en Córdoba de época romana, así como en diversas construcciones medievales como en la ciudad de Madinat Al Zahra. Para el estudio arqueométrico de estas calizas del Cámbrico con arqueociatos, se han extraído muestras de los afloramientos geológicos para su posterior análisis mineralógico-petrográfico y geoquímico. Previamente se ha realizado un análisis de los frentes de canteras mediante el sistema LiDAR (Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), que ha permitido la captura de datos de la superficie de este espacio de la sierra cordobesa, conocer el volumen de material extraído y su localización con gran precisión, datos hasta este momento inéditos. Este estudio arqueométrico será de utilidad en el futuro para el avance de la investigación arqueológica relacionada el uso real en construcción que han tenido estos materiales en el pasado.

Abstract

This work shows the study of the Cortijo del Piquín quarries (Córdoba, Spain) where the Rodadero de Lobos limestone is located. The use of this stone has been confirmed since the beginning of the 1st century AD in a wide catalog of architectural and epigraphic pieces in Córdoba from the Roman period, as well as in various medieval constructions such as in the city of Madinat Al Zahra. For the archaeometric study of these Cambrian limestones with archaeocyaths, samples have been extracted from the geological outcrops for subsequent mineralogical-petrographic and geochemical analysis. Previously, an analysis of the outcrops has been carried out using the LiDAR system (Unmanned Aerial Vehicle (UAV), which has allowed the capture of data on the surface of this space in the Cordoba Hill, knowing the volume of material extracted and its location with great precision, data until now unpublished. This archaeometric study will be useful in the future for the advancement of archaeological research related to the real use in construction that these materials have had in the past.

Explotación potencial de las proximidades de la cantera histórica de Sierra Elvira (Granada) para recuperar la fabricación local de conglomerantes hidráulicos naturales

Potential exploitation of the proximities of the historical quarry of Sierra Elvira (Granada) to recover the local manufacturing of natural hydraulic binders

C. Parra Fernández[1], J. Porta Igual[2], S. Morales Ruano[1], G. Cultrone[1] y A. Arizzi[1]

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Campus Fuente Nueva s/n, Universidad de Granada, 18002 Granada. clarapf@ugr.es, smorales@ugr.es, cultrone@ugr.es, arizzina@ugr.es
2 TESELA, Materiales, Innovación y Patrimonio (Spin-Off de la Universidad de Granada). jordiporta@teselainnova.com

Palabras clave: Sierra Elvira, calizas silíceas, estudio petrográfico, fabricación local, cal hidráulica natural.

Resumen

La antigua cementera Nuestra Señora de los Dolores en Atarfe (Granada) produjo conglomerantes hidráulicos (cal y cemento) desde 1890 hasta su cierre en la década de 1970 (Rubio Gandía *et al.,* 2003). En este trabajo se han muestreado afloramientos de Sierra Elvira ya investigados por su carácter hidráulico (Rodríguez Ávila, 1912) para promover una nueva fabricación local de cales hidráulicas naturales (NHL).

Los materiales geológicos fueron estudiados mediante técnicas químico-mineralógicas y petrográficas, determinándose que se correspondían con calizas silíceas y no con calizas arcillosas o margas como se presuponía para la fabricación de estos conglomerantes.

Diez de las 41 muestras geológicas se utilizaron para la fabricación en laboratorio de NHL, cuya mineralogía fue comparada con la de las cales anteriormente producidas en fábrica. Los hallazgos obtenidos abren la posibilidad a nuevas zonas de extracción de materias primas para la producción de conglomerantes hidráulicos y a la revalorización del entorno industrial preexistente.

Abstract

The ancient cement factory Nuestra Señora de los Dolores in Atarfe (Granada) produced hydraulic binders (lime and cement) since 1890 until its closure in 1970s (Rubio Gandía *et al.,* 2003). In this work Sierra Elvira´s outcrops already investigated for their potential hydraulicity (Rodríguez Ávila, 1912) were sampled to promote a new local manufacture of natural hydraulic limes (NHL).

The chemical-mineralogical and petrographic characterisation of the geological materials determined that they corresponded to siliceous limestones and not to clayey limestones or marls as it was initially assumed for the manufacture of these binders.

Ten of the 41 geological samples were used for the laboratory manufacture of NHL, comparing their mineralogy with that of the limes manufactured in the closed plant. These findings open the possibility of new areas for the extraction of raw materials to produce hydraulic binders and the recovery of the pre-existing industrial environment.

Referencias

Rubio Gandía, M.A, Giménez Yanguas, M., Reyes Mesa, J.M. (2003). *Patrimonio Industrial en Granada.* Auskaria Mediterránea, Granada, 137 p.

Rodríguez Ávila, M. (1912). En: *Congreso de la Asociación Española para el Progreso de la Ciencia.* Ciencias Fisicoquímicas 3, 19-32.

Interaction between cultural heritage and the surrounding natural environment: analysis with 3D models and software tools.

Interacción entre el patrimonio cultural y el entorno natural circundante: análisis con modelos 3D y herramientas software.

R. Rocca[1]

1 Geologist. UAV operator. Self-employed. 28009 Madrid (Spain). riccardo.rocca@hotmail.com

Abstract: This presentation describes the use of 3D models and software tools for analysing the interaction of cultural heritage with its natural surroundings. The analysis of cultural heritage can rely on new possibilities when the sites are represented as virtual 3D models. This type of representation is nowadays more easily achieved by using affordable technologies, like the acquisition of images with drones and their processing with photogrammetric software. With satellite images and digital topography, it is also easy to build a representation of the natural environment surrounding the heritage site, thus allowing to expand the analysis towards the interaction between the monument and its natural environment. This presentation describes two examples in which 3D models and *ad-hoc* software tools have been developed to analyse some specific aspects of this interaction:

- a software utility to calculate and represent the portion of material eroded from a monument surface, in order to analyse the relationship between erosion and natural weathering processes (Torre de Cerrillos, Roquetas de Mar, Almeria);
- a graphic representation of the sun position in prehistoric age, in order to test the theory of a possible alignment of an antient monument with the sun ("Castro de Ulaca" altar, Villaviciosa, Ávila).

Key words: drone, 3D model, photogrammetry, cultural heritage.

Resumen: *Se describe el uso de modelos 3D y herramientas software para analizar la interacción del patrimonio cultural con su entorno natural. El análisis del patrimonio cultural puede contar con nuevas posibilidades cuando los sitios se representan como modelos virtuales en 3D. Este tipo de representación se logra hoy en día más fácilmente mediante el uso de tecnologías asequibles, como la adquisición de imágenes con drones y su procesamiento con software fotogramétrico. Con imágenes de satélite y topografía digital, también es sencillo construir una representación del entorno natural que rodea el sitio patrimonial, permitiendo así ampliar el análisis hacia la interacción entre el monumento y su entorno natural. Se describen dos ejemplos en los que se aplica esta metodología ad-hoc para analizar aspectos específicos de esta interacción:*

- una utilidad software para calcular y representar la porción de material erosionado de la superficie de un monumento, para analizar la relación entre la erosión y los procesos meteóricos naturales (Torre de Cerrillos, Roquetas de Mar, Almería);

- una representación gráfica de la posición del sol en épocas prehistóricas, para comprobar la teoría de una posible alineación de un monumento antiguo con el sol (altar del Castro de Ulaca, Villaviciosa, Ávila).

Palabras clave: *dron, modelo 3D, fotogrametría, patrimonio cultural.*

INTRODUCTION

A comprehensive study of cultural heritage includes the analysis of its relationship with the surrounding natural environment. Traditional techniques are based on measurements, taken on site with the typical architectural and topographical tools (meter, compass, GPS, total station, etc.), and 2D graphics, like pictures, drawings and maps.

3D digital models can improve these techniques and help explaining complex three-dimensional relationships in a more intuitive way. Monuments and landscapes can be joined together in a single model by combining the photogrammetric representation of monuments with satellite images and digital topography. In this way, the monuments surface can be represented with enhanced details, and the point of view in the landscape can be switched rapidly along different orientations and between small and large scale. As a result, monuments and landscapes and their mutual relationship can by analysed in a very realistic and practical way.

This presentation describes two cases of such analysis, showing the combination of techniques and software tools that have been developed and applied.

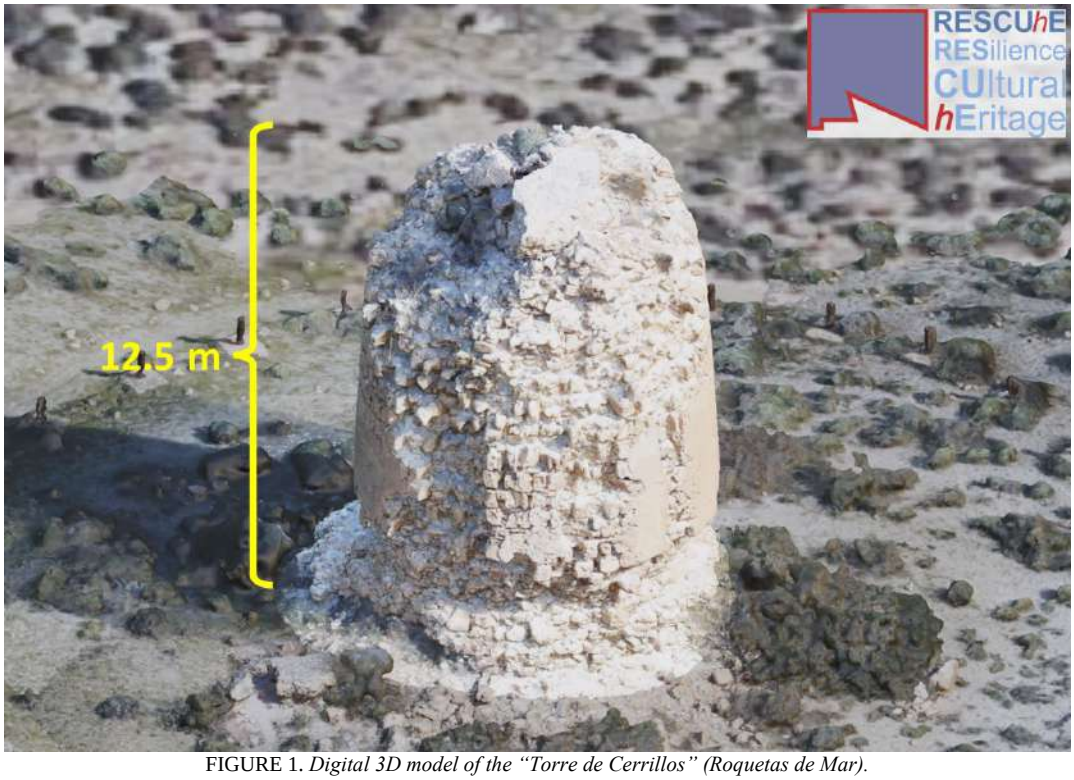


FIGURE 1. *Digital 3D model of the "Torre de Cerrillos" (Roquetas de Mar).*

CASE STUDIES

The first case is an example of erosion anisotropy analysis applied to the historical watch tower "Torre de Cerrillos", and is part of project RESCUhE (Improving the structural **RES**ilience of **CU**ltural **hE**ritage towards extreme directional hydro-meteorological events in the context of Climate Change), funded by the Ministry of Science and Innovation.

The tower is located close to Roquetas de Mar, in Almeria (Spain). It dates back to the 14th century and was later reconstructed in the 16th century (Fig. 1). Its cylindrical shape, isolated and without other buildings nearby, makes it an ideal case for testing the anisotropic weathering and erosion in relation with various natural processes (Martinez-Martinez et al., 2022). Their effects on the tower surface have been analysed in terms of both geochemical alteration and volumetric erosion.

For the volumetric analysis, a 3D model of the tower was generated using images acquired with a drone (DJI Mavic Pro - https://www.dji.com/es/mavic/info) and processed with a photogrammetric software (PIX4D Mapper - https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software). The resulting model was loaded into Blender, a 3D editing software (https://www.blender.org), where a cylindrical object was added and adapted around the photogrammetric model to simulate the original tower surface (Fig. 2a). The surface of this cylinder was then subdivided into small tiles of around 1x1 cm dimensions. A software add-on was written in Blender Python code to calculate the erosion as the distance of each tile to the photogrammetric surface, and to assign a color to each tile based on a color scale representing the different levels of erosion (Fig. 2c). The erosion distribution was finally displayed as a 3D envelope around the tower (Fig. 2b).

On this display the tower surface appears eroded in specific areas, namely a horizontal band with its maximum at around 3 meters above ground, and three vertical bands, starting from 4-5 meters above ground and concentrated on the southern side of the tower. The horizontal erosion is clearly due to damp raising from the soil and to the consequent processes of chemical dissolution and salt crystallization that act all around the tower without any evident preferential orientation.

On the other hand, the erosion occurring at a higher level shows a clear preferential orientation and therefore several directional weathering processes have been considered as the possible cause: wind, wind driven rain, sea spray from the nearby coastline, insolation and biological colonization.

The southern side of the tower is facing towards the sea coastline and is the most affected by insolation, therefore the study concludes that the tower erosion has been caused mainly by the combined action of marine aerosol and insolation. Additionally, the wind may have also contributed to the erosion in those areas where the surface was already weakened by the first two processes.

In conclusion the model, with the *ad-hoc* software, has allowed to generate a very clear representation of the tower erosion and its relationship with the directional weathering processes. The observations made with this model should help designing effective preventive conservation solutions for heritage assets, by building barriers concentrated on the sides where the main damaging natural processes are active.

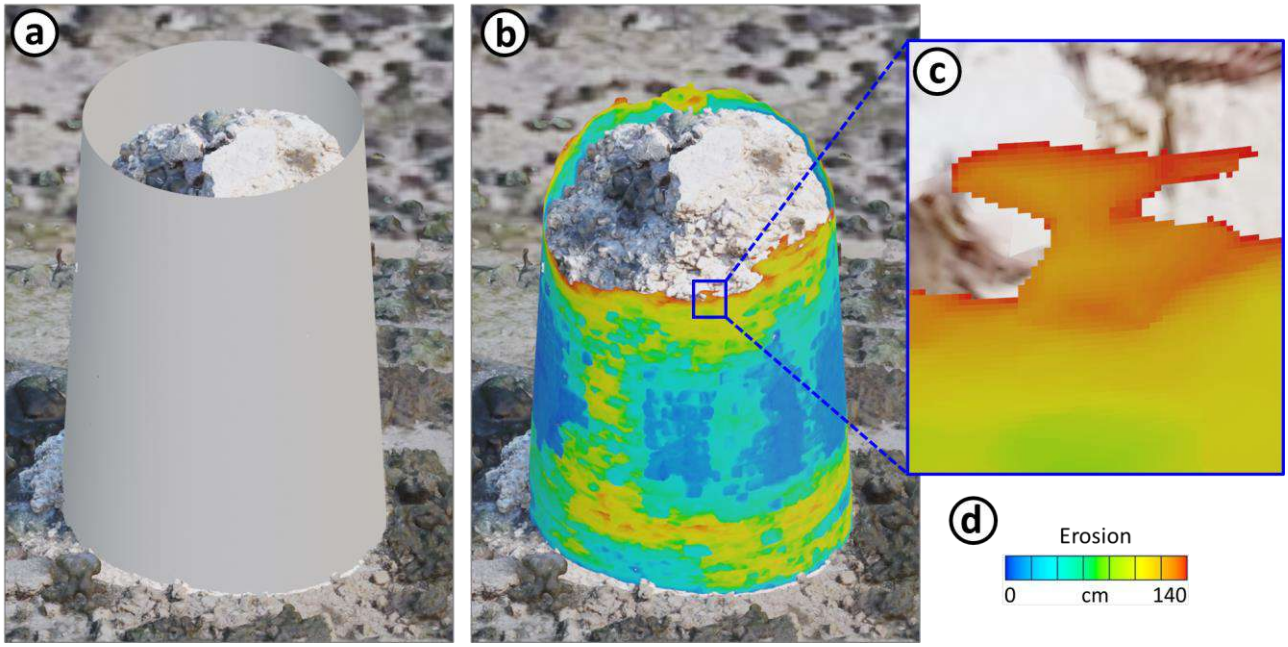


FIGURE 2. *a) Ideal original surface wrapped around the current real surface of the tower; b) erosion map calculated with the python Python add-on and displayed over the tower ideal surface; c) erosion map enlarged detail, with the ~1x1 cm pixels visible; d) color scale for the erosion map.*

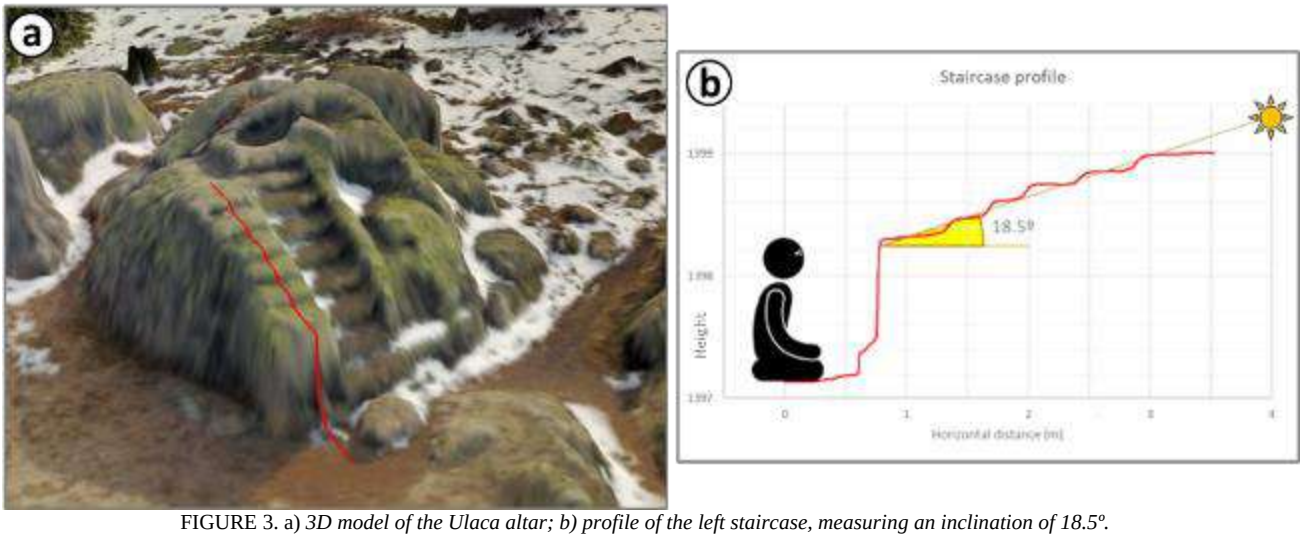


FIGURE 3. a) *3D model of the Ulaca altar; b) profile of the left staircase, measuring an inclination of 18.5º.*

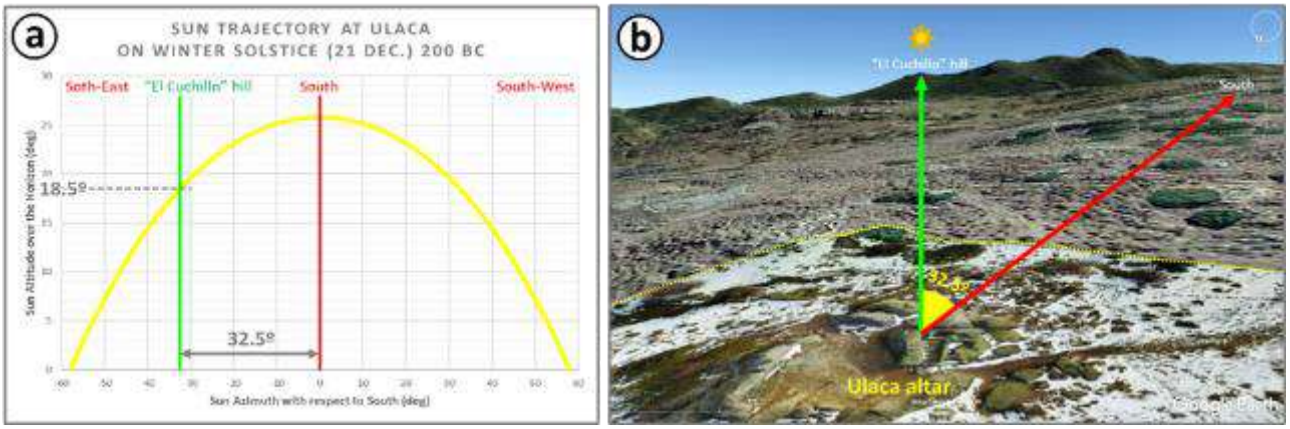


FIGURE 4. a) S*un trajectory in the winter solstice in the location and epoch of the Ulaca settlement (200 BC); the sun reached an altitude of 18.5º above the horizon when it was at an azimuth of 32.5º measured from south to east; b) landscape model with the azimuth of 32.5º, observed from the altar location, that points towards "El Cuchillo", the easternmost hill in the mountain range visible on the horizon.*

The second case is applied in Ulaca, a prehistoric village located 20 km SW of Ávila (Spain) and inhabited by the antient Vettones people between the 3rd and 1st century BC (Ruiz Zapatero 2005). Among the several buildings that have been identified in the site, one has been interpreted as a sacrificial altar. It is made of a single granitic boulder that was carved to obtain two staircases and a number of connected pools. The two staircases lead to the top of the monument and are oriented heading towards the mountain range that is visible to the SSE. A previous study (Perez Gutiérrez, 2009) suggested that the orientation of the staircases might be linked with the sun position in the sky.

In order to test this theory a 3D model of the altar was generated with the same procedure as in the previous case (drone images & photogrammetry) (Fig. 3a). Then a model of the surrounding landscape was obtained by draping a satellite image over the digital topography, both data downloaded from the CNIG Spanish national database (https://centrodedescargas.cnig.es). The two models were combined together in Blender so as to allow the seamless analysis of the altar details in relation with the major features of the landscape (Fig. 4b).

The inclination of the left staircase of the altar was calculated from the 3D model and was found to be around 18.5º (Fig. 3b). Such a low angle was compared with the season when the sun is at its lowest. Therefore the sun trajectory at winter solstice (December 21st) in the location and in the epoch of the Ulaca settlement (200 BC) was reconstructed with data extracted from the astronomical database Stellarium (https://stellarium.org) and represented as a graph (Fig. 4a). Thus, it could be noticed that in that epoch the sun reached the altitude of 18.5º above the horizon when it was at an azimuth of 32.5º measured from south to east. When plotting this azimuth on the landscape surrounding the altar, it was found that it was heading towards "El Cuchillo", the easternmost hill in the mountain range that appears on the horizon in SSE direction from the altar.

Therefore, on the shortest days of the year the steps in the left staircase of the Ulaca altar started to be illuminated when the sun reached the position above the first peak in the mountain range on the horizon. It is possible that this coincidence was noticed by the people in Ulaca and loaded with some symbolic meaning.

This is a very suggestive theory that cannot be confirmed with the model alone, nevertheless the 3D model has proven to be a very practical tool to test it and to represent the geographical and astronomical concepts in a very intuitive and didactic way.

CONCLUSIONS

The two examples here described demonstrate that the combination of various 3D rendering techniques allow to analyse the cultural heritage and its surroundings with ease, identifying and highlighting relationships among various natural processes at different scale. Furthermore, these techniques allow to illustrate complex concepts to a non-specialised audience in a more intuitive way, making them a suitable tool for the promotion of cultural heritage.

Links to the 3D models:
- Torre de Cerrillos: https://rebrand.ly/torre-de-cerrillos
- Altar de Ulaca: https://rebrand.ly/castro-de-ulaca

ACKNOWLEDGEMENTS

This publication is part of I+D+I projects PID2020-116896RB-C21 and PID2020-116896RB-C22, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (Ministerio de Ciencia e Innovación).

REFERENCES

Martínez-Martínez, J., Abellán, A., Berrezueta, E. (2022): *Erosion directionality and seasonality study using the anisotropy matrix. Application in a semiarid Mediterranean climate (SE Spain).* Science of the Total Environment, 84: 150165.

Perez Gutiérrez, M. (2009): *Astronomía y Geo: 141metría en la Vettonia.* Complutum, 20: 141-164.

Ruiz Zapatero, G. (2005): *Guía Castro de Ulaca: Solosancho, Ávila.* IGDA-Dip. De Ávila, 43 p.

Ruta del "mármol" de Monreal: un viaje desde un fondo marino con esponjas del Cámbrico a un cancel visigodo en Salamanca.

Monreal "marble" route: a trip from a seabed with Cambrian sponges to a Visigothic "cancel" in Salamanca.

M. Rodríguez-Martínez[1], I. Moreno González[2], S. Menéndez[2], R. Pérez Martín[3], A.P. Pieren Pidal[1], V. Corzo Varillas[4], E. Moreno-Eiris[1] y A. Perejón[1]

1 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis, 12, 28040 Madrid. martarm@geo.ucm.es, eiris@ucm.es, aparqueo@ucm.es
2 CN Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, C/ Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid. i.moreno@igme.es, s.menendez@igme.es
3 Museo de Salamanca, Plaza Patio de Escuelas, 2, 37008, Salamanca. rosario.perez@jcyl.es, alberto.bescos@jcyl.es
4 https://www.casafrancaweb.es/. cvvcsg@telefonica.net

Resumen: Se propone una ruta en torno a la cantera inactiva donde se explotaba el "mármol" de Monreal (Lugar de Interés Geológico) que utiliza parcialmente la Ruta de los Caminos Históricos de Entresierras y la propia Vía de la Plata. Pretende difundir el diverso patrimonio geológico, minero y arqueológico de la zona. Una zona fronteriza con interacciones culturales y comerciales desde la Edad del Bronce. Un paisaje minero de explotación y transporte de la piedra natural y metales vertebrado a lo largo de la Vía de la Plata desde los romanos hasta nuestros días. El reciente hallazgo de arqueociatos en un cancel de caliza marmórea en el Museo de Salamanca y su similitud con las facies de la cantera sugiere que los visigodos explotaron el litotecto de calizas del Cámbrico *Serie 2* del sur de la provincia de Salamanca.

Palabras clave: Geoturismo, Patrimonio Geológico, Patrimonio Minero, Patrimonio Arqueológico, Piedra Natural.

Abstract: *A route is proposed around the inactive quarry where the "marble" of Monreal (Site of Geological Interest) was exploited, which partially uses the Route of the Historical Paths of Entresierras and the Vía de la Plata itself. It aims to disseminate the diverse geological, mining and archaeological heritage of the area. It is a border area with cultural and commercial interactions since the Bronze Age. It is a mining landscape of exploitation and transportation of natural stone and metals structured along the Vía de la Plata from the Romans to the present day. The recent discovery of archaeocyaths in a marble limestone "cancel" in the Museum of Salamanca and its similarity with the facies of the quarry suggests that the Visigoths exploited the Cambrian Series 2 limestone lithotect from the south of the province of Salamanca.*

Key words: *Geotourism, Geological Heritage, Mining Heritage, Archaeological Heritage, Natural Stone*

INTRODUCCIÓN

En la provincia de Salamanca únicamente aflora una unidad geológica que haya sido explotada comercialmente como "mármol". Al sur de la localidad de Casafranca hay una cantera inactiva y otra activa, en donde se explotan las variedades comerciales de mármoles Crema y Verde Monreal. La cantera inactiva fue adecuada para su visita con una actuación del programa Hábitat Minero de la Unión Europea. Posteriormente es propuesta como Lugar de Interés Geológico (LIG) por su interés científico, didáctico y/o turístico e incluido en el IELIG en el año 2016. El objetivo es la creación de una ruta sobre el "mármol" de Monreal que potencie el conocimiento sobre la explotación y uso de la piedra natural en la comarca como nexo de unión entre la geodiversidad del paisaje, el patrimonio minero y arqueológico de la región.

ANTECEDENTES

El interés geológico principal del LIG CI058 Caliza cámbrica de Tamames en Las Zorreras es de carácter estratigráfico, mientras los aspectos paleontológicos (presencia de arqueociatos), tectónicos y geomorfológicos (karstificación) han sido catalogados como de interés geológico secundario. Asimismo se destaca su valor paisajístico y minero-industrial. Este LIG ha sido objeto de actuaciones educativas y divulgativas previas, tales como salidas programadas de campo de diferentes niveles (secundaria y grados universitarios), itinerarios geológicos como el Geolodía 13 Salamanca (Martínez-Graña et al., 2013), así como actuaciones indirectas, como la exposición permanente de tres bloques de Crema y Verde Monreal en el Jardín Geológico de la Universidad de Salamanca (https://jardingeologico.usal.es/index.php/2023/10/10/no4/).

MARCO GEOLÓGICO

El LIG se localiza en la Zona Centroibérica, parte del Macizo Ibérico, dentro del dominio interno del Orógeno Varisco Europeo. En esta zona, el registro metasedimentario Cámbrico Terreneuviense-*Serie 2* corresponde a las formaciones siliciclásticas de Monterrubio y Aldeatejada (principalmente pizarrosas), y las areniscas y carbonatos de Tamames y pizarras del Endrinal (Díez Balda, 1986). Durante la *Edad 2* del Cámbrico, la sedimentación carbonática marina formó depósitos de llanura mareal (Corrales et al., 1974), que afloran en la vertiente meridional de las sierras de Tamames y Las Quilamas, así como parches arrecifales construidos por arqueociatos (*sensu* Corrales y Valladares, 1980), en condiciones submareales más profundas, y depósitos de talud (Pinilla Serrano y Barba Regidor, 2023), que afloran en el Endrinal y sus inmediaciones.

Estos carbonatos presentan características texturales y mineralógicas deposicionales y postdeposicionales variables, han sufrido metamorfismo regional de bajo grado y metamorfismo de contacto y/o metasomatismo y desarrollo de depósitos de skarn (Díez Balda, 1986; Timón et al., 2007), en sus proximidades a la intrusión pérmica de los granitoides variscos de Los Santos-Valdelacasa, parte oriental del Batolito del Sistema Central Español. En la actualidad, las rocas ornamentales que se comercializan como mármoles Crema y Verde Monreal se extraen de los carbonatos que afloran en el sinclinal del Endrinal, donde se localiza la cantera inactiva declarada como LIG CI058 Caliza cámbrica de Tamames en Las Zorreras.

RUTA DEL "MÁRMOL" DE MONREAL

La ruta que proponemos se inicia en la localidad de Casafranca y aprovecha parte de dos itinerarios existentes: el GR-181 ruta de los caminos históricos de Entresierras (enlazado con otras rutas de la Reserva de la Bioesfera de la Sierra de Béjar-Francia y con la Ruta de las Quilamas) y la propia Vía de la Plata. Es un sendero que ya se está compartiendo tanto en redes sociales como en plataformas como Wikiloc. La cantera inactiva es un reclamo para los visitantes que acceden por diversas rutas de senderismo e incluso por rutas BTT desde Guijuelo, para visitar a la que denominan como "mina de mármol"

La ruta cruza el flanco norte del pliegue E-O del Endrinal, permite la observación de las areniscas y calizas de Tamames y las pizarras del Endrinal (único lugar dónde afloran éstas últimas). Antes de acceder a la cantera existe un horno de cal, dónde los visitantes pueden aprender como, a partir de la calcinación de la caliza entorno a 1000º C durante días, se obtenía óxido de calcio (cal). El uso de la cal era imprescindible en la construcción, desde el mortero de cal de los romanos hasta el encalado de las paredes, que cubría tanto funciones estéticas como fungicidas y de climatización. Esta adecuación turística fue subvencionada por la Diputación de Salamanca para poner en valor los aspectos culturales de la zona, aunque ni en el emplazamiento ni en las proximidades se recuerde la existencia de hornos de cal. Sin embargo, en afloramientos próximos como Calamorra (flanco sur del Endrinal) o Calamorros (Sierra de Tamames), sí son muy abundantes las caleras. En los materiales empleados en la adecuación turística del horno de cal, se han utilizado facies *wackestone* a *floatstone* de arqueociatos, diferentes a las que pueden observarse en la propia cantera, que permiten un buen reconocimiento de estos fósiles en diferentes secciones. En este punto se pueden explicar las características anatómicas, paleoecológicas y bioestratigráficas de estas esponjas fósiles que colonizaron los fondos marinos de esta región entorno a unos 515 Ma y que ahora forman parte de las calizas y dolomías recristalizadas que afloran en el Sinclinal del Endrinal.

La cantera inactiva es el lugar adecuado para introducir qué es la piedra natural y cuáles son las principales diferencias entre las clasificaciones petrográficas y las clasificaciones comerciales que se usan en las rocas ornamentales. Se puede explicar el papel de España como productor mundial destacado de rocas ornamentales, así como la excepcionalidad local del "mármol de Monreal", único en la provincia. La cantera es el lugar idóneo para explicar cuáles son los criterios comerciales de dureza, composición y tamaño medio de los cristales (textura de recristalización) que permiten diferenciar entre calizas y dolomías marmóreas, mármol calcítico y mármol dolomítico y qué aspectos generales se recogen en la denominación comercial final. La cantera ofrece además la oportunidad de explicar el ciclo de la piedra natural y sus principales etapas: desde la investigación (litotecto explotable y ubicación de la cantera), extracción (diseño de los bancos, preparación del terreno y técnicas de corte), transformación, hasta la comercialización final del "mármol". En la cantera se pueden observar los frentes de extracción, de manera que pueden explicarse las técnicas de arranque, sus etapas y los factores intrínsecos (litológicos, cambios de facies, pliegues, discontinuidades, karstificación) y extrínsecos (existencia de agua, accesos, vertederos, coste de los equipos, impacto ambiental...) que las controlan.

Desde la cantera subimos al vértice geodésico del monte Monreal (1082 m), donde se alzaba una fortaleza en el s. XIII que junto con otras defendían la frontera leonesa frente a Castilla (ver referencias en https://www.casafrancaweb). Desde allí, dirigiendo la vista hacia el O y al OSO podremos distinguir los relieves del Pico Cervero (1265 m) y la Peña de Francia (1727 m), sierras cuyas rocas nos revelan cómo continuó la sedimentación en plataformas siliciclásticas marinas desde el Ordovícico hasta el Devónico, en el margen continental de Gondwana occidental. En esta paleogeografía marina, podremos imaginar cómo durante el Carbonífero, la colisión entre Gondwana y Laurasia ensambló el supercontinente Pangea a través de una gran cordillera: el Orógeno Varisco. Cuyos restos, sometidos a la erosión durante millones de años, contemplamos en el paisaje que nos rodea. A unos 5 km hacia el sur, podremos adivinar el relieve menor de El Cabezo (1102

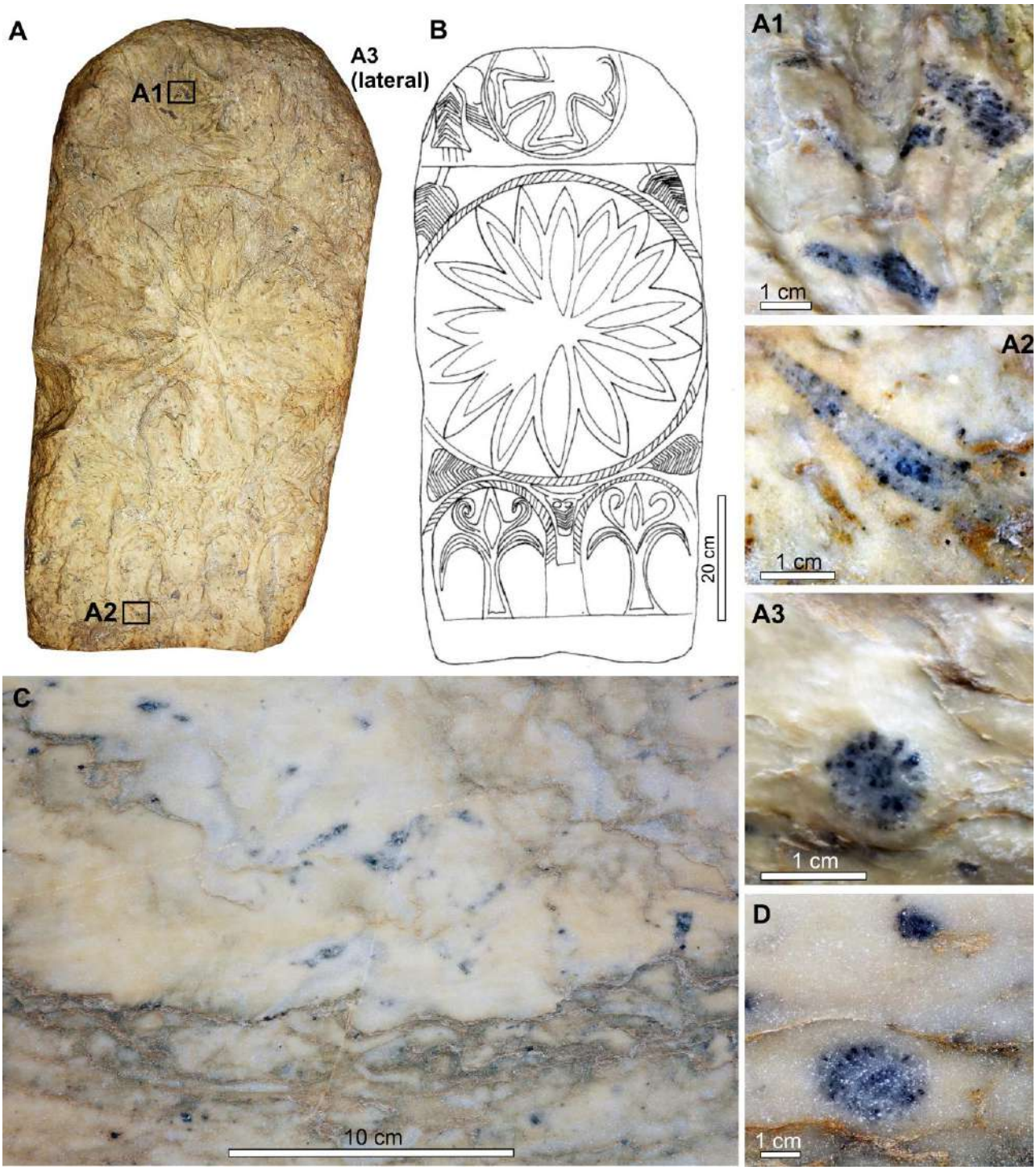


FIGURA 1. *A) Cancel visigodo de Santibáñez de Béjar actualmente en el Museo de Salamanca. B) Calco del mismo tomado de Barroso Cabrera y Morín de Pablos (1994). A1-A3) Detalle de las secciones oblicuas, longitudinales y transversales de los arqueociatos del cancel. C) Aspecto de uno de los frentes de explotación de la cantera inactiva catalogada como LIG CI058, con alta concentración de cálices de arqueociatos. D) Detalle de una sección transversal de arqueociato de la cantera inactiva.*

m), con las canteras activas de granitos de Los Santos. Sus monzogranitos han sido empleados en la monumental Salamanca desde la época romana (Puente Romano), siglos XVI-XVII y en el siglo XX (tanto en restauración como en nueva construcción), compitiendo con otros granitos más próximos, quizás gracias a su transporte por la Vía de la Plata y al empleo de la cal de las calizas cámbricas al N de Los Santos, como sostienen López Plaza et al., (2009). Desde Monreal, podemos continuar el sendero y visitar el Parque Temático del Granito en Los Santos, o bien retornar a Casafranca por la próxima Vía de la Plata, declarada Bien de Interés Cultural (1931, 2001) con el nombre de «Calzada de la Plata» y visitar los miliarios y restos de la calzada romana, objeto de diversas actuaciones arqueológicas de puesta en valor (Jiménez-González, 2017).

Observando el paisaje a lo largo de esta ruta, podremos entender mejor la escala de los procesos geológicos, operando a lo largo del tiempo,

comprendiendo la dimensión de las deformaciones que hemos observado en la cantera, antes un fondo marino con esponjas. Hasta el momento no existen evidencias de canteras históricas en estos carbonatos del Cámbrico. Sin embargo, durante la planificación de esta ruta, hemos descubierto la existencia de un cancel visigodo realizado en calizas recristalizadas con arqueociatos y alojado en el Museo de Salamanca (Figs. 1A-B), donde se puede visitar el rico patrimonio arqueológico de esta región. El cancel, pieza que separaba el altar mayor de los fieles, fue hallado en Santibáñez de Béjar en 1990. Según Barroso Cabrera y Morín de Pablos (1994) el relieve tallado representa un tema apocalíptico, con elementos figurativos que permiten establecer paralelismos con otras piezas de finales del periodo visigodo, manifiesta la importancia del núcleo bejarano y "*plantea las posibles relaciones del mismo con los talleres emeritenses y su expansión hacia tierras del norte peninsular*"

La pieza de caliza marmórea tiene tonalidad crema, espaciado y coloración de la foliación, concentración y distribución de arqueociatos y tonalidad de los cementos intrapartícula, similares a los observados en algunas facies de la cantera inactiva (Figs. 1C-D). Por el momento se desconocen ejemplos con tan altas concentraciones de arqueociatos en elementos arquitectónicos romanos y/o visigodos. Ejemplos destacados del uso de calizas cámbricas recristalizadas con arqueociatos por los romanos en el Patrimonio Histórico Cultural proceden del Teatro Romano de Mérida y de restos del Templo de Roma en el Hornito de Santa Eulalia en Mérida (Menéndez et al., 2021). Sin embargo, estos ejemplos muestran las típicas facies rosadas idénticas a las observadas en las formaciones Pedroche y Alconera (Zona de Ossa-Morena). Los cálices de los arqueociatos están recristalizados y presentan rellenos geopetales idénticos a la matriz circundante y cementos de enterramiento característicos.

A falta de estudios geoquímicos, las características observadas en la caliza marmórea del cancel de Santibáñez de Béjar son muy similares a las de las calizas recristalizadas y marmóreas que afloran en el Sinclinal del Endrinal, lo que sugiere que podrían ser el litotecto que usaron los visigodos. De ser así, la protección de la cantera inactiva debería ser mayor por su relación con el patrimonio arqueológico de la región.

AGRADECIMIENTOS

Esta es una contribución al proyecto "Environmental and biogeochemical perturbations associated with the Cambrian Explosion and the Ordovician Biodiversification in West Gondwana and Baltica" (PID2021-125585NB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

REFERENCIAS

Barroso Cabrera, R. y Morín de Pablos, J. (1994): La placa de Santibáñez de Béjar (Salamanca) una nueva escultura de época visigoda con representación figurada. *Zephyrus: Revista de prehistoria y arqueología*, 47: 369-374.

Corrales, I., Manjón, M., y Valladares, I. (1974): La serie carbonatada de Navarredonda de la Rinconada (Salamanca, España). *Stvdia Geologica* VIII: 85-91.

Corrales, I. y Valladares, I. (1980): Facies carbonatadas del Cámbrico de Salamanca. *Studia Geologica Salmanticensia*, XVI: 95-102.

Díez Balda, M.A. (1986): *El Complejo Esquisto-Grauváquico, las series paleozoicas y la estructura hercínica al sur de Salamanca*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 279 p.

Jiménez-González, M. (2017): La Vía de la Plata a su paso por la provincia de Salamanca: valorización patrimonial. En: *Jornadas sobre las calzadas romanas en la Antiguedad, Ponencias de las jornadas*: 63-86.

López Plaza, M., García de los Ríos Cobo, J.I., López Moro, F.J., González Sánchez, M., Íñigo, A.C., Vicente Taberna, C. y Jiménez Fuentes, E. (2009): La utilización del granito de Los Santos en la Ciudad de Salamanca. *Studia Geologica Salmanticensia*, 45:7-40.

Martínez-Graña, A., González Delgado, J.A., Goy Goy, J.L., Martínez Jaráiz, C., Andrés Cimarra, C. y De Paz Uzquiano, J.F. (2013): Un viaje al mar de hace 500 millones de años en las Quilamas. Itinerario Geológico: Casafranca-Rinconada de la Sierra-La Bastida. En*: Geología 13 Salamanca*, 9 p.

Menéndez, S., Perejón, A., Moreno-Eiris, E. y Rodríguez-Martínez, M. (2021): Cambrian archaeocyathan limestones in monuments of the Spanish historial cultural heritage. En: *X International Online ProGEO Symposium, Abstract Book:* 273-274.

Pinilla Serrano, I. y Barba Regidor, P. (2023): Análisis de biolitos del cámbrico inferior en taludes carbonatados: Las calizas de Tamames (Salamanca). En: *Geogaceta*, *74*: 23-26.

Timón, S.M., Moro, M.C., Cembranos, M.L., Fernández, A. y Crespo, J.L. (2007): Contact metamorphism in the Los Santos W Skarn (NW Spain). *Mineralogy and Petrology*, 90: 109-140.

Interrelación de la Geología y el Paisaje con las construcciones defensivas del Frente de Madrid (1936-1939) en el Subsector Peguerinos-Robledo de Chavela (Sistema Central español).

Interrelationship of Geology and Landscape with the defensive constructions of the Madrid Front (1936-1939) in the Peguerinos-Robledo de Chavela Sub-sector (spanish Central System).

F.J. Rubio Pascual[1], J.M. Baltuille Martín[2], P. Schnell Quiertant[3], E. Álvarez Areces[4] y J. Fernández Suárez[4]

1 Dpto. de Geología y Subsuelo. Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. f.rubio@igme.es
2 Bravo Murillo, 62. 28003 Madrid. jm.baltu@yahoo.es
3 Asociación Española de Amigos de los Castillos. C. del Prado 26, 28014 Madrid. pabloschnell@yahoo.es
4 Dpto. de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica. Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. e.alvarez@igme.es; j.fernandez@igme.es

Resumen: Hemos estudiado los conjuntos defensivos (CoDe's) de ambos ejércitos en la Guerra Civil Española (1936-1939) en el Frente de Madrid, Subsector Peguerinos-Robledo de Chavela, situado en el Sistema Central Español; la tipología de sus diferentes elementos, su distribución en los despliegues, su relación con las características geológicas y geomorfológicas de su emplazamiento y el aprovechamiento de rasgos petrológicos, estructurales y geomorfológicos del terreno. El uso de cartografías geológicas y geomorfológicas ha permitido ensayar una metodología de cuantificación para esas relaciones mediante porcentajes de distribución e índices de correlación. Se obtienen correlaciones positivas para litologías duras y los relieves residuales por erosión diferencial que sustentan, así como con determinadas direcciones estructurales, tanto alpinas como variscas, condicionando el relieve. Entre las formas no correspondientes a relieves residuales ni estructurales, se aprecia una adaptación de los CoDe's a elementos geomorfológicos diversos (superficies de erosión, cabeceras torrenciales), que resulta favorable desde el punto de vista táctico defensivo. Se constata que emplazamientos en posiciones geomorfológicas en principio no favorables para su protección, parecen responder a necesidades defensivas específicas (vías de comunicación, núcleos urbanos, enlace). También se observan en campo relaciones entre determinadas tipologías constructivas y las características petrológicas y estructurales de los materiales.

Palabras clave: Guerra Civil Española, conjunto defensivo, geología, geomorfología, Sistema Central español.

Abstract: *We have studied the defensive fighting positions (DFP's) of both armies in the Spanish Civil War (1936-1939) in the Madrid Front, Peguerinos-Robledo de Chavela Sub-sector, in the Spanish Central System; the typology of their different elements, their distribution into the deployments, their relation with the geological and geomorphological characteristics of their emplacement and the exploitation of petrological, structural and geomorphological features of the ground. The use of geological and geomorphological cartographies has allowed to test a quantification methodology for those relationships by means of distribution percentages and correlation indexes. We obtain positive correlations for hard lithologies and the differential erosion landforms that they support, as well as for determined structural directions, both Alpine and Variscan, conditioning the landscape. Between those not corresponding to residual nor structural landforms, we notice an adaptation of the DFP's to diverse geomorphological elements (erosion surfaces, torrential watersheds) which is favorable from the defensive tactic point of view. We note that emplacements in not in principle favorable geomorphological positions for their protection, seem to respond to specific defensive necessities (lines of communication, urban areas, liaison). We also observed on the ground relations between determined constructive typologies and the petrological and structural characteristics of materials.*

Key words: *Spanish Civil War, defensive fighting position, geology, geomorphology, spanish Central System*

INTRODUCCIÓN

Tras el fracaso parcial del intento de golpe de estado del 17-18 de julio de 1936, la conquista de la capital del estado (Madrid) se convierte en objetivo prioritario para los sublevados y su mantenimiento para los gubernamentales. Cuatro columnas convergen hacia Madrid desde las zonas controladas por los sublevados.

Uno de los ejes de avance se dirige hacia la Sierra de Guadarrama, tanteando la penetración a través del Puerto del León y sectores cercanos. Las fuerzas movilizadas desde Madrid acuden a bloquear los pasos de la sierra y la línea del frente quedará estabilizada con pocas variaciones hasta el fin de la guerra. En el llamado Subsector de Peguerinos-Robledo de Chavela han quedado abundantes restos de los elementos constructivos de ambos ejércitos agrupados en forma de conjuntos defensivos (CoDe's), algunos de ellos en excelentes condiciones de conservación. El estudio de las posibles relaciones de su distribución y tipología con la naturaleza geológica s.l. del terreno es el objeto de este trabajo.

ANTECEDENTES

La Guerra Civil española (1936-1939) sigue siendo un tema de gran interés histórico, desde las perspectivas militar, socio-política e incluso económica. Sólo en las últimas décadas se ha comenzado a investigar el tema concreto de la fortificación, y el empleo de la arqueología es aún más reciente. Sus técnicas (prospección, excavación, análisis espacial…) han modificado completamente el estudio de la Guerra Civil Española. La arqueología se ha aplicado hasta el momento sólo en algunos casos, destacando las investigaciones de Alfredo González Ruibal y las desarrolladas en el marco del Plan Regional de Fortificaciones de la Guerra Civil Española de la Comunidad de Madrid. Las prospecciones realizadas en dicho Plan, junto con el proyecto de investigación del IGME y dos ayudas de la Diputación de Ávila han servido para identificar las fortificaciones tratadas en este trabajo. Ningún trabajo había recogido también la interrelación con la geología y la geomorfología hasta la publicación de Baltuille et al. (2023). En este trabajo se proponen métodos básicos para realizar un acercamiento a la cuantificación de esa interrelación y seguramente abrimos un camino que será mejorado en los próximos tiempos.

MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra en el Sistema Central español (SCE; Fig. 1), fundamentalmente un bloque de basamento varisco elevado durante la Orogenia Alpina.

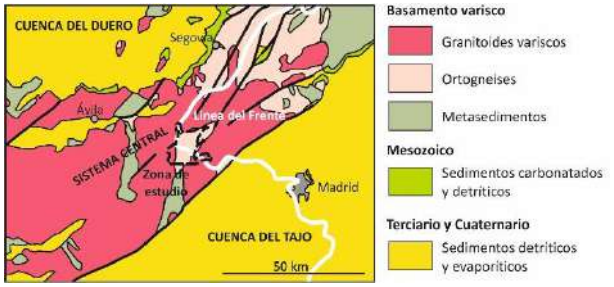


FIGURA 1. *Esquema geológico de situación del área de estudio. Tomado de Baltuille et al. (2023).*

De acuerdo con la litoestratigrafía de la cartografía geológica de las hojas de La Nava del Marqués (Bellido et al., 2004a) y San Lorenzo del Escorial (Bellido et al., 2004b), afloran en el área (Fig. 2) rocas ígneas metamorfizadas durante la Orogenia Varisca (ortogneises glandulares mesocratos y melanocratos, ortogneises de glándulas homométricas, leucogneises) y otras rocas metamórficas de origen sedimentario (paragneises y mármoles y otras rocas carbonatadas), todas pertenecientes al Macizo del Escorial. Estas se encuentran rodeadas por rocas ígneas plutónicas variscas de los macizos intrusivos de Zarzalejos-Valdemorillo (monzogranitos biotíticos equigranulares, monzogranitos biotíticos porfídicos, leucogranitos de dos micas y leucogranitos pegmatoides), y de la Nava del Marqués (monzogranitos biotíticos con megacristales y leucogranitos biotíticos). En menor proporción aparecen rocas filonianas formadas al final del ciclo varisco (tardivariscas) o ya durante el ciclo de la Orogenia Alpina (pórfidos graníticos-granodioríticos, lamprófidos alcalinos o calcoalcalinos, aplitas y diques de cuarzo), y algunos recubrimientos del Terciario (depósitos de bloques y cantos) y del Cuaternario (arenas, limos y cantos de fondos de valle, de abanicos aluviales y conos de deyección, y en depósitos aluviales-coluviales).

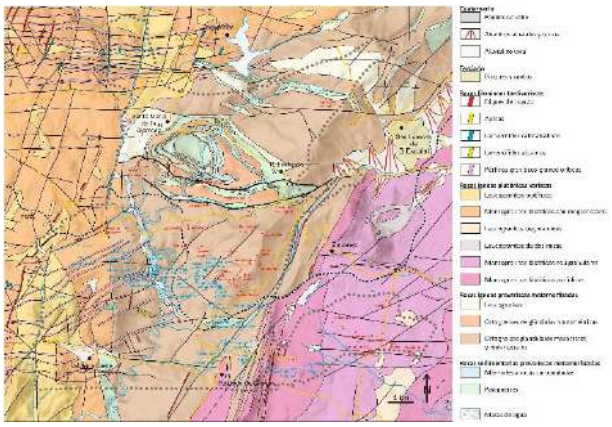


FIGURA 2. *Esquema geológico del área de estudio. Elementos nacionalistas en azul, republicanos en rojo. Modificado de Baltuille et al. (2023).*

Desde el punto de vista tectónico (Fig. 3), las rocas metamórficas del Macizo del Escorial han sufrido diferentes episodios de deformación dúctil durante la Orogenia Varisca (D1 a D5), de los cuales los rasgos estructurales más evidentes son la foliación regional de las rocas, paralela a los contactos entre cuerpos litológicos (estructuras D2), y los plegamientos de direcciones NO-SE (D3), N-S (D4) y E-O (D5) que reorientan las estructuras anteriores. Fallas dúctiles tardías E-O como la extensional de Santa María de La Alameda (Capote et al., 2000) coinciden con las direcciones de esfuerzos de D4. Las fases D4 y D5 afectan ya también a las intrusiones graníticas y condicionan la orientación general N-S a NE-SO. Fallas frágiles tardihercínicas (Capote et al., 1987) de la Etapa Malagón (E-O a reorientada NE-SO) condicionan la intrusión de diques de pórfidos graníticos y granodioríticos, y los de la Etapa Hiendelaencina (NNE-SSO) marcan la dirección de los diques de cuarzo. Las fases de fracturación frágil alpina en la zona se diferencian tradicionalmente en tres etapas (Ibérica, Guadarrama y Torrelaguna), de las cuales la Etapa

Guadarrama es la principal causante del levantamiento en bloques NE-SO del Sistema Central y es la única cuyos efectos son claramente identificables en la geología y el relieve que nos ocupa. En el caso de las diaclasas, destacan familias de dirección NNE-SSO, NE-SO y E-O, sobre todo evidentes en las rocas ígneas graníticas y gnéisicas.

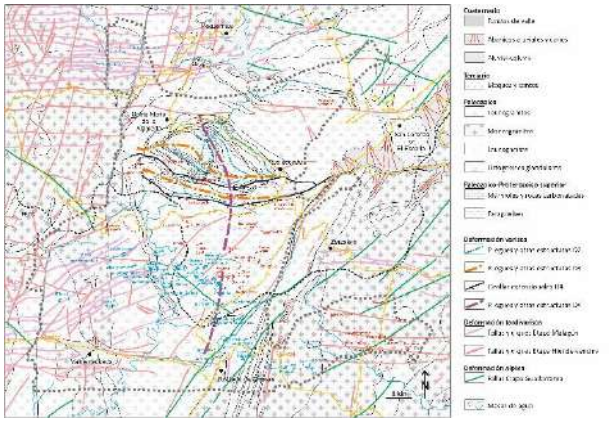


FIGURA 3. *Esquema tectónico de situación del área de estudio. Elementos nacionalistas en azul, republicanos en rojo. Tomado de Baltuille et al. (2023)*

MARCO GEOMORFOLÓGICO

Se adaptaron los esquemas geomorfológicos de las hojas geológicas antes mencionadas, basados en las cartografías geomorfológicas de Pedraza (1978) y Garzón (1980) para conformar la Figura 4. El área de estudio muestra como unidades del relieve los restos de tres superficies diferenciables. De mayor a menor edad y altitud se encuentran la superficie de penillanura poligénica en cumbres (hacia los 1640 m.s.n.m.), la superficie de penillanura poligénica en paramera (1300 m.s.n.m.) y las superficies degradadas o grabadas de pediment (950 m.s.n.m.). En todas ellas pueden aparecer elementos como relieves residuales, que corresponden a los tipos monadnock, inselberg y cresta, sustentados por rocas o zonas de roca más resistentes a la erosión que su entorno. Otras unidades son las laderas que enlazan superficies entre sí y con los valles y los fondos de corredores, más amplios. Entre los elementos geomorfológicos también destacan los domos, lanchares, berrocales y pedrizas del modelado en terrenos graníticos y gnéisicos a favor del diaclasado, las cabeceras torrenciales de formas semicirculares y otros elementos peor representados (Fig. 4).

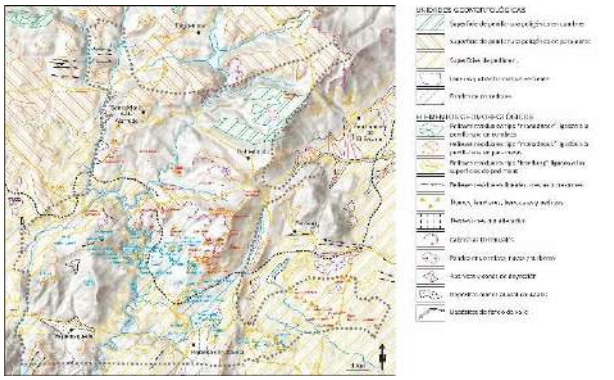


FIGURA 4. *Esquema geomorfológico de situación del área de estudio. Elementos nacionalistas en azul, republicanos en rojo. Tomado de Baltuille et al. (2023).*

METODOLOGÍA

El área de estudio ocupa 130.5 km^2. Para el análisis de los emplazamientos militares se han descontado las pequeñas superficies ocupadas por masas de agua y por litologías de poca representación superficial y sin elementos defensivos, quedando la superficie de unidades litológicas estudiadas en 130 km^2. Se proyectaron los CoDe's de ambos ejércitos (un total de 1023 elementos defensivos de diversos tipos identificados) sobre las cartografías geológica, tectónica y geomorfológica adaptadas para el proyecto, y un fondo del modelo digital del terreno. La tipología de elementos defensivos estudiados incluye puestos de tirador, puestos de granadero, trincheras excavadas, trincheras en relieve, parapetos, fortines, emplazamientos de ametralladora, de fusil ametrallador, de mortero, de artillería, observatorios, puestos de mando, alojamientos de tropa, refugios, caminos cubiertos y otros como fuentes protegidas, etc. También se estudiaron características petrológicas de los materiales en muestras seleccionadas y en campo se observaron detalles a escala de afloramiento, como relaciones con el grado de alteración de las rocas o con rasgos estructurales de mesoescala.

Para el análisis de la interrelación entre elementos defensivos y litoestratigráficos se utilizó la población total de elementos de ambos ejércitos. Se establecieron primeramente las proporciones de elementos defensivos ubicados en cada litología (A_n = Nº elementos sobre litología n / 1023) y de la superficie de cada litología con respecto a la superficie total del área de estudio (B_n = Superficie litología n / 130 km^2), introduciendo un índice de correlación Ic = (A_n / B_n) para cada litología, de forma que índices Ic > 1 indicarían una preferencia de emplazamientos sobre esas litologías e índices Ic < 1 indicarían una menor presencia de emplazamientos que lo que justificaría estadísticamente la superficie de afloramiento. También se analizó el porcentaje de cada tipo de elemento defensivo identificado que aparece en cada litología, al objeto de descubrir posibles correlaciones positivas. Como una de las características evidentemente más críticas de una roca es su dureza, se adoptaron los criterios de clasificación de González de Vallejo et al. (2004).

El análisis de la relación de los CoDe's con elementos estructurales y geomorfológicos se trató conjuntamente, ya que muchos de los rasgos estructurales son visibles gracias a su expresión geomorfológica. Se estudió la distribución estadística de todos los emplazamientos militares defensivos discriminando según su relación con estructuras tectónicas de diferentes etapas, otros rasgos geomorfológicos no estructurales, o bien sin relación a rasgos geomorfológicos en principio favorables y el mismo análisis independientemente para cada ejército con el fin de comparar resultados.

RESULTADOS

Del análisis de la relación entre abundancia de elementos defensivos y litologías, se deducen marcados índices positivos para los pórfidos graníticos-granodioríticos (IC = 3.5) y los monzogranitos biotíticos porfídicos (2.0), que son rocas duras, y entre las de acusado índice negativo, destacan los paragneises (0.1), que son relativamente menos duras y los monzogranitos biotíticos con megacristales (0.1), que aparecen bastante alterados en el área. Índice negativo presentan también los leucogneises (0.2), que en cambio son rocas muy duras, pero hay que considerar un claro sesgo en la distribución de la línea del frente que también puede estar interfiriendo con los resultados de otras litologías y recomienda tomarlos con cuidado. Respecto a la tipología de elementos, rocas muy duras como leucogneises son emplazamiento preferente de fortines (75%) y parapetos (13%). El 90% de los elementos situados sobre mármoles son puestos de tirador o granadero, igual que en otras rocas duras como leucogranitos biotíticos (48%) y pórfidos graníticos (46%). Los diques de cuarzo son soporte de trincheras en relieve (40%); puestos de tirador, fortines y refugios (20% cada uno). Por el contrario, los elementos como las trincheras excavadas o los alojamientos de tropa, también generalmente excavados, tienen una buena representación sobre paragneises (50%), ortogneises glandulares (32%) y zonas alteradas de diversos tipos de granitoides. Los emplazamientos de armas automáticas, cuya ubicación depende de la localización de los sectores a cubrir dentro del plan de fuegos del despliegue defensivo, muestran ser independientes del tipo de sustrato rocoso.

El estudio de los rasgos geomorfológicos, tanto los de control tectónico como los de otra naturaleza (poligénicos, fluvio-torrenciales, gravitacionales, etc.), muestra para ambos ejércitos un 53% de adecuación a formas tectónicas (D3 = 10%; D4 = 7%; Malagón = 19%; Hiendelaencina = 14%; Guadarrama = 3%) y un 28% de adaptación a los rasgos no estructurales (fundamentalmente alineaciones bordeando superficies poligénicas, inselbergs y también cabeceras torrenciales). Solo un 18% quedan en posiciones que hemos considerado no favorables al aprovechamiento del terreno, como laderas y fondos de los valles. Separando los resultados por ejércitos, destaca que el despliegue "nacional" alcanza un 24% de elementos en situación no favorable frente al 9% republicano. La explicación a esta asimetría parece encontrarse en necesidades tácticas concretas que obligaron a situar puestos a lo largo de rutas de enlace con emplazamientos de importancia vital o a la protección de vías y nudos de comunicación y núcleos urbanos.

La observación en campo de los CoDe's también ha aportado información sobre la adaptación de las fortificaciones a características geológicas de afloramiento, como la excavación de trincheras aprovechando zonas alteradas de las rocas o a favor de los planos de diaclasado en rocas duras.

CONCLUSIONES

La metodología utilizada en este trabajo permite un acercamiento cuantitativo al aprovechamiento del terreno por parte de los CoDe's de un frente de guerra. Pueden obtenerse valores básicos respecto a las litologías, la estructura y la geomorfología. Permite explicar distribuciones de elementos defensivos en función de las formas del terreno y realizar inferencias respecto a su intencionalidad táctica.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a José Román Hernández, del CN IGME-CSIC por su ayuda con el SIG. Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Geológico y Minero de España, la Asociación Española de Amigos de los Castillos, la Comunidad de Madrid y la Diputación de Ávila.

REFERENCIAS

Baltuille Martín, J.M., Schnell Quiertant, P. y Rubio Pascual, F.J. (2023): Las construcciones defensivas de la Guerra Civil Española en el Frente de la Sierra (Subsector de Peguerinos-Robledo de Chavela). Su relación con la Geología y el Paisaje. Diputación de Ávila. Madrid, 447 p.

Bellido, F., Casillas, R., Navidad, M., De Pablo Macia, J.G., Peinado Moreno, M., Villaseca González, C., Pérez González, A. y Ruiz Arias, F. (2004a): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 532 (Las Navas del Marqués).* IGME, Madrid.

Bellido, F., Martín Parra, L.M., Del Olmo Sanz, A., Casquet Martín. C., Fuster Casas, J.M., Ruiz García, C. y Rodríguez Fernández, L.R. (2004b): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 533 (San Lorenzo de El Escorial).* IGME, Madrid.

Capote, R., González Casado, J.M. y Vicente Muñoz, G. de (1987): Análisis poblacional de la fracturación tardihercínica en el sector central del Sistema Central Ibérico. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 11: 305-311.

Capote, R., Martín González, F. y Tsige, M. (2000): Tectónica extensional en el Sistema Central: La Zona de Cizalla de Santa María de la Alameda (Madrid). *Geogaceta*, 28: 27-29.

Garzón, M.G. (1980): *Estudio geomorfológico de una transversal en la sierra de Gredos oriental (Sistema Central Español). Ensayo de una cartografía geomorfológica*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 425 p.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2004): *Ingeniería Geológica (2da. Ed)*. Prentice Hall Pearson Educación, Madrid, 750 p.

Pedraza, J. (1978): *Estudio geomorfológico de la zona de enlace entre las Sierras de Gredos y Guadarrama (Sistema Central Español)*. Tesis Doctoral Univ. Complutense de Madrid, 459 p.

Ciudad de Ouro Preto, Brasil: un patrimonio geológico, histórico y arquitectónico.

Ouro Preto city, Brazil: a geological, historical, and architectural heritage.

C. Santos[1], M.E.S. Souza[1], R.A. Marques[1], R.C.P. Santos[2], G.H.C. Melo[1], E.A. Areces[3].

1 Dpto. Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro - Bauxita, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. claudia.santos@ufop.edu.br meugenia@ufop.edu.br rodson.marques@ufop.edu.br gustavo.melo@ufop.edu.br
2 Dpto. Eng. de Minas, , Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro - Bauxita, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. rita.pedrosa@ufop.edu.br
3 Dpto. Recursos geológicos para la Transición Ecológica. Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), Madrid, C/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid. España. e.alvarez@igme.es

Palabras clave: arte colonial, geología, historia, Ouro Preto, Brasil.

Resumen

Ouro Preto, ubicado en el estado de Minas Gerais, Brasil, es Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, siendo conocido por su arquitectura colonial y su importancia histórica. Este reconocimiento está ligado al impacto duradero de la colonización europea durante el Ciclo del Oro de los siglos XVII y XVIII y la extracción de recursos minerales al estar ubicado en un sitio tectónico-metalogenético único, que forma parte de una de las provincias minerales más importantes a nivel mundial, concretamente el Cuadrángulo de Hierro. Este contexto tiene una historia geológica compleja que se extiende desde la era Arcaica hasta la Neoproterozoica. De la zona se extraen minerales convencionales (Au, Fe, Mn, U, Al, gemas, etc.) y rocas ornamentales como mármoles, cuarcitas y esteatitas. La ciudad de Ouro Preto presenta un rico patrimonio arquitectónico con un fascinante contraste entre el pasado y el presente. Este legado está ejemplificado por las obras barrocas y rococó Alejandrino (Pereira y Liccardo, 2010), una figura clave del arte colonial brasileño. La arquitectura y el arte colonial de la ciudad están elaborados a partir de rocas ornamentales locales, lo que la convierte en una combinación única de significado geológico e importancia histórica.

Abstract

Ouro Preto, located in the state of Minas Gerais, Brazil, is a UNESCO World Heritage Site known for its colonial architecture and historical significance. This recognition is tied to the lasting impact of European colonization during the 17th and 18th-century Gold Cycle and the extraction of mineral resources because it is located in a unique tectonic-metallogenetic site, which is part of one of the most significant mineral provinces globally, namely the Iron Quadrangle. This context has a complex geological history that extends from the Archean to the Neoproterozoic era. Conventional minerals (Au, Fe, Mn, U, Al, gems, etc) and ornamental rocks such as marbles, quartzites, and soapstones are extracted from the area. The city of Ouro Preto presents a rich architectural heritage with a fascinating contrast between the past and present. This heritage is exemplified by the Baroque and Rococo works of Aleijadinho (Pereira and Liccardo, 2010), a key figure in Brazilian colonial art. The city's colonial architecture and art are crafted from local ornamental rocks, making it a unique blend of geological significance and historical importance.

Referencias

Pereira, C.A. y Liccardo, A. (2010). Revista Patrimônio Geológico e Cultura 1, 1-2.

La piedra de las ruinas de la ermita de San Isidoro y San Pelayo (El Retiro, Madrid).

The stone of the ruins of the chapel of San Isidro and San Pelayo (El Retiro, Madrid).

D.Sanz-Arauz[1], S. López-Andrés[2], B. del Río-Calleja[3], M. Rodríguez-Escalante[4]

1 Dpto. Construcción y Tecnología Arquitectónicas, ETS. Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Juan de Herrera, 4. Madrid 28040. david.sanz.arauz@upm.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Novais, 12. Madrid.28040 antares@ucm.es
3 Investigadora independiente. beatriz.delrio@hotmail.com
4 Investigadora independiente. mariaroes1998@gmail.com

Resumen: Las ruinas de la ermita de San Isidoro y San Pelayo fueron trasladas al parque del Retiro desde Ávila a finales del siglo XIX, con el objetivo de su conservación. La *piedra Caleño* es el principal material de construcción. Esta piedra se caracteriza por su proceso de formación geológica, dando lugar a tres variedades: blanca, ocre y roja. Las condiciones ambientales y la presión antrópica a la que está sometida el monumento deterioran su estado de conservación y aceleran el ya avanzado deterioro, produciéndose una segunda alteración en el material. En este estudio se caracterizan cinco muestras usando un enfoque multidisciplinar, combinando las técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica polarizada (MOP) y microscopía de barrido electrónico con microanálisis (MEB-EDX) y analizando sus constantes físicas mediante la determinación de su densidad aparente (ρb), coeficiente de absorción (CA) y porosidad abierta (po) mediante balanza hidrostática. Los datos obtenidos de la caracterización permiten un mayor conocimiento del material de construcción de la Ermita, contribuyendo al entendimiento, prevención y conservación de este monumento singular, proporcionando un conocimiento profundo de la piedra.

Palabras clave: Silcreta de La Colilla, Piedra Caleño, alteración de la piedra.

Abstract: *The ruins of the Chapel of San Isidoro and San Pelayo were relocated to the Retiro Park from Avila at the end of the 19th century, with the aim of preserving them. Caleño Stone is the main construction material. This Stone is characterized by its geological formation process, resulting in three varieties: white, ochre and red. The environmental conditions and the anthropic pressure to with the monument is subjected deteriorate its state of conservation and accelerate the already advance decay, producing a second alteration in the material. Five samples are characterized using a multidisciplinary approach, combining the techniques of X-ray diffraction (XRD), polarized optical microscopy (POM) and scanning electron microscopy with microanalysis (SEM-EDX). Also, physical constants are analysed by determinating their bulk density (ρb), absorption coefficient (AC) and open porosity (po) using hydrostatic balance. The data obtained from the characterization allow a greater knowledge of the building material of the Chapel, contributing to the understanding, prevention and conservation of this unique monument, providing a deep knowledge of the stone.*

Key words: *La Colilla silcrete, Caleño Stone, Stone decay*

INTRODUCCIÓN

Las ruinas de la ermita de San Isidoro y San Pelayo, situadas en el Parque de El Retiro en Madrid (Fig. 1), forman parte una antigua ermita extramuros de Ávila que fue adquirida por Estado a finales del siglo XIX con la intención de conservar sus restos en el Museo Arqueológico, por motivos de índole práctica acabó montándose en el parque de El Retiro (Tejeira, 2014 y de la Fuente, 2009).

El proceso de alteración geológica previo a la talla de sillares está ampliamente descrito en la bibliografía (García Talegón et al., 2016) y consta de las siguientes fases: una fisuración de la base granítica por causas tectónicas regionales, a favor de la cual se produce una primera alteración de los feldespatos (feldespato potásico y plagioclasa) y de las micas en arcillas ─fundamentalmente caolinita, aunque también illita, esmectita y montmorillonita (García et al., 1994). Esta transformación deja hierro libre (probablemente procedente de la biotita) que en una segunda etapa de alteración se oxida y se hidrata formando goethita, producto expansivo que favorece el aumento de la porosidad de la roca. En una tercera fase la sílice de las arcillas se solubiliza, en un proceso de silicificación por causas hidrotermales o bacterianas y precipita en forma de ópalo con morfología en escamas (Giménez et al., 2008).

Este proceso da lugar a un gradiente de tonalidad observable en las canteras originales en la localidad cercana a Ávila de La Colilla, con tres variedades de piedra: blanca, ocre y roja (Giménez et al., 2013).

En el monumento se observan las tres variedades de piedra, con predominio de la ocre con distinto estado de degradación (Sedano et al., 2021). Las diferencias de conservación son más acusadas dependiendo de la situación de los sillares, ya sea en zonas bajas y expuestas a los agentes erosivos y al rozamiento, o en zonas altas sin protección. Las principales lesiones observadas son la pérdida de material, la presencia de costras oscuras, hongos y líquenes, vegetación y la erosión antrópica.



FIGURA 1. *Portada de las ruinas de la ermita de San Isidoro y San Pelayo en el parque del Retiro, Madrid.*

Las condiciones ambientales en las que se encuentra el monumento han producido en el periodo histórico una alteración secundaria, caracterizada desde el punto de vista químico o mineralógico por la presencia de sales, como barita y yeso, restos orgánicos y contaminantes de diversa índole. Además, el monumento sufre una fuerte presión antrópica reflejada principalmente en pintadas. Las malas condiciones de partida de la piedra, así como el avanzado estado de deterioro hacen que fuera especialmente vulnerable a la degradación por causas mecánicas como roces o apoyos de personas que se acercaban al monumento. En la actualidad (Fig. 1), el monumento está protegido por una pequeña valla y se ha eliminado el césped y arbolado que lo rodeaba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se han tomado cinco muestras de piedra en las ruinas de El Retiro, todas ellas procedentes de la zona exterior del monumento, tomadas en el ábside y en la portada (Tabla I).

Muestra	Color	Zona de Muestreo
SI-1	Blanca	Zona de umbría del ábside. Muy alterada
SI-2	Ocre oscuro	Ábside. Alterada con restos vegetales
SI-3	Roja	Ábside
SI-6	Blanca	Portada
SI-8	Ocre claro	Portada

TABLA I. *Muestras utilizadas para la elaboración del estudio.*

De estas muestras, en el laboratorio en el examen previo de visu, se dedujo que las muestras SI-1 y la SI-6 correspondían a la misma variedad pétrea: Piedra Caleño blanca, en distinto estado de alteración y que lo mismo sucedía con las muestras SI-2 y SI-8, que en este caso era Piedra Caleño ocre y que SI-3 era la Piedra Caleño blanca.

Para la caracterización química, mineralógica y morfológica de las muestras se han realizado los análisis y ensayos utilizando las técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica polarizada (MOP) y microscopía de barrido electrónico con microanálisis (MEB-EDX).

Adicionalmente, se estudian las constantes físicas de las muestras, mediante ensayos para determinar su densidad aparente, su coeficiente de absorción y porosidad abierta mediante balanza hidrostática.

El equipo empleado para la obtención de los datos de la difracción de rayos X es un difractómetro Bruker modelo D8 ADVANCE. Los diagramas de difracción de polvo desorientado se han obtenido en un intervalo angular de 2 a 65º, un tamaño de paso de 0,02º y un tiempo por paso de un segundo. El análisis mineralógico y determinación de las proporciones relativas de cada fase (análisis semicuantitativo) se ha realizado siguiendo el método de Chung (1975) y utilizando el software EVA 13.0 de Bruker.

El análisis petrográfico mediante microscopía óptica de polarización se ha realizado con un equipo ZEISS Axiolab 5 con captación de imágenes mediante la cámara Axiocam 208 Color.

Para la caracterización morfológica y química de las muestras se ha empleado la microscopía electrónica de barrido (SEM), realizada con un equipo JEOL JSM-820 operando a 20Kv y equipado con detector de rayos X de energía dispersiva para microanálisis (EDX). El software que utiliza el equipo para la adquisición, tratamiento y evaluación de los análisis es el EDX Oxford ISIS-Link La escala de trabajo comprende aumentos que van desde 10-20 a 300000 aumentos en condiciones ideales. Las muestras se han preparado en ‘’corte fresco’’ y se han recubierto con oro (metalizadora Cressington 108 auto) para asegurar una buena conductividad ante el haz de electrones.

La determinación de densidad aparente y porosidad abierta se realiza siguiendo el protocolo determinado por la norma UNE-EN 1936. La densidad aparente (ρ_b [kg/m^3]) es la relación entre la masa de la probeta seca y su volumen aparente, delimitado por la superficie externa de la probeta, incluyendo cualquier hueco. Para su obtención se pesa la probeta en seco y se satura con agua en un recipiente de vacío para eliminar el aire contenido en los poros. Posteriormente se pesan bajo el agua en una balanza hidrostática. La porosidad abierta (p_o [%]) es la relación entre el volumen de poros abiertos y el volumen aparente de la probeta. El coeficiente de absorción de agua por capilaridad (AC) se obtiene siguiendo la norma UNE-EN 15801. Es la pendiente de la parte lineal de la curva obtenida en la representación de la variación de la pasa por unidad de superficie en función de la raíz

cuadrada del tiempo (curva de capilaridad), calculada por regresión lineal.

Los ensayos se han realizado en el Centro de Apoyo a la Investigación de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid y en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. La relación de los ensayos y las muestras sobre las que se realizaron se recogen en la Tabla II.

Muestra	DRX	MOP	MEB -EDX	Constantes físicas*
SI-1	X			X
SI-2	X	X	X	X
SI-3	X	X	X	X
SI-6	X	X	X	X
SI-8	X			X

TABLA II. *Análisis y Ensayos realizados sobre las muestras para su caracterización. *Densidad aparente, coeficiente de absorción y porosidad abierta mediante balanza hidrostática.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis mineralógico (Fig. 2) muestra una composición de las piedras del monumento que concuerda con lo descrito para la Piedra Caleño en la bibliografía, con la adición de minerales de neoformación, como son yeso, barita y calcita. En general, se trata de rocas silicatadas granudas y muy porosas, compuestas por una matriz arcillosa, mayoritariamente de caolinita y ópalo con un cierto grado de cristalinidad.

En la Tabla III se recoge la semicuantificación de las fases minerales identificadas en las muestras estudiadas.

% Fases minerales	SI-1	SI-2	SI-3	SI-6	SI-8
Cuarzo	35	34	13	11	24
Filosilicatos	41*	44**	59**	64**	56*
Ópalo	6	10	12	10	8
Goethita	7	5	5	5	3
Zeolita	8	7	9	8	7
Yeso	3	-	2	2	2

TABLA III. *Identificación mineralógica y semicuantificación expresada en porcentajes. *Solo carolinita. **Caolinita y Mica*

Se distinguen tres tipos de piedra por el color exterior: blanca, roja y ocre que no se corrobora mediante la identificación mediante DRX ya que muestran una mineralogía similar, con diferencias porcentuales de escasa relevancia. Los minerales identificados en los tres tipos son: cuarzo, filosilicatos (solo caolinita en SI-1 y SI-8 y caolinita y mica en SI-2, SI-3 y SI-6), ópalo, zeolita, goethita y yeso. En la Fig. 2 se muestran los difractogramas de las muestras de las cinco muestras estudiadas.

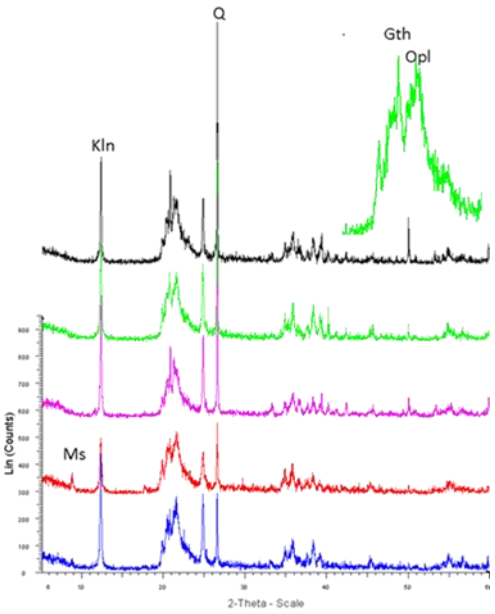


FIGURA 2. *Difractogramas de las cinco muestras. SI-1 rosa; SI-2 negro; SI-3 azul; SI-6 rojo y SI-8 verde. Ms = Moscovita/Illita; Kln Caolinita); Gth = Goethita; Opl = Ópalo; Q= Cuarzo.*

En las observaciones realizadas mediante MOP y SEM-EDX en lámina delgada y mediante SEM-EDX en fractura de los tres tipos de piedra, SI-2, SI-3 y SI-6 se ha detectado la presencia de minerales de alteración primarios como ópalo, caolinita, goethita (Fig. 3) y secundarios o de neoformación como yeso, calcita y barita (Fig. 4). Algunos de estos minerales tienen un efecto expansivo, lo que provoca una disgregación en el interior de la piedra, produciendo un aumento de la porosidad, en especial el ópalo, la goethita y las sales.

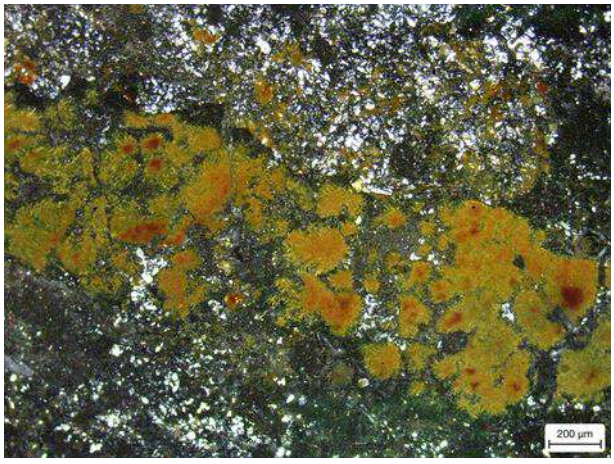


FIGURA 3. *Imagen MOP con nicoles cruzados y una magnificación de 50x de la muestra SI-8 en la que se aprecia los distintos minerales de alteración, caolinita y goethita principalmente.*

Mediante MEB-EDX en fractura se ha observado la presencia de minerales de alteración primarios como ópalo, caolinita, goethita y secundarios o de neoformación como yeso, calcita y barita (Fig. 4). Algunos de estos minerales tienen un efecto expansivo, lo que provoca disgregación interior y aumento de la porosidad, en especial el ópalo, la goethita y las sales.

Además, la abundante presencia de la caolinita da al conjunto baja cohesión mecánica.

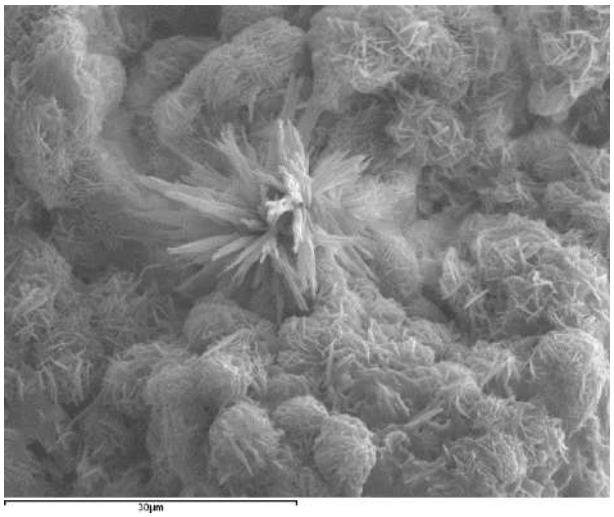


FIGURA 4. *Imagen MEB con Electrones Secundarios con una magnificación 2000x de la muestra SI-2 en la que se aprecia una sal disruptiva en la parte central de la imagen identificada como barita en una zona alterada de granos de cuarzo tapizados por ópalo con textura expandida.*

El proceso de alteración más importante observado es la pérdida de material en diversas situaciones de exposición, debido a la incorporación de agua (zonas altas no protegidas, capilaridad, o humedad generalizada por el riego asociado a los jardines) a favor de la alta porosidad y el elevado coeficiente de absorción (en la piedra ocre, la más abundante, se ha determinado un valor medio del entorno del 8%, diez veces más que un granito poroso. El agua que entra facilita la formación de los minerales de alteración secundaria, y debido a la matriz arcillosa el agua permanece en el interior de la piedra –en especial en las zonas de umbría–, concretamente adsorbida en las arcillas plastificando la matriz y por lo tanto debilitando la ya de por sí poco cohesiva roca.

En esa situación de debilidad, cualquier pequeño roce da lugar a la pérdida de material, sobre todo en zonas bajas, expuestas a la acción humana, o por ciclos de entumecimiento o gelifracción. Conviene indicar que el paso del tiempo, en el emplazamiento actual está degenerando la roca respecto a sus valores de alteración, medidos en piedra Caleño tomada en cantera o en monumentos de Ávila (Tabla IV).

Piedra	Coeficiente de absorción [%]	Densidad aparente [g/cm^3]	Porosidad accesible al agua [%]
Blanca – Retiro	11 – 24	1,7 – 1,5	18,5 – 36,3
Blanca – Ávila	8,3	1,9	9,2
Ocre – Retiro	6,2 – 6,7	1,8	11,5 – 12,3
Ocre – Ávila	11,8	1,8	11,5
Roja – Retiro	9,0	1,6	14,8
Rojo - Ávila	7,9	2	9,9

TABLA IV. *Comparativa de propiedades físicas entre piedras de Ávila (García-Talegón et al, 2016) y Madrid.*

CONCLUSIONES

Se identifica la piedra de construcción de la ermita de San Isidoro y San Pelayo como Piedra Caleño, una roca silicatada compuesta por una matriz arcillosa. Se encuentran las tres variedades de la piedra en el monumento: blanca (SI-1, SI-6), ocre (SI-2 y SI-8) y roja (SI-3). El emplazamiento del monumento, con una alta humedad, procesos de hielo-deshielo y exposición a la acción humana han producido un alto grado de degradación y alteración en la piedra, manifestándose en alteraciones químicas y mineralógicas, encontrándose minerales de neoformación como yeso, calcita y barita; y en un aumento del coeficiente de absorción (CA) y de la porosidad abierta, debilitando el material.

AGRADECIMIENTOS

La caracterización de los materiales se ha realizado en la Unidad de Técnicas Geológicas (CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueomería, UCM) Este trabajo se ha financiado mediante fondos propios del Grupo de Investigación AIPA (Análisis e Intervención en Patrimonio Arquitectónico de la Universidad Politécnica de Madrid), en el marco del acuerdo de colaboración con el Ayuntamiento de Madrid y por el Grupo de Investigación Técnicas Cristalográficas y Geológicas. Aplicaciones no convencionales de la UCM.

REFERENCIAS

de la Fuente Cobos, J. (2009): San Isidoro de Ávila. Románico: *Revista de arte de amigos del románico (AdR)*, 8: 71-75.

García Talegón, J., et al. (2016): Silicified Granites (Bleeding Stone and Ochre Granite) as Global Heritage Stone Resources from Ávila, Central Spain. *Geoscience Canada*, 43: 53-62.

García Talegón, J., Iñigo, A. C., Hernández, V., Vargas-Muñoz, M., Pérez Rodríguez, J. L., & Molina Ballesteros, E. (1994): Granitos empleados en Ávila-España. I. Composición química de las distintas variedades.

Giménez, R. G., de la Villa Mencía, R. V., de Soto García, I. S., y Arribas, J. C. (2013): Alteration processes of historical granitic rock found in Avila, spain. *Mediterranean Archaeology & Archaeometry*, 13:1.

Giménez, R. G., de la Villa Mencía, R. V. V., Fernández, V. R., & ARRIBAS, J. C. (2008): Lixiviación de granitos históricos. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 9: 109.

Sedano Espejo, E., Mackinlay, P., Sanz-Arauz, D., Sanchez Aparicio, M., & Sanchez Aparicio, L. J. (2021): Use of geographical information system approaches for the diagnosis of San Isidoro ruins (Madrid, Spain). *ISPRS.*

Tejeira Pablos, M. D. (2014): La conservación de San Isidoro de Ávila y su frustrada reconstrucción en el Museo Arqueológico Nacional. *Atrio. Revista de Historia del Arte*, 20: 170-1.

La fachada de la Catedral de Murcia y sus canteras de extracción.

The façade of the Murcia Cathedral and its extraction quarries.

Y. Spairani-Berrio[1], M. Galiana Agulló[2], J. Martínez Martínez[3], J.C. Cañaveras Jiménez[4], B. Soler Huertas[5], J.A. Huesca-Tortosa[1], J. Granados González[2].

1 Dpto. de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Alicante, Carretera de San Vicente del Raspeig, s/n, 03690 San Vicente del Raspeig. yolanda.spairani@ua.es; ja.huesca@ua.es
2 Escuela politécnica superior UCAM, Av. de los Jerónimos, 135, Guadalupe de Maciascoque. mgaliana@ucam.edu; jgranados@ucam.edu
3 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España. javier.martinez@igme.es
4 Dpto. de ciencias de la tierra y del medio ambiente. Universidad de Alicante, Carretera de San Vicente del Raspeig, s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Spain. jc.canaveras@ua.es
5 Arqueóloga. bsoler@um.es

Palabras clave: Mayayo, Cuello de Tinajas, Abanilla, canteras históricas,

Resumen

Las actuaciones en el patrimonio edificado requieren de estudios previos a la redacción del proyecto de restauración que aporten la mayor información posible sobre el edificio, pero además se deben hacer ensayos y estudios en pétreos semejantes a los del edificio para evaluar la idoneidad de los posibles tratamientos de conservación a aplicar sobre los materiales. Para ello se han localizado las canteras de extracción de los materiales empleados en la Catedral de Murcia. La fachada se ha ejecutado principalmente con tres tipos de pétreos. Se han caracterizado las muestras tomadas en el propio edificio y tras indagar las fuentes documentales (Hernández Albaladejo, 1990) se ha procedido a prospectar varias canteras antiguas en el entorno cercano a la ciudad. Los resultados obtenidos han permitido ubicar tres canteras de extracción. El pétreo de color gris oscuro con vetas blancas empleado en el zócalo se trata de mármol calcítico mesocristalino. Las Coordenadas UTM de la cantera son: 667915,441(X), 4214448,292(Y),85,64(Z). Este lugar situado al norte de la ciudad se conoce como "Cuello de Tinajas". El pétreo de color blanco que conforma principalmente la fachada es una calcarenita. Las Coordenadas UTM de la cantera situada en Abanilla son: 673160(X), 4233087(Y). El tercer pétreo que conforma la hoja interior de la fachada es una calcarenita mal seleccionada. Este pétreo de color beige se extrajo de la cantera de "Mayayo" al sur de la ciudad. Se geolocaliza en: 659249,38(X), 4197792,561(Y), 160,818(Z).

Abstract

Interventions in the built heritage require studies prior to drafting the restoration project that provide as much information as possible about the building, but tests and studies must also be carried out to evaluate the suitability of the possible conservation treatments to be applied to the materials. For all this, it is necessary to locate the quarries for the extraction of the materials used in the construction of the Murcia Cathedral. The façade has been executed mainly with three types of stone. The samples taken in the building itself have been characterized and after investigating the documentary sources (Hernández Albaladejo, 1990) several ancient quarries in the area close to the city have been prospected. The results obtained have allowed three extraction quarries to be located. The dark gray stone with white veins used in the plinth is mesocrystalline calcitic marble. The UTM Coordinates of the quarry are: 667915.441(X), 4214448.292(Y),85.64(Z). This place located north of the city is known as "Cuello de Tinajas". The white stone that mainly makes up the façade is calcarenite. The quarry located in Abanilla: 673160(X), 4233087(Y). The third stone that makes up the interior sheet of the façade is a poorly selected calcarenite. This beige stone was extracted from the "Mayayo" quarry south of the city. It is geolocated at (UTM coordinates): 659249.38(X), 4197792.561(Y), 160.818(Z).

Referencias

Hernández Albaladejo, E., (1990). *La fachada de la Catedral de Murcia*, Murcia. A.C.M., G-123 A.

Estudio de los procesos de cristalización de sales en el Arco de Jamete de la Catedral de Santa María de Cuenca (España).

Study of salt crystallization processes in Jamete's Arch in the Cathedral of Santa María of Cuenca (Spain).

E. Torrero[1], D. Sanz[2], F. Castilla[1], J. Martínez-Martínez[3]

1 Dpto. Ingeniería Civil y de la Edificación. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Campus Universitario s/n. 16071 Cuenca. David.sanz@uclm.es Enrique.Torrero@uclm.es
2 Dpto. Ingeniería Geológica y Minera. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Campus Universitario s/n. 16071 Cuenca. David.sanz@uclm.es
3 Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. javier.martinez@igme.es

Palabras clave: Sales higroscópicas, cambio de fase, presión de cristalización, variables ambientales.

Resumen

El arco de Jamete es una obra de referencia del renacimiento español, que se encuentra presente en la Catedral de Santa María de Cuenca. Este elemento arquitectónico fue incorporado en 2021 dentro la lista roja de "*Hispania nostra*" como monumento en riesgo debido a un proceso de cristalización de sales en la piedra que lo compone. Desde entonces un equipo multidisciplinar del CN IGME-CSIC y de la UCLM se encuentra analizando el proceso de deterioro intentando establecer un diagnóstico real de la problemática. Por un lado, se ha establecido una zonación mineral en el monumento de sales higroscópicas de sulfato magnésico (epsomita-kieserita) y sulfato sódico (mirabilita-thenardita) (Martínez-Martínez et al., 2023). Por otro lado, se realizó un estudio micro-ambiental y de vulnerabilidad de la piedra del monumento (Castilla et al., 2024). En este trabajo se analizan los procesos de cristalización de dichas sales mediante cálculos termodinámicos en función de la humedad relativa, los cambios de temperatura y las variaciones de las presiones de cristalización que se producen en los cambios de fase de las sales higroscópicas.

Abstract

The Jamete arch is a reference work of the Spanish Renaissance, which is present in the Cathedral of Santa María de Cuenca. This architectural element was incorporated in 2021 into the "*Hispania nostra*" red list as a monument at risk due to a salt weathering process in the stone that composes it. Since then, a multidisciplinary team from IGME-CSIC and UCLM has been analyzing the deterioration process, trying to establish a real diagnosis of the problem. On the one hand, a mineral zonation has been established in the monument of hydrated salts of magnesium sulfate (epsomite-kieserite) and sodium sulfate (mirabilite-thenardite) (Martínez-Martínez et al., 2023). On the other hand, a microenvironmental and vulnerability study of the stone of the monument was carried out (Castilla et al., 2024). In this work, the crystallization processes of these salts are analyzed through thermodynamic calculations based on the decrease in relative humidity, changes in temperature and variations in crystallization pressures that occur in the phase changes of hydrated salts.

Referencias

Martínez-Martínez, J., Torrero, E. T., Sanz, D., & Castilla, J.F. (2023). Zonación en las eflorescencias salinas del Arco de Jamete de la catedral de Santa María de Cuenca. Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, (27), 95-96.

Castilla F.J., Adán-Oliver A., Ramón-Constantí A., Martínez-Martínez J., Sanz D., Torrero E., Quintana B. (2024) Multivariate monitoring approach to characterize erosion rates in historical buildings: case study of Jamete's Arch in the Cathedral of Cuenca (Spain). REHABEND: Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management May 07-10, 2024. Gijon, Spain.

La Pedra Cabaleira: caracterización de una piedra de construcción vernácula en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel.

Pedra Cabaleira: characterisation of a vernacular building stone within the Courel Mountains UNESCO Global Geopark.

L. Trigos[1], M. Gomez-Heras[1], D. Ballesteros[2,3] y R. Vila[2,4].

1 Dpto. Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid, laura.trigos@uam.es
miguel.gomezheras@uam.es
2 Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel, 27320 Quiroga. info@ribeirasacracourel.es
3 Dpto. Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria, 39005 Santander.
ballesterosd@unican.es
4 Museo Xeolóxico de Quiroga, 27320 Quiroga. ramonvilaanca@gmail.com

Palabras clave: Piedra de construcción, caracterización mineralógica, caracterización petrofísica, construcción tradicional, patrimonio etnográfico.

Resumen

La *Pedra Cabaleira* es una de las singulares rocas de construcción histórica del valle del río Sil, empleada desde al menos el siglo XII para la construcción de edificios prominentes, así como para el tallado de esculturas en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel (Lugo). El objetivo principal de este trabajo es la caracterización de la *Pedra Cabaleira* mediante un estudio que engloba el análisis estratigráfico en campo, así como el análisis petrofísico, petrológico y mineralógico en laboratorio y la descripción de las formas de deterioro de este material en los edificios. Los afloramientos de esta roca incluyen tres facies claramente diferenciadas procedentes de sedimentos rojizos y litificados de abanicos aluviales neógenos: i) conglomerados con cantos cuarcíticos redondeados y matriz arenosa; ii) brechas de cantos angulosos cuarcíticos y pizarrosos; y iii) cuarzoarenitas. Cada una de estas facies se caracterizó por medio de microscopía óptica y electrónica, difracción de rayos X, así como con diversas técnicas para determinar sus propiedades mecánicas e hídricas. Este estudio pone en valor el patrimonio histórico asociado a la *Pedra Cabaleira* y permite conocer las características físicas y mineralógicas de esta roca. Así, se proporciona información sobre los factores intrínsecos que contribuyen a los procesos de alteración y deterioro de este material, proponiendo pautas para su conservación. Este enfoque permite conectar la geología con el patrimonio cultural en el Geoparque de las Montañas do Courel.

Abstract

The Pedra Cabaleira is one of the unique historical building stones in the valley of the Sil River, used since at least the 12th century for the construction of prominent buildings, as well as for sculptures in the UNESCO Global Geopark Montañas do Courel (Lugo). The main aim of this work is the characterization of the Pedra Cabaleira through a study that includes stratigraphic analysis in the field, as well as petrophysical, petrological, and mineralogical analysis in the laboratory, and the description of the forms of deterioration of this material in buildings. The outcrops of this rock include three distinctive facies derived from lithified reddish sediments of Neogene alluvial fans: i) conglomerates with rounded quartzite pebbles and sandy matrix, ii) breccias of angular quartzite and slate pebbles, and iii) quartz-arenites. Each of these facies was characterized by means of optical and electron microscopy, X-ray diffraction, as well as various techniques to determine their mechanical and hydric properties. This study contributes to the knowledge of the historical heritage associated with the Pedra Cabaleira and allows understanding the physical and mineralogical characteristics of this rock. Thus, information is provided on the intrinsic factors that contribute to its alteration and deterioration processes, proposing guidelines for its conservation. This approach allows connecting geology with cultural heritage in the Geopark of the Montañas do Courel.

Temperatura subterránea de la ciudad de Murcia. Usos potenciales para climatización con bomba de calor.

Groundwater temperature in the city of Murcia. Potential applications for heat pump air conditioning

M. Alcaraz[1], J. Hornero[2], F.J. Soto[3], T. Fernández[3] y J. Suardiaz[4]

1 Dpto. Ing. Minera y Civil, ETS de Ing. de Caminos, Canales y Puertos y de Ing. de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 52. 30203 Cartagena mar.alcaraz@upct.es
2 Instituto Geológico y Minero de España. Avda. Miguel de Cervantes, 45, 30009 Murcia j.hornero@igme.es
3 IES Juan Carlos I. C. Reina Sofía, 1, 30007 Murcia
4 Dpto de Automática, Ing. Eléctrica y Tecnología Electrónica, ETS de Ing. de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena.

Palabras clave: termogeología, sonda geotérmica, energía renovable.

Resumen

La falta de conocimiento sobre las posibilidades de la geotermia somera supone una barrera para la transición ecológica de las ciudades del sureste español. Por ello, el objetivo es de este trabajo es promover esta fuente alternativa de energía renovable, darla a conocer y extender su explotación en zonas de alta demanda energética, como núcleos urbanos o centros industriales, poniendo como ejemplo el caso de la ciudad de Murcia.

En el proceso de evaluación de este recurso subterráneo existente en Murcia, se han registrado las temperaturas del subsuelo, generándose un mapa de temperaturas del agua subterránea. Se han llevado a cabo dos campañas de campo, en verano e inverno (2023-2024), durante las cuales se ha registrado la temperatura del acuífero superior de la ciudad en 5 pozos disponibles. La temperatura registrada supera en todos los pozos la temperatura promedio anual en superficie, indicando un posible efecto de isla de calor en el subsuelo. Esto podría reducir la eficiencia de las bombas de calor en modo refrigeración.

Abstract

The lack of knowledge about the possibilities of shallow geothermal energy represents a barrier to the ecological transition of the cities of southeastern Spain. Therefore, the objective of this work is to promote this alternative source of renewable energy, make it known and extend its exploitation in areas of high energy demand, such as urban centers or industrial centers, using the case of the city of Murcia as an example.

In the process of evaluating this existing underground resource in Murcia, subsoil temperatures have been recorded, generating a map of groundwater temperatures. Two field campaigns have been carried out, in summer and winter (2023-2024), during which the temperature of the city's upper aquifer has been recorded in 5 available wells. The recorded temperature exceeds the average annual surface temperature in all wells, indicating a possible heat island effect in the subsoil. This could reduce the efficiency of heat pumps in cooling mode.

Estimación del potencial geotérmico del Acuífero Terciario de la Cuenca de Madrid mediante modelado geológico 3D.

Estimation of the geothermal potential of the Madrid Basin Tertiary Aquifer through 3D geological modelling.

J. Álvarez[1], V. Olgado[1] y A. Arnáiz[1]

1 Repsol Exploración. Méndez Álvaro, 44. 28045, Madrid, jalvarezga@repsol.com, mvolgadoa@repsol.com, aarnaizg@repsol.com

Resumen: El interés geotérmico del Acuífero Terciario en la Cuenca de Madrid fue identificado gracias a investigaciones realizadas por diversos organismos en las décadas de 1980 y 1990. A pesar de estos esfuerzos pioneros, existen escasas estimaciones detalladas de su potencial geotérmico. Las estimaciones existentes son simplificadas, utilizando valores unitarios para el espesor, porosidad y temperatura del acuífero. En este estudio, presentamos un flujo de trabajo que integra diversos datos del subsuelo en un modelo geológico 3D, representando la distribución espacial de los parámetros críticos que definen el potencial geotérmico del acuífero. La geometría y estructura del acuífero se determinan mediante la interpretación de perfiles sísmicos de reflexión, mientras que la distribución de litologías, porosidad y temperatura se define a partir de datos de sondeos preexistentes. Los resultados obtenidos al aplicar este flujo de trabajo en el modelo geológico 3D han permitido una evaluación cualitativa y cuantitativa del recurso geotérmico. Se han creado índices de favorabilidad y calculado el calor almacenado en el acuífero. Esta metodología proporciona una comprensión más profunda del potencial geotérmico y facilita la planificación de futuras investigaciones, priorizando las áreas más favorables, contribuyendo así a la eficiencia y al ahorro de costos.

Palabras clave: Cuenca de Madrid, Acuífero Terciario, potencial geotérmico, modelo geológico 3D.

Abstract: *The geothermal interest of the Tertiary Aquifer in the Madrid Basin was identified through research conducted by various organizations in the 1980s and 1990s. Despite these pioneering efforts, detailed estimates of its geothermal potential are scarce. Existing estimates are simplified, using unit values for the thickness, porosity, and temperature of the aquifer. In this study, we present a workflow that integrates various subsurface data into a 3D geological model, representing the spatial distribution of critical parameters defining the geothermal potential of the aquifer. The geometry and structure of the aquifer are determined through the interpretation of reflection seismic profiles, while the distribution of lithologies, porosity, and temperature is defined based on existing borehole data. The results obtained by applying this workflow to the 3D geological model have allowed for a qualitative and quantitative assessment of the geothermal resource. Favorability indices have been created, and the heat stored in the aquifer has been calculated. This methodology provides a deeper understanding of geothermal potential and facilitates the planning of future research by prioritizing favorable areas, thereby contributing to efficiency and cost savings in subsequent explorations.*

Key words: *Madrid Basin, Tertiary Aquifer, geothermal potential, 3D geological model.*

INTRODUCCIÓN

Dentro de la Cuenca de Madrid, la existencia de niveles de arenas y areniscas terciarias con potencial geotérmico explotable fue reconocida gracias a la perforación por SHELL en 1980 del sondeo de exploración petrolífera El Pradillo-1. La investigación geotérmica realizada en aquel primer sondeo (ENADIMSA, 1981), permitió la perforación e investigación del recurso en tres sondeos posteriores, Tres Cantos-1 (IGME, 1982), San Sebastián de los Reyes-1 (ENADIMSA, 1983) y Geomadrid-1 (SERMASA, 1991). Estas investigaciones, focalizadas en la zona noreste de la ciudad de Madrid, constataron la presencia de un nivel acuífero multicapa, formado por arenas y areniscas, con potencia, continuidad y características hidráulicas adecuadas para su aprovechamiento como recurso geotérmico. Desde entonces y, a pesar de contar con un volumen significativo de información del subsuelo, los últimos trabajos de síntesis y evaluación del potencial geotérmico del Acuífero Terciario no aportan mucha información sobre la posible extensión del recurso, la identificación de áreas más favorables o la cuantificación del calor almacenado en el mismo. Los trabajos previos sobre cuantificación del recurso geotérmico no tuvieron en cuenta como se distribuyen espacialmente las propiedades del acuífero como litología, porosidad y temperatura y, en su lugar, emplearon valores promedio de manera muy simplificada (IDAE, 2011). Por este

motivo se ha elaborado un nuevo modelo geológico 3D, basado en datos de subsuelo, que permite la evaluación detallada del potencial geotérmico tanto de manera cualitativa como cuantitativa.

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca de Madrid, ubicada en la cuenca hidrográfica del Tajo, tiene una geometría triangular delimitada principalmente por el Sistema Central, la Cadena Ibérica, la Sierra de Altomira y los Montes de Toledo (Fig.1). El principal relleno corresponde a sedimentos continentales de edad terciaria, si bien en su base aparece un conjunto de materiales de edad Cretácico Superior, formado por arenas y calizas. Los mayores espesores de sedimentos terciarios se disponen próximos a los cabalgamientos que definen el borde sur del Sistema Central, a lo largo de un eje NE-SW (De Vicente y Muñoz-Martín, 2013). Dentro del relleno Terciario se observa una clara diferenciación estratigráfica entre las zonas norte y sur de la cuenca (Alonso-Zarza *et al.*, 2004), siendo dominantes las facies detríticas en el norte y las facies evaporíticas en el sur, presentando un cambio de facies variable en profundidad.

MODELADO GEOLÓGICO 3D

El modelo geológico se ha realizado a partir de la interpretación sismo-estratigráfica de 71 perfiles sísmicos de reflexión correspondientes a 6 campañas sísmicas adquiridas entre los años 60 y 80 (Querol, 1989). Los datos sísmicos, originalmente preservados en formato analógico, han sido vectorizados a formato estándar SEGY, homogeneizados y reprocesados de manera digital previo a su interpretación. Se han interpretado 7 horizontes sísmicos cuya calibración y control geológico se ha apoyado en los datos disponibles de 7 sondeos en la zona. Tanto los registros de velocidad sísmica en sondeos, como las velocidades RMS de los perfiles sísmicos han sido utilizados para la conversión a profundidad de los horizontes sísmicos.

Una vez finalizada la interpretación estructural se decidieron los límites del modelo geológico 3D para incluir las zonas más adecuadas en función de las profundidades y espesor de la unidad acuífera. El área seleccionada abarca una extensión de 2800 km2 en la zona central de la cuenca. Para la construcción del modelo geológico 3D se ha utilizado un mallado con tamaño de celdas de 200 m de lado por 50 m de altura. Se han utilizado 5 superficies (topografía, techo del acuífero, base del acuífero, techo del Cretácico y techo del basamento). Dentro del modelo se han poblado propiedades de litología (facies más probables), temperatura, porosidad y profundidad del recurso.

La distribución de facies en el modelo se ha realizado mediante la integración de la interpretación de los registros geológicos de sondeos, la interpretación sísmica realizada y los diversos esquemas paleogeográficos publicados para la Cuenca de Madrid.

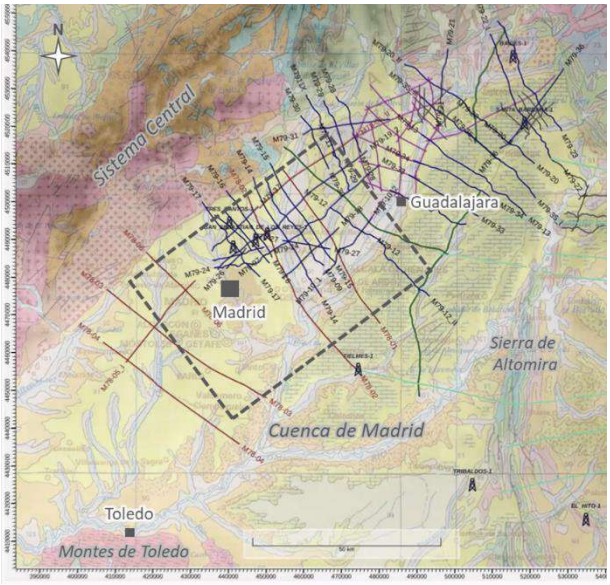


FIGURA 1. *Marco geológico, líneas sísmicas de reflexión y sondeos utilizados para elaborar el modelo geológico 3D. La extensión del modelo se indica mediante el área punteada en negro.*

Para la distribución de temperatura, se han analizado los datos térmicos disponibles en los sondeos. El análisis de la distribución de temperaturas de fondo de sondeo (corregidas por efecto de enfriamiento del lodo) en función de la profundidad, indica la presencia de un gradiente geotérmico normal, de unos 35 ºC/km, desde la superficie del terreno hasta la base de la unidad acuífera. A mayores profundidades, coincidente con una mayor abundancia de materiales arcillosos y evaporíticos de edad paleógena, se interpreta un gradiente anómalo, de unos 65 ºC/km, hasta llegar al basamento donde, en el sondeo El Pradillo-1, llegan a alcanzarse los 156 ºC (Fig.2).

Para la distribución de porosidad de la unidad acuífera, debido a la ausencia de diagrafías digitales de calidad para la mayoría de los sondeos geotérmicos, se ha trabajado con las interpretaciones petrofísicas disponibles en los informes de los sondeos e investigaciones previas. En el análisis de la distribución de la porosidad en función de la profundidad se observa una clara reducción de porosidad por compactación (Fig.3). De este modo, se ha calculado la función polinómica de mejor ajuste a los datos e incorporado al modelo geológico para estimar la porosidad más allá del área de influencia de los datos de sondeos. Para el resto de las unidades del modelo, tanto suprayacentes como infrayacentes a la unidad acuífera, se han utilizado valores tomados de la literatura correspondientes a las litologías identificadas previamente.

POTENCIAL GEOTÉRMICO

La evaluación del potencial geotérmico del Acuífero Terciario se ha llevado a cabo en dos etapas distintas: una fase preliminar cualitativa, donde se identifica el volumen de roca más propicio para la explotación geotérmica, y una fase cuantitativa posterior, centrada en calcular el calor almacenado en ese volumen de roca.

En la estimación cualitativa, se han analizado las propiedades de temperatura y porosidad del nivel acuífero, además de la profundidad de perforación requerida para acceder al recurso geotérmico. Este último aspecto es crucial para el desarrollo futuro del campo geotérmico, ya que influye significativamente en los costos de perforación. Para cada una de estas propiedades, que son continuas en el modelo, se han generado propiedades discretas de favorabilidad mediante la aplicación de criterios de corte y clasificación previamente definidos (Tabla I). Posteriormente, a través de análisis geoestadísticos y ponderación, se han combinado estas tres propiedades de favorabilidad en un modelo final que representa volúmenes de roca con mayor o menor potencial geotérmico según el análisis realizado (Fig.4). La zona de mayor potencial identificada en este análisis abarca un volumen de roca de aproximadamente 150 km³, con una temperatura y porosidad promedio de 74 °C y 18 %, respectivamente, y está situada a una profundidad promedio de 1750 m desde la superficie del terreno.

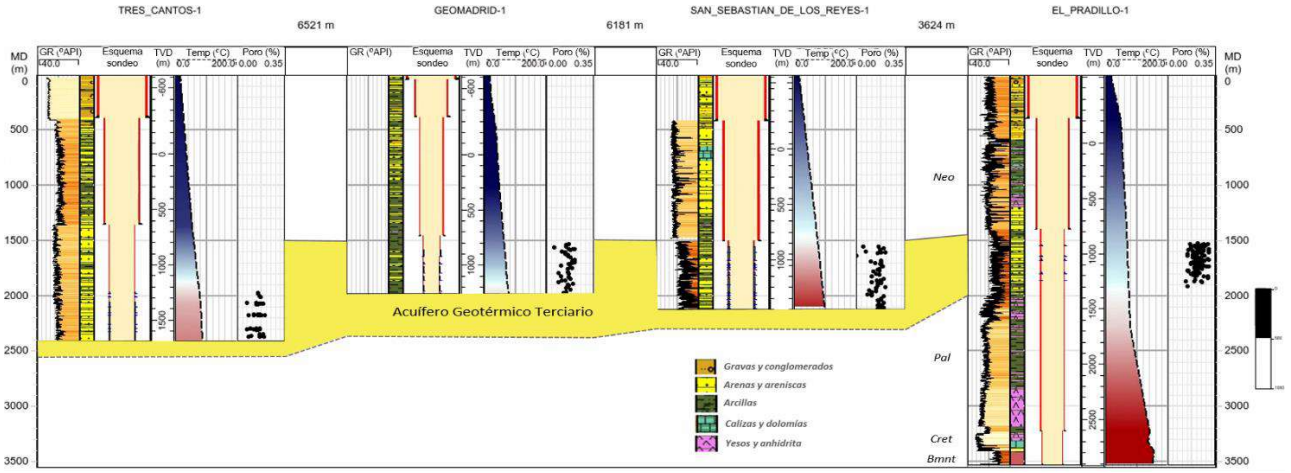


FIGURA 2. *Sección geológica con los sondeos de investigación geotérmica y petrolífera realizados en la Cuenca de Madrid. Se ha representado la diagrafía de rayos gamma (GR), la interpretación litológica de los sondeos, el esquema de entubado y ranurado, el registro de temperatura calculado y los datos de porosidad reportados en los informes de sondeo. La extensión del acuífero geotérmico se ha resaltado en color amarillo.*

En cuanto a la estimación cuantitativa del recurso, se ha empleado el método volumétrico (Muffler y Cataldi, 1978), que permite calcular el calor almacenado en un volumen de roca mediante un algoritmo implementado en el modelo geológico 3D. De esta manera, se estima que la energía térmica almacenada en la zona de mayor interés geotérmico es de aproximadamente $4{,}5e^{11}$ kJ. Es importante destacar que este valor supera significativamente la energía térmica consumida en la totalidad de la Comunidad de Madrid, estimada en unos $9{,}7e^{9}$ kJ (Comunidad de Madrid, 2021).

CONCLUSIONES

La integración de datos de subsuelo, procedentes de investigaciones geotérmicas previas, en un modelo geológico tridimensional ha permitido definir con precisión el volumen de roca más propicio y la cantidad de calor almacenado disponible para el aprovechamiento geotérmico del Acuífero Terciario de la Cuenca de Madrid. La metodología empleada y los resultados obtenidos brindan una comprensión detallada de este recurso geotérmico, facilitando la planificación de futuras investigaciones y contribuyendo significativamente a mejorar la eficiencia y reducir los costes de capital, factores cruciales en el desarrollo de esta fuente de energía renovable.

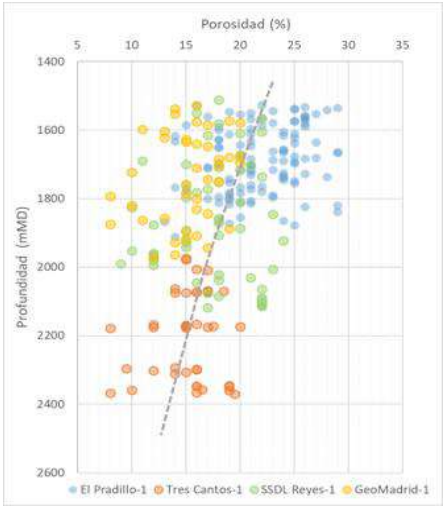


FIGURA 3. *Gráfico porosidad-profundidad. Datos obtenidos a partir de los sondeos de investigación geotérmica y petrolífera perforados en la Cuenca de Madrid. La línea punteada muestra la curva de mejor ajuste de los datos.*

Índice Favorabilidad	Profundidad (m)	Temperatura (°C)	Porosidad (%)
0	3000 < P < 4000	0 < T < 30	0 < φ < 10
1	2000 < P < 3000	30 < T < 70	10 < φ < 15
2	1000 < P < 2000	70 < T < 120	15 < φ < 25
3	0 < P < 1000	120 < T < 200	25 < φ < 35

TABLA I. *Criterios de corte y clasificación de favorabilidad para cada propiedad continua del modelo geológico.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Repsol Exploración S.A. Parte de la información utilizada procede del Sistema de Información Documental del CN Instituto Geológico y Minero de España.

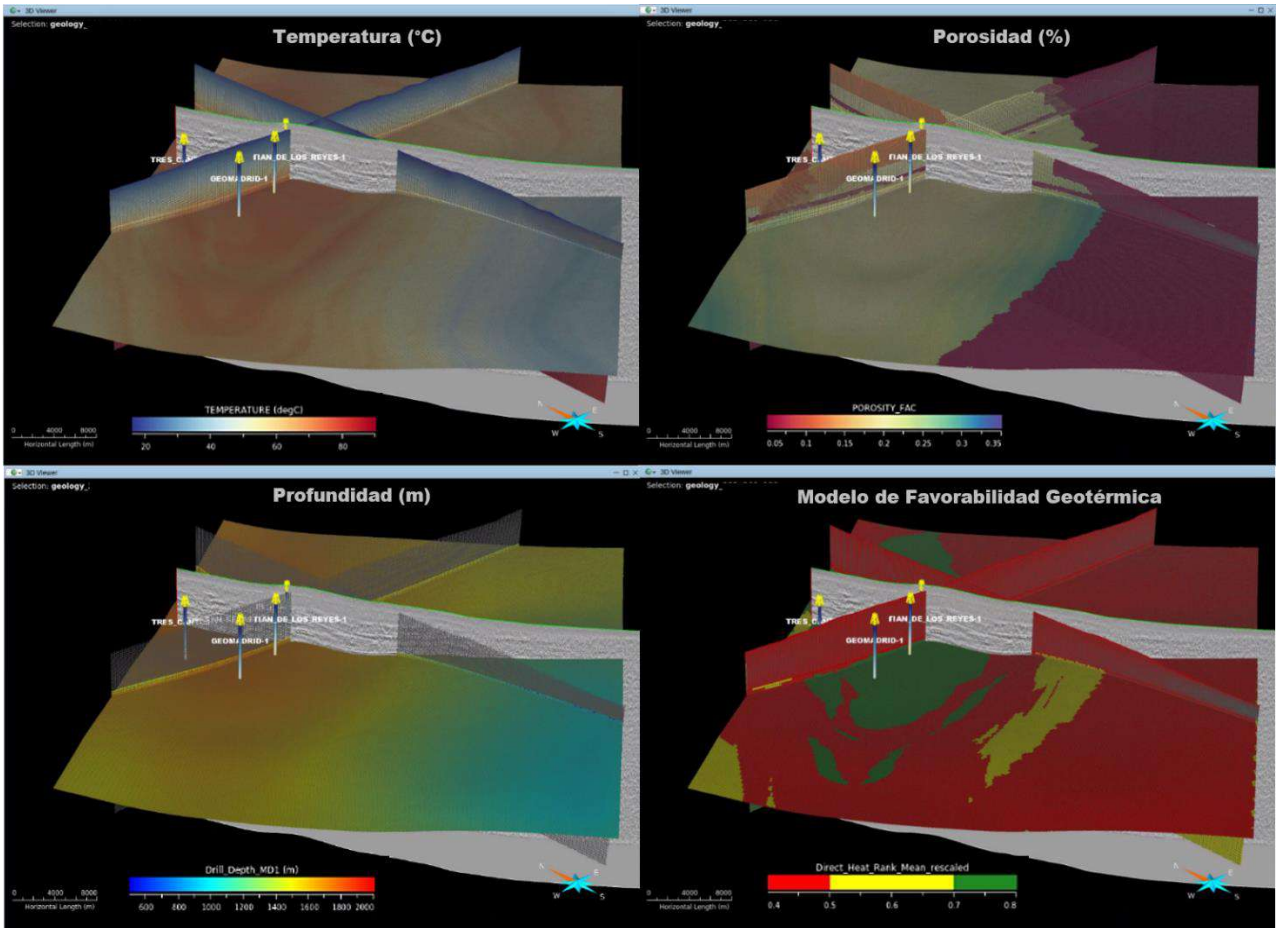


FIGURA 4. *Distribución continua de propiedades del nivel acuífero en el modelo geológico 3D (temperatura, porosidad y profundidad de perforación) y modelo de favorabilidad geotérmica final indicando el volumen de roca de mayor potencial geotérmico en color verde. Se han representado los cuatro sondeos disponibles con información geotérmica y un perfil sísmico de reflexión de referencia (M78-02).*

REFERENCIAS

Alonso-Zarza, A. M., Calvo, J. P., Silva, P. G. y Torres, T., (2004): Cuenca del Tajo. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, 556-561.

Comunidad de Madrid (2021): *Balance Energético 2021 de la Comunidad de Madrid*, 50 p.

De Vicente, G. y Muñoz-Martín, A. (2013): The Madrid Basin and the Central System: A tectonostratigraphic analysis from 2D seismic lines. *Tectonophysics*, 602: 259–285.

ENADIMSA (1981): *Estudio Geotérmico Cuenca de Madrid, Sondeo Pradillo-1. Estudio para el Plan Energético Nacional*. 223 p.

ENADIMSA (1983): *Informe Geotérmico San Sebastián de los Reyes. Informe Final. Estudio para el Plan Energético Nacional*. 150 p.

IDAE (2011): *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. 232 p.

IGME (1982): *Sondeo Geotérmico Tres Cantos. Informe Final*. 126 p.

Muffler, P. y Cataldi, R., (1978): Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* 7: (2-4), 53–89.

Querol, R., (1989): Geología del subsuelo de la Cuenca del Tajo. E.T.S.I. Minas de Madrid. Departamento de Ingeniería Geológica. 48 p.

SERMASA (1991): *Sondeo Geomadrid-1, Informe final. Tomo 1, Supervisión Técnica*. 115 p.

Creación de valor en proyectos geoenergéticos mediante la digitalización, procesado e interpretación de datos históricos de sísmica de reflexión: Ejemplos en la Cuenca de Madrid.

Value creation in geoenergy projects through digitalization, processing, and interpretation of vintage reflection seismic data: Examples in the Madrid Basin.

J. Álvarez[1], V. Olgado[1], C. Lupascu[2], O. Clauss[1] y A. Arnáiz[1]

1 Repsol Exploración. Méndez Álvaro, 44. 28045, Madrid, jalvarezga@repsol.com, mvolgadoa@repsol.com, oclauss@repsol.com, aarnaizg@repsol.com
2 Repsol Exploration. 2455 Technology Forest Blvd, The Woodlands, Texas 77381, constantin.lupascu@repsol.com

Resumen: El conocimiento detallado del subsuelo es crucial para el desarrollo sostenible de proyectos vinculados a la transición energética y la explotación de recursos naturales o geoestratégicos, como la geotermia o el almacenamiento geológico de dióxido de carbono. La exploración de hidrocarburos desarrollada en España durante las últimas décadas del pasado siglo impulsó notablemente el conocimiento geológico del subsuelo mediante la realización de sondeos exploratorios y campañas de sísmica de reflexión. Sin embargo, gran parte de esta información histórica aún se conserva en formato analógico, lo que limita su reprocesado e interpretación mediante técnicas digitales disponibles en la actualidad. La Cuenca de Madrid tiene un destacado potencial tanto para el desarrollo de proyectos geotérmicos, como de almacenamiento geoestratégico. Este trabajo revela los resultados obtenidos al aplicar un innovador flujo de trabajo basado en la digitalización y procesamiento de líneas históricas de sísmica de reflexión realizadas en la Cuenca de Madrid, disponibles inicialmente en formato analógico (papel o film). Gracias a la conversión y tratamiento digital de los datos, se ha logrado una mejora significativa en la información sísmica, posibilitando interpretaciones detalladas de la estructura y las facies del relleno sedimentario de la cuenca.

Palabras clave: Cuenca de Madrid, geotermia, sísmica de reflexión, digitalización, procesado sísmico**.**

Abstract: *Detailed subsurface knowledge is crucial for the sustainable development of projects related to energy transition and the exploitation of natural or geostrategic resources, such as geothermal energy or geologic carbon sequestration. Hydrocarbon exploration held in Spain during the last decades of the past century significantly advanced the geological understanding of the subsurface through exploratory drilling and reflection seismic campaigns. However, much of this historical information is still preserved in analog format, limiting its reprocessing and interpretation using currently available digital techniques. The Madrid Basin has prominent potential for both geothermal projects and geostrategic storage. This work presents the results of applying an innovative workflow involving the digitalization and processing of vintage reflection seismic lines conducted in the Madrid Basin, initially available in analog format (paper or film). Through the conversion and digital treatment of the data, a significant improvement in seismic information has been achieved, enabling detailed interpretations of the structure and facies of the basin`s sedimentary fill.*

Key words*: Madrid Basin, geothermal, reflection seismic, digitalization, seismic processing.*

INTRODUCCIÓN

La descarbonización del sector energético es un objetivo global que requiere el desarrollo de nuevas tecnologías para la captura y almacenamiento de carbono, el almacenamiento de energía en el subsuelo y la energía geotérmica. Los requisitos de calidad de datos e información utilizados tanto por empresas y organismos de investigación, así como por los reguladores del sector, deben garantizar que se puedan tomar decisiones efectivas con respecto a la explotación de los recursos energéticos y la seguridad de las actividades a realizar. Los datos de subsuelo, en particular los estudios de sísmica de reflexión y los datos de sondeos, son vitales para que los geocientíficos e ingenieros realicen evaluaciones exhaustivas de las oportunidades y riesgos asociados con este tipo de soluciones energéticas.

La capacidad de crear modelos precisos del subsuelo depende de que los datos sean representativos del área de interés en cuanto a su cantidad, calidad y distribución espacial. Pero el coste de adquirir nuevos datos sísmicos de reflexión suele ser elevado y únicamente justificable ante la inexistencia de datos previos o cuando la densidad y calidad de estos no permite lograr el objetivo deseado (estimar un volumen del recurso energético, determinar riesgos geológicos, planificar una nueva perforación, etc.). En ocasiones, el registro de una nueva campaña sísmica en una zona determinada se hace inviable debido a limitaciones de acceso o por nueva normativa específica que restringe la actividad.

De este modo, para acometer un estudio de viabilidad de un nuevo proyecto, se hace preciso la evaluación exhaustiva de cualquier dato sísmico previo que esté disponible. Habitualmente, este tipo de datos históricos suelen estar almacenados en formato analógico como papel o film y no es posible su procesamiento e interpretación mediante las herramientas digitales disponibles en la actualidad. Por tanto, se hace necesaria su conversión al formato digital estándar SEG-Y previo a su carga en computadora donde, utilizando técnicas modernas de procesamiento, se puede mejorar significativamente la relación señal-ruido de las líneas sísmicas, la calidad del dato y de su interpretación.

DATOS Y METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se han recopilado 71 secciones de sísmica de reflexión procedentes de 6 campañas diferentes adquiridas en la Cuenca de Madrid entre los años 1960 y 1980. Los detalles técnicos de las campañas, la estimación de calidad de los datos y la interpretación integrada de los mismos ha quedado recogida en numerosos trabajos (Racero, 1988; Querol, 1989; Querol, 1990). La mayoría de las secciones presentan un procesado original de tipo *stack*, sin migración, estando disponibles como imagen TIF procedente del escaneo de las secciones analógicas originales en formato papel.

En la actualidad, existen diversos métodos tanto comerciales, como de código abierto, para realizar la conversión de secciones sísmicas escaneadas en archivos estándar SEG-Y que permitan su posterior tratamiento digital (Sopher, 2018).

El flujo de trabajo desarrollado en este estudio comenzó con la captura de las trazas sísmicas y la navegación de las líneas sísmicas (Fig. 1). Posteriormente, se realizó un proceso de acondicionamiento de la imagen sísmica para eliminar las líneas de tiempo, alteraciones por pliegues en el papel y dibujos de interpretaciones preexistentes. A continuación, se realizó la conversión a formato digital SEG-Y y su procesamiento inicial mediante diversos métodos estándar de trabajo como el filtrado de frecuencias, la deconvolución, el balanceo de amplitudes y la normalización.

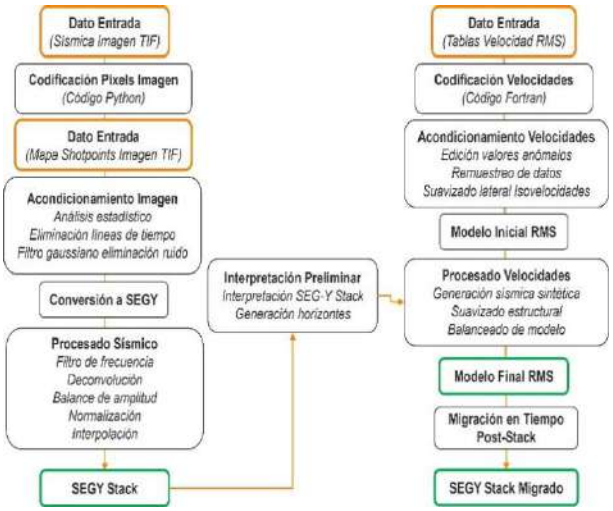


FIGURA 1. *Flujograma empleado en la digitalización y reprocesado de las secciones sísmicas disponibles en formato analógico en la Cuenca de Madrid. Las cajas de color naranja indican los datos de entrada y las cajas de color verde los productos digitales generados.*

De esta manera, se obtuvieron secciones SEG-Y stack, que ya suponían una evidente mejora sobre el dato analógico original. Se realizó una interpretación preliminar de las secciones SEG-Y stack, calibrada con la información disponible de sondeos mediante la realización de sismogramas sintéticos. Los horizontes sísmicos generados en esta etapa se utilizaron para asistir el procesado de las velocidades sísmicas procedentes del dato original. Para el tratamiento de velocidades sísmicas, se capturaron los pares tiempo-velocidad reportados en las secciones analógicas. Tras un proceso inicial de control de calidad y acondicionamiento del dato, se realizó su procesamiento incluyendo los horizontes sísmicos previamente interpretados. De esta manera, se generó un modelo final de velocidades RMS para el conjunto de los datos. Una vez obtenido el campo de velocidad final, se procedió a realizar la migración post-stack de los datos mediante el algoritmo de migración de Kirchhoff. Como producto final del proceso, se obtuvieron las secciones SEG-Y stack migradas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio, se han seleccionado dos ejemplos (Figs. 2 y 3) que creemos representan de manera clara los beneficios y el aporte de valor de aplicar esta metodología de trabajo.

En el primer ejemplo (Fig. 2), se ha seleccionado la sección sísmica M-7920, adquirida en 1979 (Shell España N. V., 1979), sobre la estructura anticlinal de Santa Bárbara (Shell España N. V., 1982). Esta estructura actualmente es utilizada como almacenamiento subterráneo de gas. Como puede observarse en la figura, la calidad del dato original es aceptable, aunque se



FIGURA 2. *Resultados obtenidos en la sección sísmica M-7920, registrada sobre la estructura Santa Bárbara. La secuencia de imágenes compara la sección original escaneada de la izquierda, con la sección SEG-Y stack vectorizada inicial, en el centro y la sección SEG-Y migrada post-stack de la derecha. La migración post-stack consigue una mejora significativa en la resolución de los reflectores sísmicos, la definición del plano de falla y la geometría de la estructura.*

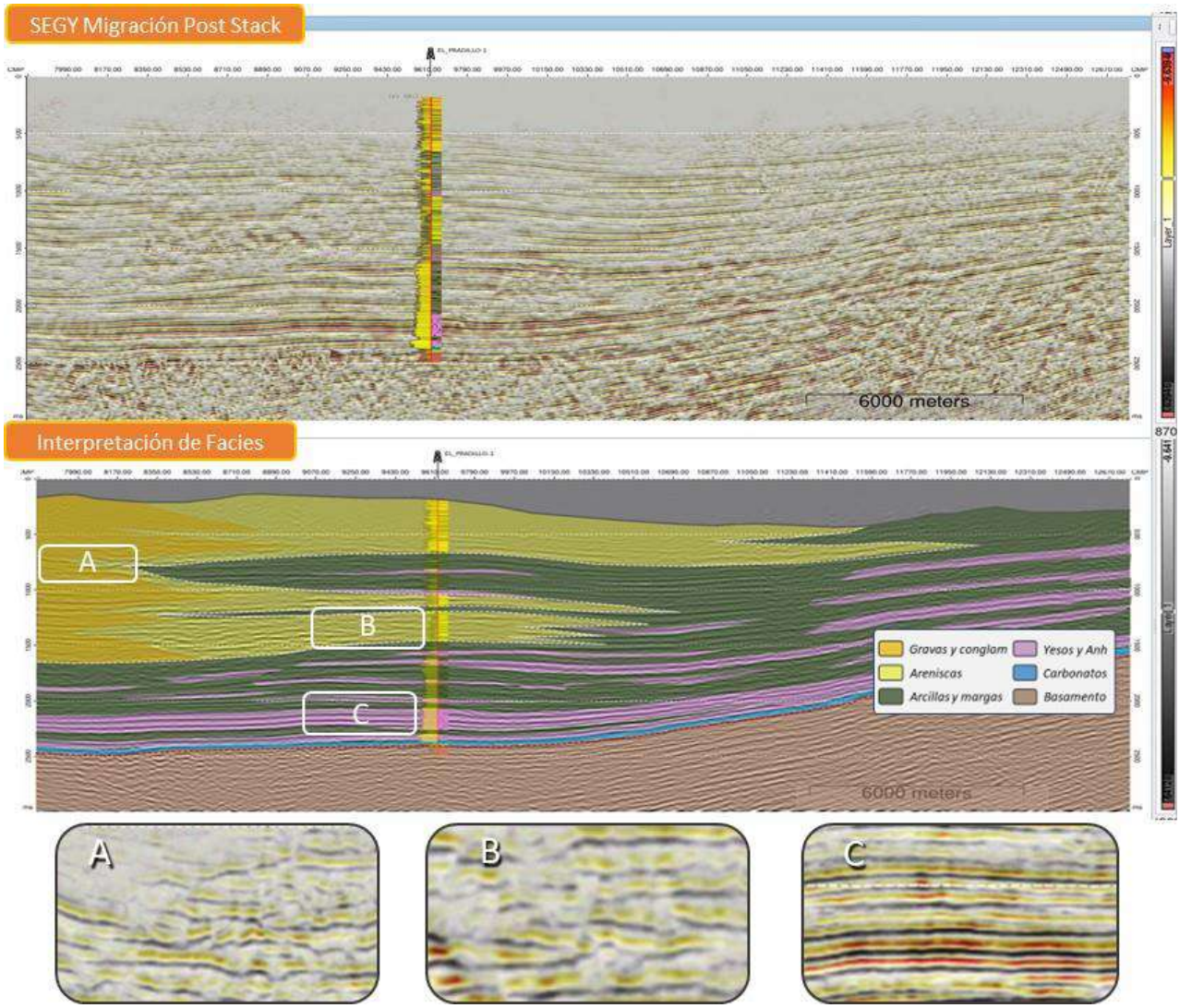


FIGURA 3. *Resultados obtenidos en la sección sísmica M-7802. Panel superior: Sección SEG-Y migrada post-stack y control geológico del sondeo El Pradillo-1 con digrafía de Rayos Gamma (GR). Panel inferior: Modelo de facies y ejemplos de interpretación en base a la sísmica reprocesada. A) Facies proximales de abanico aluvial, caracterizada por reflectores inclinados transicionando a depósitos caóticos interpretados como gravas y conglomerados. B) Reflectores discontinuos y amalgamados de amplitud variable interpretados como canales arenosos. C) Reflectores plano-paralelos de alta continuidad y amplitud interpretados como depósitos evaporíticos.*

aprecian oscurecimientos y alteraciones en la imagen, debido al estado de la sección en papel. La sección SEG-Y stack inicial reproduce fielmente, en formato digital, la sección original, consiguiendo eliminar en gran medida los artefactos presentes en la misma. El resultado de la mejora mediante la migración post-stack es visible en la imagen derecha de la figura. Aunque los reflectores someros están más atenuados que en la sección no migrada, las estructuras profundas, como el cabalgamiento principal, aparecen mejor definidas. Mediante el proceso de migración se ha conseguido eliminar gran parte de la energía difractada y otros artefactos, alcanzando una mejor resolución y reposicionamiento de eventos en el subsuelo. En este caso, el valor añadido por la digitalización y reprocesado sísmico tiene un impacto directo en la resolución geométrica de la estructura. De esta manera, por ejemplo, se pueden acometer con menor incertidumbre estudios cinemáticos, geomecánicos y volumétricos de la misma.

En el segundo ejemplo seleccionado (Fig. 3), se muestran los resultados obtenidos en la sección sísmica M-7802, adquirida en 1978 por la compañía Shell. Sobre esta sección se posicionó y ejecutó la perforación del sondeo El Pradillo-1 (Shell España N. V., 1981). Si bien el sondeo no encontró hidrocarburos, estudios posteriores confirmaron la existencia de un nivel acuífero detrítico con potencial para su aprovechamiento geotérmico (ENADIMSA, 1981). La sección sísmica migrada y su calibración con el sondeo El Pradillo-1, ha permitido trabajar con las técnicas actuales de interpretación como el cálculo de atributos sísmicos y el análisis de facies sísmicas. El dato digital reprocesado ha habilitado la descripción detallada de la configuración interna y las terminaciones de cada grupo de reflectores sísmicos, definiendo con menor incertidumbre las diferentes litologías, secuencias deposicionales y cambios laterales de facies del relleno sedimentario de la cuenca (Fig.3). En este segundo ejemplo, el valor añadido resultante de aplicar esta metodología de trabajo radica en una mejor delimitación de los tramos de arenas y areniscas que constituyen el acuífero geotérmico de la Cuenca de Madrid, lo que, a su vez, tiene un impacto positivo en la realización de modelos geológicos más precisos sobre el potencial geotérmico de esta región.

La evolución del registro sedimentario y distribución de facies de la Cuenca de Madrid y su evolución tectono-estratigráfica ha sido tradicionalmente descrita en trabajos de síntesis e integración de datos geológicos de superficie y de subsuelo (Alonso-Zarza *et al.*, 2004; De Vicente y Muñoz-Martín, 2013). Estos trabajos de síntesis regional, en los aspectos referentes al subsuelo, se han fundamentado en las secciones sísmicas originales, en su mayoría en formato stack, obtenidas mediante técnicas y algoritmos de procesamiento antiguos. La digitalización y reprocesado de estos mismos datos supone un salto de calidad y detalle, necesarios en el desarrollo actual de proyectos geológicos relacionados con la gestión de los recursos del subsuelo y la transición energética.

CONCLUSIONES

El flujo de trabajo realizado ha permitido actualizar y mejorar una fuente de información de indudable valor para el conocimiento del subsuelo como son las secciones sísmicas de reflexión disponibles en formato analógico. La secuencia de procesamiento aplicada mejoró significativamente la relación señal-ruido en las secciones sísmicas históricas disponibles en la Cuenca de Madrid. Se aplicaron pasos adicionales para aumentar aún más la relación señal/ruido y reposicionar eventos sísmicos mediante migración post-stack. Este nuevo conjunto de datos permite realizar interpretaciones geológicas más detalladas, contribuyendo a la reducción de incertidumbre geológica y la mitigación de riesgos, generando valor añadido en la evaluación de nuevos proyectos geoenergéticos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por Repsol Exploración S.A. Agradecemos el permiso obtenido para la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS

Alonso-Zarza, A. M., Calvo, J. P., Silva, P. G. y Torres, T., (2004): Cuenca del Tajo. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, 556-561.

De Vicente, G. y Muñoz-Martín, A. (2013): The Madrid Basin and the Central System: A tectonostratigraphic analysis from 2D seismic lines. *Tectonophysics*, 602: 259–285.

ENADIMSA, (1981): *Estudio Geotérmico Cuenca de Madrid, Sondeo Pradillo-1. Estudio para el Plan Energético Nacional.* 223 p.

Querol, R., (1989): Geología del subsuelo de la Cuenca del Tajo. E.T.S.I. Minas de Madrid. Departamento de Ingeniería Geológica. 48 p.

Querol, R., (1990): Tomo III, Tajo, (Madrid – Depresión Intermedia). En: *Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España*, ITGE, 23 p.

Racero, A., (1988): Exploración petrolífera en la Cuenca del Tajo. Contribución a su conocimiento. En: *VII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia*, Oviedo, 7, 62-82.

Shell España, N.V., (1979): *Vibroseis Survey Madrid Basin. Party 134.03.56*. 38 p.

Shell España, N.V., (1981): *El Pradillo-1 Well Resume. Report S-949*. 69 p.

Shell España, N.V., (1982): *Santa Bárbara-1 Well Resume. Report S-1036.* 86 p.

Sopher, D. (2018): Converting scanned images of seismic reflection data into SEG-Y format. *Earth Science Informatics*, 11, 241.

Almacenamiento geológico de hidrógeno y aire comprimido: un recurso clave para la transición energética en España

Geological storage of hydrogen and compressed air: a key resource for the energy transition in Spain

P. Banda[1] y L. Valle[2]

1 Hidrógeno de Burgos, S.L., pbanda@h2burgos.com
2 Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid (ETSIME-UPM) lauramaria.valle@upm.es

Palabras clave: almacenamiento geológico, hidrógeno, aire comprimido

Resumen

Uno de los problemas para la integración de la generación de energía eólica o solar es el almacenamiento del excedente cuando la producción supera a la demanda (Albertus *et al*., 2020). Para evitar paradas de producción (curtailment), este excedente de energía se puede utilizar para generar hidrógeno por electrolisis o bien para comprimir aire para su almacenamiento. De tal forma que, cuando no hay viento o sol, tanto el hidrógeno como el aire comprimido almacenados se pueden utilizar como combustible para generar electricidad en turbinas. En ambos casos, el almacenamiento geológico ofrece importantes ventajas frente a otros sistemas, como es la capacidad de almacenar grandes volúmenes a altas presiones durante largos periodos de tiempo, sumado a la seguridad y eficiencia que proporcionan.

En España existen actualmente varias iniciativas y propuestas para desarrollar proyectos de almacenamiento geológico, especialmente de hidrógeno, tanto en antiguos yacimientos de gas natural (ej.: Marismas) como en almacenes estratégicos de gas existentes (ej.: Yela), minas de carbón abandonadas (ej.: Bierzo) o en nuevas instalaciones de almacenamiento, como la construcción de grandes cavernas en depósitos de sal (Valle *et al*., 2022).

En todos estos casos, el conocimiento y modelización del subsuelo y de la inyección y producción cíclica de gases son esenciales para el desarrollo de la tecnología necesaria en la transición energética.

Abstract

One of the issues for the integration of wind or solar power generation is the storage of the surplus when supply exceeds the demand (Albertus *et al*., 2020). To avoid curtailment, this surplus energy can be used to generate hydrogen by electrolysis or to compress air for their storage. In such a way that, when there is no wind or sun, both the stored hydrogen and compressed air can be used as fuel to generate electricity in turbines. In both cases, geological storage offers significant advantages over other systems, such as the ability to store large volumes at high pressures for extended periods of time, coupled with the safety and efficiency they provide.

In Spain, there are currently several initiatives and proposals to develop geological storage projects, especially for hydrogen, both in former natural gas fields (e.g., Marismas) as well as in existing strategic gas storage facilities (e.g., Yela), abandoned coal mines (e.g., Bierzo) or in new storage facilities, such as the construction of large caverns in salt deposits (Valle et al., 2022).

In all these cases, knowledge, and modeling of the subsurface and the cyclic injection and production of gases are essential for the development of technology necessary for the energy transition.

Referencias

Albertus, P., Manser, J.S. and Litzelman, S. (2020). *Joule*, doi: 10.1016/j.joule.2019.11.009

Valle-Falcones, L.M., Grima-Olmedo, C., Mazadiego-Martínez, L.F., Hurtado-Bezos, A., Eguilior-Díaz, S. and Rodríguez-Pons, R. (2022). *Applied Sciences*, 2022, 12, 6081.

Evaluación integral del impacto de las heterogeneidades sedimentarias en yacimientos para un almacenamiento sostenible de gas: un enfoque de modelado numérico utilizando análogos aflorantes

Integrated Assessment of Sedimentary Reservoir Heterogeneity Impact for Sustainable Gas Storage: A Numerical Modeling Approach using Outcrop Models

A. Blanco Pericana[1], P. Cabello[2], L.M. Yeste[3], Niklas Heinemann[4], R. Palomino[5], M.F. León[5], A. Martín-Monge[5], P. Olivier[5] y C. Viseras[3]

1 Repsol Technology Lab, Agustín de Bentancourt, S/N, 28935, Madrid, Spain. anabell.blanco@repsol.com
2 Dpto. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, Spain. pcabello@ub.edu
3 Sedimentary Reservoir Workgroup (SEDREGROUP). Dpto. Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada, Spain. lmyeste@ugr.es, viseras@ugr.es
4 School of Geosciences, University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3FE, UK. n.heinemann@ed.ac.uk
5 Repsol Exploración S.A., Méndez Álvaro, 44, 28045, Madrid, Spain. rpalominod@repsol.com, mf.leon@repsol.com, martin.monge.antonio@repsol.com, pierre.olivier@repsol.com

Palabras clave: heterogeneidad sedimentaria; captura y almacenamiento de CO2; almacenamiento de H_2 verde, simulación numérica, inyectividad de gases

Resumen

La captura y almacenamiento de CO2 e H2 son esenciales para reducir las emisiones y promover una economía baja en carbono. Las heterogeneidades en los yacimientos afectan la inyección y el flujo de estos gases, exigiendo su evaluación para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de su almacenamiento. Esta investigación se enmarca dentro del proyecto SOSGAS, coordinado entre la Universidad de Granada y la Universidad de Barcelona (PID2022-140850OB-C21 y PID2022-140850OB-C22, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por "FEDER Una manera de hacer Europa"), y centrado en caracterizar heterogeneidades sedimentarias y su impacto en el flujo de CO_2 e H_2 en el subsuelo. El presente trabajo muestra los resultados preliminares de la simulación numérica de un análogo del proyecto SOSGAS. El análogo es un aflorante fluvial de alta sinuosidad situado en el Triásico de capas rojas de la Meseta Ibérica (TIBEM), del cual se ha construido un modelo geológico 3D de alta resolución basado en descripciones sedimentológicas, datos y modelos digitales del afloramiento. Las simulaciones de flujo usan datos sintéticos con el fin de evaluar el impacto de las variables dinámicas en la inyección y almacenamiento de estos fluidos. El objetivo es identificar los parámetros que tienen mayor impacto en este tipo de modelos y definir un plan de adquisición de datos dinámicos para reducir las incertidumbres.

Abstract

The capture and storage of CO2 and H2 are essential to reduce emissions and promote a low-carbon economy. Heterogeneities in the reservoirs affect the injection and flow of these gases, demanding their assessment to ensure the viability and sustainability of gas storage. This research is framed within the SOSGAS project at the University of Granada and the University of Barcelona (PID2022-140850OB-C21 and PID2022-140850OB-C22 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ and by "ERDF A way of making Europe") and focused in addressing sedimentological heterogeneities and their impact in the subsurface flow of CO_2 and H_2. Herein, we present the preliminary results of the dynamic simulation of one of the analogs studied as part of the SOSGAS project. This analog is a highly-sinuous fluvial outcrop located in the Triassic red bed succession of the Iberian Meseta (TIBEM), for which a high-resolution 3D geological model has been generated based on sedimentological descriptions, data and digital outcrop models. Flow simulations use synthetic data to assess the impact of dynamic variables on the injection and storage of these fluids. The goal is to identify the parameters that have the greatest impact on this type of models and to define a plan for acquiring dynamic data to reduce uncertainties.

Atlas Europeo de Potencial de Geoenergías Sostenibles: una prioridad del Servicio Geológico para Europa (GSEU)

Pan-European Atlas for Sustainable Geo-Energy Capacities: a priority for the Geological Service for Europe (GSEU)

P. Canteli[1], I. Herms[2], E. C. Ramalho[3], J. Carvalho[3], G. Arnó[2], N. Caldera[2], J. García-Crespo[1], E. Carrión.[1,]

1 Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. España. paula.canteli@igme.es; garcia-crespo@igme.es; ey.carrion@igme.es
2 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Montjuïc s/n 08251, Barcelona. España. ignasi.herms@icgc.cat; georgina.arno@icgc.cat; norbert.caldera@icgc.cat
3 Laboratório Nacional de Energia e Geología I.P. Estrada da Portela, Zambujal, Apartado 7586, Alfragide 2610-999 Amadora, Portugal. elsa.ramalho@lneg.pt; joao.carvalho@lneg.pt

Palabras clave: GSEU, Atlas, Geotermia, Almacenamiento geológico.

Resumen

El proyecto europeo GSEU (Servicio Geológico para Europa, 2022-2027) respalda la visión del Pacto Verde Europeo a través del conocimiento del subsuelo y en particular, de las materias primas, la energía, el agua y todas las áreas relacionadas. El objetivo último del proyecto es establecer las bases de un Servicio Geológico para Europa a través de 48 servicios geológicos nacionales y regionales de 35 países europeos – EuroGeoSurveys –, y demostrar la capacidad del mismo. Uno de los resultados de este ambicioso proyecto será el denominado "Atlas Europeo del potencial de geoenergías sostenibles"; es decir, se construirá, por primera vez, un atlas continuo a escala europea, que incluirá mapas, bases de datos del potencial evaluado para el almacenamiento geológico (CO2, H2 y CAES); para los recursos geotérmicos profundos y someros; y almacenamiento subterráneo de energía térmica (frío y calor).

Abstract

The European project GSEU (Geological Survey for Europe, 2022-2027) supports the vision of the European Green Deal through improving and sharing subsurface knowledge on raw materials, energy, groundwater, and all related areas. The ultimate goal of the project is to lay the foundations of a Geological Survey for Europe through 48 national and regional geological surveys of 35 European countries -EuroGeoSurveys – and to demonstrate its feasibility. One of the results of this ambitious project will be the so-called "European Atlas of Sustainable Geo-energy Capabilities", *i.e.* for the first time, a continuum atlas will be built at European scale, including maps, databases of assessed potential for geological storage (CO2, H2 and CAES); for deep and shallow geothermal resources; and underground thermal energy storage (heat and cold).

Referencias

Canteli, P., van Gessel, S. Herms, I., (2023). *Mapping and Managing Sustainable GeoEnergy Capacities in Europe: Carbon Capture and Storage (Paula Canteli, IGME); Hydrogen Storage (Serge van Gessel, TNO, Geothermal Energy (Ignasi Herms, ICGC).* GSEU /EGS - Meet the GSEU webinar https://www.geologicalservice.eu/events/meet-the-gseu-webinar-wp3-geoenergy-resources

Herms, I., Canteli, P., Ramalho, E., Arnó, G., Garcia-Crespo, J., Carvalho, J., Colomer, M., Garcia de la Noceda, C., Caldeira, R., Marzán, I., de Santiago, C., Glotzl, G., Hladik, V., Nador, A., Steiner, C., Jirman, P., and Koevoets, M. (2023). *The future Pan-European Atlas for Sustainable Geo-Energy Capacities. The #GSEU project.*, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-15481, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15481.

Almacenamiento subterráneo de H_2 verde en yacimientos depletados de la Cuenca del Guadalquivir: Metodología de laboratorio

Underground green H_2 storage in depleted reservoirs in the Guadalquivir Basin: Laboratory Methodology

D. Chinchilla-Benavides[1], N. García-Mancha[2], S. Ledesma-Mateo[3], E. Berrezueta[1], JF. Mediato-Arribas[1], C. Yuste-Fernández[3], P. Mata-Campo[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, C/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid (España). d.chinchilla@igme.es
2 Centro Nacional del Hidrógeno, Prolongación Fernando el Santo, s/n, 13500 Puertollano, Ciudad Real (España)
3 Trinity Energy Storage. Edif. Arqborea – C/ Quintanadueñas, 6. 28050 Madrid (España)

Palabras clave: hidrógeno, almacenamiento subterráneo, metodología, laboratorio, ensayos.

Resumen

En este trabajo se presenta la metodología de laboratorio aplicada al estudio y caracterización de las formaciones geológicas seleccionadas para el almacenamiento subterráneo de H_2 verde. Este trabajo se encuadra dentro del Proyecto UNDERGY (UNDERground enerGY, Tecnologías para el desarrollo del almacenamiento estacional de energía renovable con hidrógeno verde integrado en una red inteligente). Se han seleccionado una serie de yacimientos de gas natural ya agotados de la cuenca del Guadalquivir, y con varios periodos de inyección que han demostrado sus excelentes cualidades como almacenamientos subterráneos de gas natural, para estudiar ahora su viabilidad como almacenes de hidrógeno. Para ello, uno de los objetivos del estudio es evaluar el comportamiento de estas formaciones geológicas en presencia de H_2, así como de la mezcla de H_2 con otros gases, bajo las condiciones de presión y temperatura del reservorio. El procedimiento de ensayos de laboratorio llevado a cabo se ha basado en metodologías de experimentación ampliamente aceptadas y recientemente publicadas (Miocic *et al.*, 2023). Se tomaron muestras representativas tanto en sondeos de exploración como en afloramientos, tanto de las unidades almacén como de las unidades de sello. Las técnicas de caracterización de las unidades incluyeron análisis geoquímicos de roca y agua de formación y petrofísica, mineralogía y petrología antes y después de la exposición de las muestras a H2.

Abstract

This work presents the laboratory methodology applied for the study and characterisation of the geological formations selected for the underground storage of green H_2. This work is part of the UNDERGY project (UNDERground enerGY Project, Technologies for the development of seasonal storage of renewable energy with green hydrogen integrated in a smart grid). A series of already depleted natural gas reservoirs in the Guadalquivir basin, with several injection periods that have demonstrated their excellent qualities as underground natural gas storages, have been selected to study their viability as hydrogen storage sites. For this purpose, one of the objectives of the study is to evaluate the behavior of these geological formations in the presence of H_2, as well as the mixture of H_2 with other gases, under the conditions of pressure and temperature of the reservoir. The laboratory test protocol carried out was based on widely accepted and recently published experimental methodologies (Miocic *et al.*, 2023). Representative samples were taken from both exploration boreholes and outcrops, from both reservoir storage units and seal units. Unit characterisation techniques included geochemical analysis of rock and formation water and petrophysics, mineralogy and petrology before and after exposure of samples to H_2.

Referencias

Miocic, J., Heinemann, N., Edlmann, K., Scafidi, J., Molaei, F., & Alcalde, J. (2023). *Underground hydrogen storage: a review*. Geological Society, London, Special Publications, 528(1), SP528-2022.

Mapa de conductividades térmicas a escala regional para geotermia somera considerando litología y profundidad del nivel freático. Estudio de la Comunidad Valenciana

Thermal conductivities map at a regional scale for shallow geothermal energy considering lithology and groundwater Depth. Case study in the Region of Valencia.

C. de Santiago[1], A. Ramos[2,3], H. Van den Berg[2], T. Magraner[2] y B. Badenes[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. C.desantiago@igme.es
2 ICT vs Climate Change research group - Instituto de Aplicaciones de las Comunicaciones Avanzadas (ITACA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N, 46022 Valencia, Spain. hevaden@topo.upv.es; borbaba@upv.es; mmagbe@upv.es
3 Departamento de Física aplicada y tecnología naval. Grupo de materiales avanzados para la producción y almacenamiento de energía. Universidad Politécnica de Cartagena. Pza. del Cronista Isidoro Valverde. Edif. La Milagrosa C.P. 30202 Cartagena. adela.ramos@upct.es

Resumen: Este artículo presenta un enfoque innovador en el desarrollo de mapas de conductividad térmica considerando la influencia del nivel freático. Utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), se detalla una metodología para evaluar la conductividad térmica efectiva hasta una profundidad de 150 metros, integrando los diferentes estados de saturación del suelo por la presencia de agua subterránea. Los resultados de la Comunidad Valenciana demuestran cómo las conductividades térmicas varían con la presencia y profundidad del agua subterránea. Se pretende a continuación integrar este mapa de conductividades térmicas en una herramienta de dimensionado geotérmico basada en SIG que permita estimaciones más precisas y específicas según la ubicación, como la capacidad geotérmica potencial, la profundidad de perforación necesaria y los costos asociados, haciendo la tecnología geotérmica más accesible.

Palabras clave: Mapa de conductividades térmicas, Potencial de geotermia somera, Herramienta GIS

Abstract: *This article presents an innovative approach to developing thermal conductivity maps, considering the influence of the water table. Using Geographic Information Systems (GIS), a methodology is detailed for assessing effective thermal conductivity down to a depth of 150 meters, integrating the various soil saturation states due to the presence of groundwater. The results from the Region of Valencia demonstrate how thermal conductivities vary with the presence and depth of groundwater. The next step is to integrate this thermal conductivity map into a geothermal sizing tool based on GIS, allowing more precise and location-specific estimations, including potential geothermal capacity, required drilling depth, and associated costs, making geothermal technology more accessible.*

Key words: *Thermal conductivities map; Shallow geothermal potential; GIS-based tool,*

INTRODUCCIÓN: LA GEOTERMIA EN LA LUCHA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO.

Durante la última Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático COP28, celebrada en Dubái en diciembre de 2023, se alcanzó un acuerdo para acelerar la reducción de las emisiones con vistas a alcanzar las cero emisiones netas en 2050. Este compromiso, conocido como "Green Deal", incluye un acuerdo para abandonar el uso de combustibles fósiles y reducir las emisiones mundiales en un 43 % de aquí a 2030.

Antes de esta conferencia, la UE se comprometió a reducir sus emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % antes de 2030. El paquete de medidas «Objetivo 55» tiene como finalidad la puesta a punto de todos los sectores de la economía de la UE para que puedan conseguir el mencionado objetivo. Entre las medidas se encuentran dos Directivas cruciales como son la Directiva de energías renovables (2018) y la Directiva de eficiencia energética (2023).

De entre todos los posibles recursos renovables alternativos, la geotermia, definida como el calor almacenado bajo la superficie de la tierra, es una fuente de energía renovable, infinita, que permite generar electricidad, aprovechar directamente su calor, climatizar mediante bomba de calor e incluso almacenarlo en el terreno. Versátil y disponible para la transición energética de cualquier sector de la economía, la geotermia es la única fuente de energía que puede contribuir a la descarbonización de los sectores de la electricidad, la climatización y el transporte simultáneamente.

La geotermia somera utilizada en climatización mediante bomba de calor es una fuente competitiva, limpia, local y estable a largo plazo, disponible en todas partes, las 24 horas del día, los 365 días del año. Debido a su alta eficiencia, la capacidad de sinergia con otras fuentes de energía renovable y su potencial para una alta producción de refrigeración renovable, la geotermia somera es un componente clave en la estrategia europea para la calefacción y refrigeración renovables, según lo establecido en la "Agenda Estratégica de Investigación e

Innovación (SRIA)" (RHC-ETIP, 2022). Además, la UE en su plan "REPowerEU", ha priorizado recientemente la integración de la energía geotérmica en los edificios para reducir la dependencia de Europa de los combustibles fósiles rusos. Sin embargo, el crecimiento de la cuota de mercado de la geotermia somera se ve obstaculizado por diversas barreras, como la falta de un marco legislativo, la escasez de personal capacitado, la conciencia limitada y la poca visibilidad de la tecnología.

EL PAPEL DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICO.

Los recursos geotérmicos de muy baja temperatura contenidos en las rocas del subsuelo pueden ser extraídos y utilizados mediante el uso de bomba de calor. El diseño correcto y ajustado de un sistema de climatización geotérmico requiere del conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales geológicos que componen el subsuelo: Conductividad térmica, capacidad y difusividad térmicas. De entre ellas, sin duda, la conductividad térmica ( ) es el parámetro más importante y se define como la capacidad intrínseca (independiente de la cantidad de masa) de transferir el calor a través del material como consecuencia de un gradiente térmico.

Los valores de conductividad térmica asignados a cada unidad geológica pueden obtenerse mediante diferentes métodos: el método más riguroso y exacto, es el ensayo "*in situ*" denominado TRT (Thermal Response Test). Este ensayo, ejecutado sobre un sondeo experimental, permite determinar la conductividad térmica efectiva de la totalidad del sondeo (λ_{ef}), junto con otros parámetros importantes como la temperatura inicial del terreno inalterado (T_0) y la resistencia térmica del sondeo (R_b). Posteriormente el mismo sondeo puede ser utilizado para extracción de calor. Estos ensayos suelen ser caros debido a su duración y al coste de la perforación, por lo que en los estudios preliminares de diseño de instalaciones se suelen utilizar estimaciones más sencillas y económicas. Una opción consiste en tomar muestras de afloramientos o testigos de sondeos representativos de las unidades cartografiadas y realizar ensayos de determinación de conductividad térmica en laboratorio, mediante alguna de las técnicas aceptadas en comunidad científica. A continuación, se asignan valores de conductividad térmica a las diferentes unidades litoestratigráficas del mapa, convirtiendo así un mapa litoestratigráfico en un mapa de conductividades térmicas.

Por último, la opción más rápida, sencilla y económica, consiste en asignar a cada litología un valor de conductividad térmica de entre un rango de valores publicado en diferentes normas geotérmicas, como la alemana (VDI 4640, 2010), la suiza (SIA, 2010) y la española (UNE 100715,2014). Estos valores sirven de guía para una primera estimación del potencial del terreno, pero después antes de elaborar el proyecto de la instalación se debe realizar el ensayo TRT mencionado.

Cuando se toman valores de conductividad térmica de la literatura científica y/o las normas geotérmicas publicadas, es importante considerar que esta propiedad depende de factores geológicos cuya variación provoca aumentos o disminución del valor final obtenido. Estos factores son, principalmente la composición mineralógica del material, la temperatura natural, la densidad o porosidad del material y su grado de saturación (Farouki, 1986). Existen numerosas publicaciones estudiando esta dependencia y la correlación entre los factores indicados.

En cuanto a trabajos previos realizados de mapas de conductividad térmica, cabe destacar el mapa de conductividades térmicas a nivel nacional de Cataluña (Marzan et al., 2015) y la Región de Murcia (Ramos-Escudero, a., 2021), y a nivel europeo (Ramos-Escudero et al., 2020). En el primer y el tercer mapa mencionado no se tuvo en cuenta la presencia de agua. En el segundo caso se tuvo constancia, pero difiere del presente trabajo en la forma en que se interpoló para obtener la capa del nivel freático.

METODOLOGÍA: CONSIDERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA.

Tradicionalmente, los trabajos geotérmicos con los que se han construido mapas de conductividades térmica a partir de datos publicados en la literatura, por simplicidad, han considerado una densidad estándar y un estado seco (ausencia total de agua en los poros). De esta forma los valores resultantes se encuentran siempre en el lado más pesimista y conservador del rango de valores.

Los autores de este trabajo, conscientes del papel crucial que juega la presencia del agua en el comportamiento térmico de los materiales geológicos, han realizado el ejercicio de determinar y cuantificar la importancia relativa del porcentaje de terreno que se encuentra por debajo del nivel freático (estado saturado) en la determinación de la conductividad térmica efectiva del total de profundidad estudiado (150 m.), a escala regional en la Comunidad Valenciana.

Para ello, se ha partido del Mapa litoestratigráfico y de permeabilidades de España, 1:200.000, realizado por el IGME, dentro del "Convenio para la realización de trabajos técnicos en relación con la aplicación de la Directiva Marco del Agua, en materia de aguas subterráneas". El mapa se ha recortado empleando como máscara la delimitación de la Comunidad Valenciana, zona de estudio en este caso.

Paralelamente se ha accedido a la red de seguimiento piezométrico gestionada por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD), que contiene series históricas de medidas de 275 piezómetros georreferenciados en la Comunidad de Valenciana.

Los piezómetros estudiados han permitido realizar un promedio de la profundidad del nivel freático de los 20 últimos años. Estos valores promedio de profundidad del agua subterránea georreferenciados han sido interpolados para construir una superficie continua *ráste*r, con resolución espacial de 200 metros para toda la zona de estudio, teniendo en cuenta las zonas en las que hay presencia de masas de agua. Las masas de agua en España se definieron a partir de la Directiva Marco del Agua del año 2000 y han sido objeto de planificación y gestión continua desde entonces. Cabe destacar que la interpolación se ha realizado independientemente en cada masa de agua para evitar mezclas de datos sin relación hidrogeológica.

Se interpoló mediante una función *tense spline* de base radial. Se trata de una compleja función hiperbólica que se aplica entre nodos consecutivos. De forma similar a otras funciones de base radial, *tense spline* pasa a través de los distintos nodos y crea una superficie que pasa obligatoriamente por todos los valores medidos por lo que se trata de una interpolación exacta.

Posteriormente, se restó el *ráste*r de la profundidad del nivel freático, resultado de la interpolación, a un *ráster* de elevación de la superficie (Modelo Digital del Terreno – MDT200 del Instituto Geográfico Nacional) para obtener la elevación sobre el nivel del mar, o cota, a la que se encuentra el agua subterránea.

Asumiendo que la longitud total de sondeo (h_{total} = 150 m.) está rodeado por la litología que aflora en superficie, la conductividad térmica promedio o efectiva (λ_{ef}) puede calcularse ponderando el espesor de estrato que se encuentra por encima del nivel freático (h_{seco}) y el espesor de estrato por debajo del mismo (h_{sat}) multiplicados por sus respectivas conductividades térmicas (λ_{seco} y λ_{sat}) (Fig. 1).

$$\lambda_{ef} = \frac{(\lambda_{seco} \cdot h_{seco}) + (\lambda_{sat} \cdot h_{sat})}{h_{total}}$$

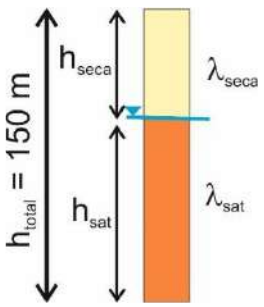


FIGURA 1. *Determinación de la conductividad térmica promedio del total del sondeo a partir del espesor de zona saturada (por debajo del nivel freático) y zona seca (por encima del nivel freático).*

Los valores de conductividad térmica seca y saturada se han obtenido de las tablas de valores recomendados de las normas alemana (VDI 4640, 2010), suiza (SIA, 2010) y española (UNE 100715,2014). Considerando que la conductividad térmica depende de otros factores aparte del grado de saturación como la composición mineralógica o la densidad/porosidad, se han descartado los valores extremos de los rangos de valores recomendados. Así se ha asignado el 75% del rango como conductividad térmica en estado saturado y el 25% como conductividad térmica en estado seco a cada litología.

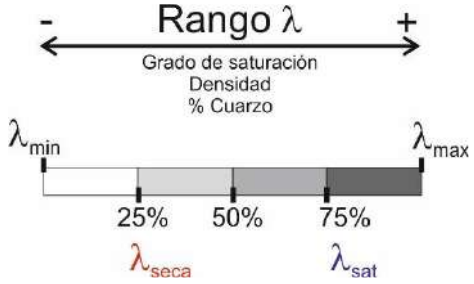


FIGURA 2. *Rango de valores de conductividad térmica recomendados en las normas. Conductividad térmica saturada corresponde al 75% del rango. Conductividad térmica seca corresponde al 25% del rango.*

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Figura 3 muestra los mapas de conductividades térmicas de la Comunidad Valenciana obtenidos en tres condiciones distintas: considerando las litologías totalmente secas, totalmente saturadas y ponderando el espesor de terreno seco y saturado a partir de la profundidad del nivel freático. El mapa de conductividades térmicas en estado seco presenta valores comprendidos entre 0,7 y 3,6 W/mK con un valor medio de 1,7 W/mK. Si se considera que las litologías se encuentran saturadas, este rango se desplaza hacia valores superiores, entre 0,8 y 4,2 W/mK, con un valor medio de 2,3. El método propuesto integra la conductividad térmica efectiva del tramo seco sobre el nivel freático y el tramo saturado por debajo de éste. Así se obtienen conductividades térmicas efectivas entre 1,1 y 4,2 W/mK con un valor medio de 2,9 W/mK. La diferencia entre los resultados obtenidos mediante este método y los obtenidos en estado seco es 0,6 W/mK y 0,5 W/mK con el estado saturado. Por tanto, la diferencia en valores es muy similar, aunque difiere mucho espacialmente dependiendo de la litología presente.

A partir de esta estos mapas más realistas de conductividades térmicas que consideran la profundidad del nivel freático se pretende diseñar una herramienta de dimensionamiento de instalaciones de climatización geotérmicas basada en SIG que representará una

innovación significativa, particularmente simplificando el proceso de diseño estimativo de bombas de calor geotérmicas para usuarios no expertos. Integrando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para datos precisos y específicos de la ubicación, esta herramienta conseguirá que la compleja tarea de dimensionar y estimar instalaciones GSHP sea más accesible. La naturaleza amigable con el usuario de la herramienta aborda una barrera crítica en el compromiso con la tecnología geotérmica: la falta de conocimiento técnico entre los posibles usuarios. Al desmitificar las complejidades y ofrecer estimaciones confiables, logrará que los usuarios puedan adoptar soluciones geotérmicas con confianza.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida de la Universitat Politècnica de València (UPV), para el proyecto "GEOSIMVAL – Simulador del potencial geotérmico de una instalación de climatización en la Comunitat Valenciana" y del IGME mediante el proyecto "Gestión Sostenible de las materias primas minerales", que han hecho posible este trabajo.

REFERENCIAS

Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (versión refundida)

Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativa a la eficiencia energética y por la que se modifica el Reglamento (UE) 2023/955 (versión refundida).

Farouki, O.T. (1986). Thermal properties of soils. Trans Tech Publications. D-3392 Clausthal-Zellerfeld, Germany. 136 pp. ISBN 0-87849-055-8

Gerard, P., Vincent, M. y François, B. (2021): A methodology for lithology-based thermal conductivities at a regional scale for shallow geothermal energy – Application to the Brussels-Capital Region. *Geothermics* 95: 102117

Marzán, I., Gómez, M., Fernández, M. (2015): Shallow (0-200 m) geothermal atlas in Catalonia (NE-Spain). 26th ASE General Assemly, IASPEI, Prague. DOI:10.13140/RG.2.2.35151.84649

Ramos-Escudero. A et al. (2021) Evaluation of the Shallow Geothermal Potential for Heating and Cooling and Its Integration in the Socioeconomic Environment: A Case Study in the Region of Murcia, Spain. *Energies* 2021, 14, 5740. https://doi.org/10.3390/en14185740.

Ramos-Escudero. A et al. (2020) Spatial analysis of indicators affecting the exploitation of shallow geothermal energy at European scale. Renewable Energy (2021), 266-281, 167. Doi: 10.1016/j.renene.2020.11.081

Sáez Blázquez, C., Farfán Martín, A., Martín Nieto, I., Carrasco García, P., Santiago Sánchez Pérez, L. y González Aguilera, D. (2017): Thermal conductivity map of the Avila region (Spain) based on thermal conductivity measurements of different rock and soil samples. *Geothermics* 65: 60–71.

Sánchez Guzmán, J., Sanz López, L. y Ocaña Robles, L. (2011): Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020. IDAE

RHC-ETIP (2022): Strategic Research and Innovation Agenda for Climate-Neutral Heating and Cooling in Europe. European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. (www.rhc-platform.org)

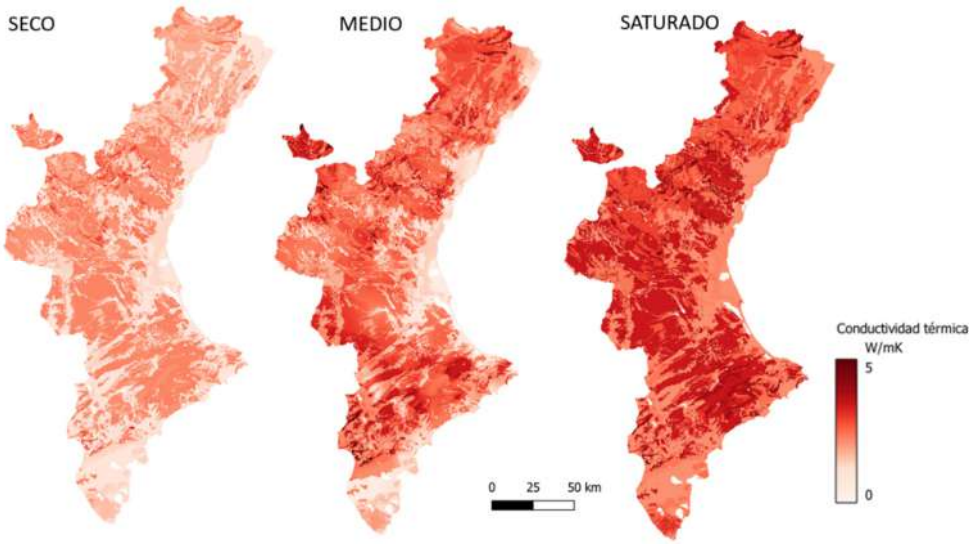


FIGURA 3. Mapas de conductividades térmicas de la Comunidad Valenciana, considerando la litología completamente seca (izquierda), completamente saturada (derecha) y ponderando el tramo seco y saturado en función de la profundidad del nivel freático (centro).

Impacto de las características geológicas y de inyección en la evaluación de riesgos del almacenamiento geológico de CO_2 en el acuífero salino de Lopín, España.

Impact of geological and injection characteristics on the risk assessment of CO_2 geological storage in the Lopín saline aquifer, Spain.

S. Eguilior[1], A. Hurtado[1] y F. Recreo[1]
1 CIEMAT, Avda. Complutense 40, 28040 Madrid. Sonsoles.eguilior@ciemat.es, Antonio.hurtado@ciemat.es, fernando.recreo@externos.ciemat.es

Palabras clave: CO_2 Geological storage, saline aquifer, risk assessment, analytical models.

Resumen

Dentro de los trabajos llevados a cabo para la selección y caracterización de áreas y estructuras favorables para el Almacenamiento Geológico de CO_2 en España, Lopín, al sur de la cuenca del Ebro, fue identificada como una estructura con condiciones positivas para el almacenamiento de CO_2. Pero la escasez de datos disponibles hace que este acuífero salino no esté bien caracterizado, presentando incertidumbres tanto a nivel estratigráfico como de parámetros hidrogeológicos.

En el contexto de la evaluación de riesgos HSE, el objetivo de este trabajo es cuantificar los efectos de dichas incertidumbres sobre los riesgos asociados a la inyección de CO_2, inicialmente ligados al alcance de la Pluma de CO_2 y a las sobrepresiones inducidas en el emplazamiento (Hurtado *et al.* 2016). Para ello se han desarrollado cuatro escenarios principales, correspondientes a diferentes interpretaciones posibles de los datos disponibles sobre el emplazamiento. Se han considerado las condiciones de inyección del emplazamiento piloto, con una limitación de CO_2 de 100000 Tn, e industrial, con una inyección de CO_2 asociada a los estudios de capacidad de la estructura. Las evaluaciones de los distintos escenarios se llevan a cabo mediante modelos analíticos que permiten realizar simulaciones Monte Carlo para determinar el impacto de las distintas incertidumbres.

Abstract

As part of the effort to select and characterise suitable areas and structures for the geological storage of CO_2 in Spain, Lopín, located in the southern part of the Ebro basin, has been identified as a structure with favourable conditions for CO_2 storage. However, due to the lack of available data, this saline aquifer is not well characterised, with uncertainties both at the stratigraphic level and in terms of hydrogeological parameters.

The objective of this study is to quantify the impact of these uncertainties on the risks associated with CO_2 injection, initially related to the extent of the CO_2 plume and the overpressures induced at the site (Hurtado *et al.* 2016). For this purpose, four main scenarios have been developed, corresponding to different possible interpretations of the available site data. In addition, pilot site conditions have been considered, with an injected CO_2 limit of 100000 T, and industrial site conditions, with an injected CO_2 quantity related to the capacity studies of the structure. The evaluation of the different scenarios is conducted using analytical models, allowing for Monte Carlo simulations to be performed to reflect the impact of the different uncertainties on the results.

Referencias

Hurtado, A., Eguilior, S., Recreo, F. (2016). *Security Assessment on Geological Storage of CO2: Application to Hontomin Site*. En: Vishal, V., Singh, T. (eds) Geologic Carbon Sequestration. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27019-7_15

Nuevo modelo 3D de resistividades MT de la isla de Gran Canaria. Implicaciones respecto a su potencial geotérmico.

New 3D MT-resistivity model of Gran Canaria Island and geothermal potential implications.

A. García-Craviotto[1], J. L. Huedo[1], J. Torres[1], I. García[1], A. Olaiz[1], A. Ambrogio[2], G. Marro[1], A. Arnáiz[1]

1 Repsol Exploración. Méndez Álvaro 44, Madrid 28045. axel.garcia@repsol.com

2 Geoinvest S.R.L. Via della Conciliazione, 45/A, 29122 Piacenza PC, Italia. aldo.ambrogio@geoinvest.it

Resumen: Se presenta un nuevo modelo de resistividades de Gran Canaria elaborado a partir de la inversión 3D de los datos de magnetotelúrica (MT) de 160 estaciones distribuidas homogéneamente por toda la isla. El objetivo del trabajo es identificar las áreas de mayor potencial geotérmico, interpretando las principales anomalías identificadas en el modelo MT, junto con los resultados de estudios previos. Destacan dos zonas: una al sureste, coincidiendo con el área de mayor potencial ya identificada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en los 70, y otra al norte. Tras analizar la distribución espacial y el posible origen de los principales cuerpos resistivos, se discuten también las implicaciones que estos podrían tener en la evolución volcánica de la isla desde su estado más inicial, así como su relación inherente con el denominado *Rift* NO-SE.

Palabras clave: magnetotelúrica, inversión 3D, Gran Canaria, geotermia, vulcanismo.

Abstract: *A new resistivity model of Gran Canaria based on the 3D inversion of 160 recently acquired and evenly distributed MT sites is presented. The main objective is to identify the areas with greater geothermal potential, by jointly interpreting the main MT anomalies together with other previous relevant studies. The two most promising areas are: one in the south-east, coinciding with the area of high potential identified by the Geological and Mining Institute of Spain (IGME) in the 70's, and in the north. After analyzing the spatial distribution and possible origin of the main resistive bodies, the implications that these could have on the volcanic evolution of the island from its most initial stage are also discussed, as well as their inherent relationship with the so-called NW-SE Rift.*

Key words: *magnetotellurics, 3D inversion, Gran Canaria, geothermal, volcanism.*

INTRODUCCIÓN

Las Islas Canarias, debido a su vulcanismo activo, es considerada la región de España con mayor potencial de albergar recursos geotérmicos de alta entalpía. Sin embargo, más del 85% de la electricidad generada hoy en día en el archipiélago sigue proviniendo de la quema de combustibles fósiles.

Desde principios de los 70 se llevaron a cabo numerosos trabajos de exploración geotérmica en las islas. En el caso concreto de Gran Canaria, culminaron en 1981 con la perforación de dos sondeos de investigación, ambos de menos de 700 m de profundidad y ubicados en el sureste de la isla. A partir de los resultados de estos sondeos, aun siendo interesantes desde el punto de vista geotérmico ya que registraron gradientes anómalos de más de 65º C/Km, la investigación geotérmica se enfocó en otras islas. Desde entonces, se han realizado por parte de distintos organismos de investigación y universidades numerosos estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos; algunos de especial relevancia ya que al interpretar conjuntamente sus resultados con los del presente trabajo, permiten inferir elementos críticos del potencial sistema geotérmico existente en el subsuelo de la isla.

Repsol Exploración está analizando la posibilidad de un desarrollo geotérmico en Gran Canaria desde finales de 2021, cuando se le concedió oficialmente el permiso de exploración geotérmica «LISA», ubicado en el sur de la isla (Fig. 1).

De entre los estudios realizados hasta la fecha por la compañía, destaca la adquisición, procesado e inversión 3D de nuevos datos magnetotelúricos.

En el presente trabajo se analizan en detalle los resultados del modelo de inversión 3D resultante, comparándolos con estudios previos existentes, y se discuten sus implicaciones tanto desde el punto de vista del potencial geotérmico como de la propia evolución volcánica de la isla.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Gran Canaria, tercera isla más grande del archipiélago por superficie (1532 Km^2), presenta una geometría casi circular, con un diámetro aproximado de

45 Km y una elevación máxima de 1950 m (Pico de las Nieves). Esta configuración favoreció a la formación de un importante relieve erosivo caracterizado por una densa red radial de barrancos profundos.

Uno de los elementos geomorfológicos/estructurales más importantes, estrechamente relacionado con la evolución volcánica de Gran Canaria, es el lineamiento NO-SE comúnmente denominado como "*Rift*" Plioceno, el cual divide la isla en dos partes más o menos iguales. La mitad SO, denominada Paleocanaria, es donde se encuentran los depósitos más antiguos (principalmente de edad Miocena); mientras que la mitad NE, denominada Neocanaria, es donde se concentra todo el vulcanismo Plio-Cuaternario (Fig. 1).

La fase volcánica subaérea de Gran Canaria comenzó hace unos 14,5 Ma y se caracterizó por el desarrollo de un intenso vulcanismo basáltico en forma de escudo, acompañado de importantes deslizamientos gravitacionales. A continuación, se formó otro de los elementos morfológicos más destacables de la isla con el colapso de la Caldera de Tejeda, el cual supuso la expulsión de enormes volúmenes de ignimbritas, seguido de un resurgimiento post calderico con el emplazamiento de intrusiones sieníticas y el complejo cónico de diques. Tras un periodo de inactividad volcánica (8,8–5,5 Ma) se inició la denominada fase de rejuvenecimiento con la formación del estratovolcán Roque Nublo, así como todo el vulcanismo monogénico post-Roque Nublo, este último claramente influenciado por el lineamiento del *Rift* NO-SE (Rodríguez-González et al., 2018).

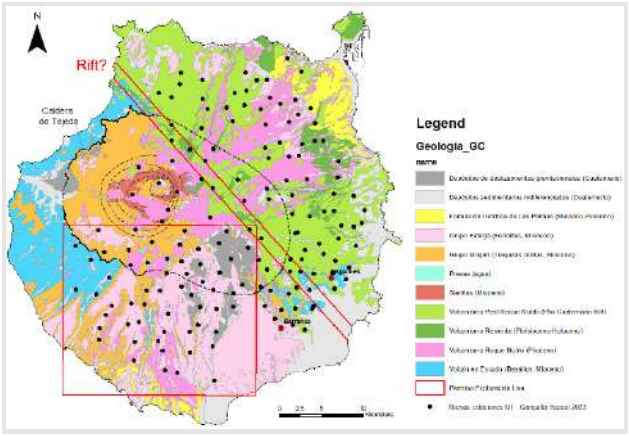


FIGURA 1. *Mapa Geológico de Gran Canaria. El polígono rojo representa el permiso de exploración geotérmica «LISA». Los puntos negros representan las nuevas estaciones MT adquiridas.*

METODOLOGÍA

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica geofísica electromagnética de fuente natural, que permite caracterizar la distribución de las resistividades eléctricas en el subsuelo a partir de las medidas simultáneas de las variaciones temporales del campo electromagnético terrestre. Este método es especialmente utilizado en exploración geotérmica ya que permite caracterizar ciertos componentes críticos del sistema, como por ejemplo el sello (*clay-cap*) del reservorio geotérmico, o incluso zonas de falla/fractura que pudieran albergar fluidos hidrotermales (Piña-Varas et al., 2023).

En Gran Canaria, existe un antecedente de estudio MT con fines geotérmicos, publicado por Ledo et al. (2021), en el que se presenta un modelo 3D de resistividades MT a escala de isla, elaborado a partir de la inversión de los datos de 100 estaciones MT distribuidas por toda la isla.

La campaña de adquisición del presente estudio fue llevada a cabo por la empresa GEOINVEST s.r.l. a principios del 2023. En total, se adquirieron datos de 165 estaciones MT (Fig. 1), con una distribución bastante homogénea, con intervalos de separación de 1.5 a 4 Km entre estaciones. Se midieron datos de tensor completo en todas las estaciones (Ex, Ey, Hx, Hy, Hz), con estaciones de registro Metronix ADU-07/07e y bobinas magnéticas de banda ancha Metronix MFS-06/07, registrándose frecuencias de 10.000 a 0,001 Hz. El tiempo medio de registro por estación fue de unas 18 horas. Además, se instalaron 2 estaciones de referencia remota con el fin de minimizar el efecto del potencial ruido electromagnético en el área de estudio.

El procesado de las series temporales fue realizado también por GEOINVEST s.r.l., usando un software propio basado en el código de Larsen et al. (1996). La calidad de los nuevos datos MT es por lo general muy buena, a excepción de unas pocas estaciones que presentan algo más de ruido, sobre todo en las altas frecuencias.

Para el modelado e inversión 3D de los datos magnetotelúricos, llevado a cabo por la empresa SLB, se usaron finalmente los datos de 160 estaciones, y el enfoque inicial de inversión fue sin ningún tipo de condición de contorno geológica. El modelo inicial consistió en una distribución uniforme de resistividad de 100 Ω.m (incluyendo la resistividad del agua del mar en la lámina de océano) y el código de inversión utilizado es un algoritmo estándar de inversión 3D propiedad de SLB.

RESULTADOS

El modelo de resistividades resultante abarca un área de aproximadamente 1000 Km^2 y profundiza hasta los 6000 m b.n.m. Por lo general se observan ciertas similitudes con el modelo publicado por Ledo et al. (2021), aunque con una mayor resolución, sobre todo en la parte más somera; y una mayor continuidad e intensidad de las principales estructuras geo-eléctricas identificadas.

Uno de los elementos más destacables, es el cuerpo principal (R1) de muy alta resistividad (>500 Ω.m) centrado en la Caldera de Tejeda, y cuya geometría se extiende en profundidad (>3000 m) hacia el sureste, y en menor medida hacia el norte, formando dos

subestructuras (R2, R3) con forma de domo fuera de los límites de la caldera (Fig. 2). Se llega incluso a intuir, para resistividades más moderadas (200-300 Ω.m), la presencia en profundidad de otro posible cuerpo de este tipo al sur de la caldera (R4). Estos cuerpos profundos y resistivos podrían estar relacionados con intrusiones plutónicas que dieron lugar a la formación de los escudos basálticos primigenios de la isla. Esta interpretación sería consistente con la teoría de Schmincke y Sumita (1998), posteriormente reforzada por estudios de gravimetría (Montesinos et al., 2022), de varios escudos Miocenos diferenciados (a excepción del de Arucas) que acabaron unificándose en uno solo y cuyo ápex estaría centrado en la zona de la caldera.

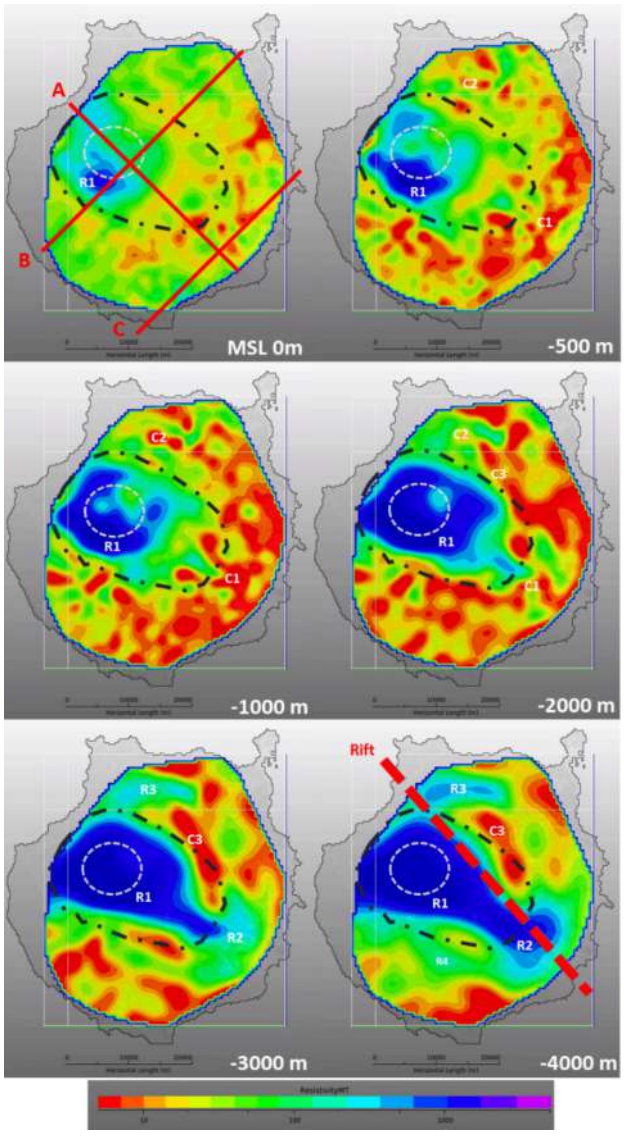


FIGURA 2. *Secciones horizontales del modelo de resistividades a distintas profundidades. Se han incluido como referencia los principales cuerpos conductores (C) y resistivos (R), así como la ubicación de las secciones verticales de la Figura 3.*

También parece evidente la relación entre el cuerpo principal de alta resistividad y el posible *Rift* NO-SE, aunque no está tan claro de qué manera se relacionan entre sí. Una posible explicación es que estos cuerpos intrusivos de alta densidad y resistividad hayan actuado de barrera reológica y desviado todo el vulcanismo monogenético Plio-Cuaternario hacia el NE.

Fuera de la caldera encontramos una respuesta geo-eléctrica muy diferente, con numerosos cuerpos conductores (<10 Ω.m), relativamente continuos y de espesores y profundidades variables. Hay dos aspectos que parecen destacables a nivel regional. Por un lado, hay una evidente influencia del nivel freático en los conductores someros; y por otro, se observa la posible influencia por intrusión de agua marina en las zonas más costeras del modelo, en especial en el NE, S y SE de la isla.

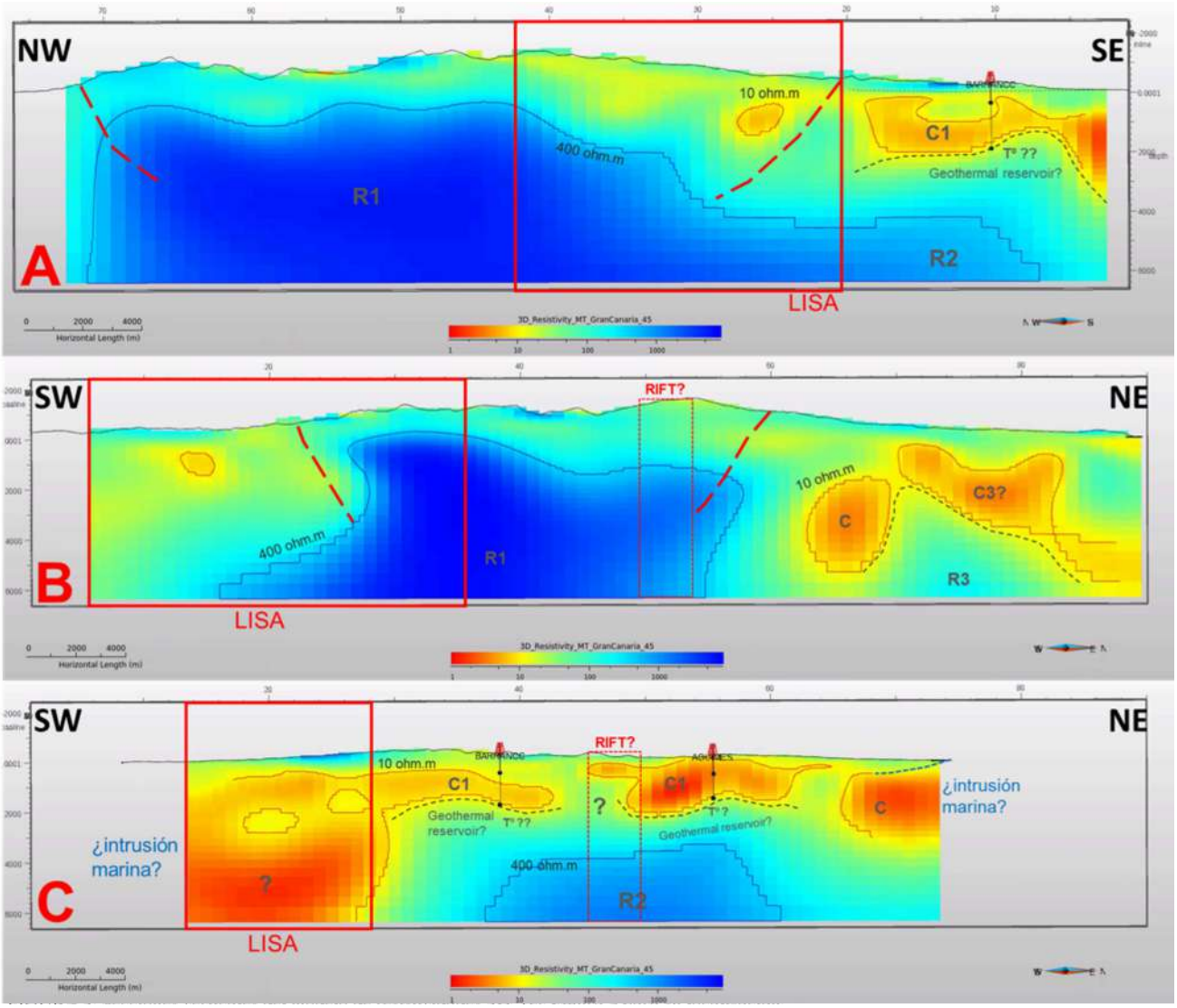
Hay algunos conductores interesantes desde el punto de vista geotérmico, ubicados principalmente en el norte de la isla y en el sureste (coincidente con la zona ya identificada en los años 70 por el IGME como de alto potencial geotérmico). Si se confirmase el origen hidrotermal de estas anomalías, y siguiendo el modelo conceptual de sistema geotérmico volcánico de alta entalpía (Cumming, 2007), cabría esperar por debajo de las mismas (y por encima de la estructura resistiva profunda) un potencial recurso geotérmico de media-alta entalpía (>150º C). De hecho, si se extrapola el gradiente geotérmico registrado por los sondeos Agüimes (648 m; 7,5ºC/100m) y Barranco Las Palmas (670 m; 6,5ºC/100m) hasta la base del cuerpo conductor (10 Ω.m), se lograría alcanzar ese rango de temperaturas a profundidades de unos 2000 m en esa zona (Fig. 3).

Finalmente, otra estructura conductora interesante es la ubicada al NE de la caldera, con una geometría subparalela al borde de ésta, con una misma orientación que el *Rift* NO-SE y los lineamientos volcánicos Plio-Cuaternarios; y que se extiende en profundidad. Este tipo de estructuras podrían interpretarse como posibles zonas de falla o fractura en las que pudiera existir un flujo convectivo ascendente de fluidos calientes.

CONCLUSIONES

El método magnetotelúrico ha demostrado ser de los métodos geofísicos más útiles en la exploración de recursos geotérmicos en terrenos volcánicos. El nuevo modelo de resistividades 3D de Gran Canaria presentado en este trabajo es consistente con otros estudios previos y aporta nueva información sobre la evolución volcánica y estructura interna de la isla.

Con los datos disponibles hasta la fecha, Gran Canaria tiene potencial de albergar recursos geotérmicos de media-alta entalpía con los que, de demostrarse su existencia, podría reducir considerablemente su dependencia energética de los combustibles fósiles. Para ello, es necesario la perforación de sondeos de investigación lo suficientemente profundos (> 2000 m) con los que probar el posible sistema geotérmico existente debajo de las principales anomalías conductoras identificadas en el presente trabajo.



AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido financiado por REPSOL EXPLORACIÓN S.A. Los autores quieren expresar su agradecimiento a las empresas GEOINVEST y SLB por su labor durante la adquisición, procesado e inversión de los datos.

REFERENCIAS

Cumming, W. and Mackie, R. (2007): 3D MT resistivity imaging for geothermal resource assessment and environmental mitigation at the Glass Mountain KGRA, *California. Transactions - Geothermal Resources Council*, 31, 331–334

Larsen, J.C., Mackie, R., Manzella, A., Fiordelisi, A. and Rieven, S., (1996): Robust smooth magnetotelluric
transfer functions. *Geophys. J. Int.* 124 (3), 801–819.

Ledo J., García-Merino M., Larnier H., Slezak K., Piña-Varas P., Marcuello A., Queralt P., Pérez N., Schmincke H.U. and Sumita M. (2021): 3D electrical resistivity of Gran Canaria Island using magnetotelluric data. *Geothermics,* 89, 101945.

Montesinos, F. G., Arnoso, J., Gómez-Ortiz, D., Benavent, M., Blanco-Montenegro, I., Vélez, E., Martín-Crespo, T., Gorbatikov, A.V. and Stepanova, M.V. (2022): Imaging the volcanic structures beneath Gran Canaria Island using new gravity data. *Journal of Geophysical Research*: Solid Earth, 127, e2022JB024863.

Piña-Varas, P., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A., Mitjanas, G. and Martínez D. (2023): Magnetotelluric applied to deep geothermal exploration: Canary Islands. *Boletín Geológico y Minero,* 134 (3), 49-58.

Rodríguez-González, A., Pérez-Torrado, F. J., Fernández-Turiel, J. L., Aulinas, M., Paris, R. and Moreno-Medina, C. (2018): The Holocene volcanism of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Journal of Maps*, 14(2), 620–629.

Schmincke, H. U., and Sumita, M. (1998): Volcanic evolution of Gran Canaria reconstructed from apron sediments: synthesis of VICAP project drilling. In: *Proceedings of the Ocean drilling Program, scientific results* (P.P.E. Weaver, H. U. Schmincke, J. V. Firth, and W. Duffield, eds.), 157, 443–469.

Modelización petrofísica 3D de las facies Buntsandstein de la Cuenca del Ebro para un proyecto CAC en Lopín (Zaragoza)

Petrophysical 3D modelling in the Ebro Basin Buntsandstein facies for a CCS project in the Lopín Area (Zaragoza, Spain)

J. García Crespo[1], I. Moreno González[1], J. F. Mediato Arribas[1], J. Martínez-Martínez[1], D. M. García Fernández-Valderrama[2], P. Fernández-Canteli Álvarez[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid - garcia.crespo@igme.es
2 Repsol Exploración, S. A., Av. Méndez Álvaro, 44, 28045 Madrid - david.garcia.fv@repsol.com

Palabras clave: Almacenamiento CO_2, Buntsandstein, sistemas fluviales, modelización petrofísica, Cuenca del Ebro

Resumen

Uno de objetivos del proyecto H2020 'CO_2 Geological Pilots in Strategic Territories – PilotSTRATEGY' (https://pilotstrategy.eu/) es determinar el comportamiento del CO2 en el almacén triásico (facies Buntsandstein) de la estructura geológica de Lopín (a unos 40 Km al SE de Zaragoza). Para ello es necesario construir un modelo basado en la distribución de los cuerpos sedimentarios y sus propiedades petrofísicas. Así, se analizó la estratigrafía y sedimentología de afloramientos cercanos del borde de la Cordillera Ibérica y de un testigo de un sondeo profundo, así como la petrofísica a partir de muestras y de los logs de los sondeos de hidrocarburos de la Cuenca del Ebro. El resultado de estos trabajos se plasmó sobre un modelo estructural y de propiedades en Aspen SKUA® y se proyectó el registro sedimentario conforme a un sistema fluvial tipo *braided* con orientación NE. Las porosidades obtenidas son muy variables, entre 4-22%, determinando los valores umbrales de 8 y 14%. Las rocas con porosidad inferior a 8% tienen una permeabilidad asociada inferior a 1mD, mientras que por encima del 14% la permeabilidad varía de decenas a centenas de mD. También se han evaluado los ratios NtG (*Net to Gross*) y la variación de la cantidad de limos o arcillas en los cuerpos arenosos (Vsh).

Abstract

One of the objectives of the H2020 project 'CO2 Geological Pilots in Strategic Territories – PilotSTRATEGY' (https://pilotstrategy.eu/) is to determine the behavior of CO_2 in the Triassic reservoir (Buntsandstein facies) of the Lopín geological structure (about 40 Km SE of Zaragoza). To achieve this,, it is necessary to build a model based on the distribution of sedimentary bodies and their petrophysical properties. Consequently, the stratigraphy and sedimentology of outcrops close to the edge of the Iberian Range and a core from a deep well were analyzed, as well as petrophysics from samples and logs of hydrocarbon wells in the Ebro Basin. The result of these works was captured on a structural and property model in Aspen SKUA®, and the sedimentary record was projected according to a braided type fluvial system with NE orientation. The porosities obtained are very variable, between 4% and 22%, fixing two threshold values: 8% and 14%. Rocks with porosity below 8% show permeability values lower than 1mD, while above 14% the permeability varies from tens to hundreds of mD. The NtG (Net to Gross) ratios and the variation in the amount of silt or clay in the sandy bodies (Vsh) have also been evaluated.

Referencias

Ayala, C., Benjumea, B., Mediato, J. F., García-Crespo, J., Clariana, P., Soto, R., Rubio, F., Rey-Moral, C., Pueyo, E. L., Martín-León, J., García, A. G., Fernández-Canteli, P. y Martínez-Orio, R. (2022). *Developing a new innovative methodology to integrate geophysical techniques into characterization of potential CO_2 storage sites: Lopín structure (southern Ebro Basin, Spain)*. Geological Society, London, Special Publications, 528 (1). https://doi.org/10.1144/SP528-2022-70

Geotermia somera para las Islas Canarias: Proyecto SAGE4CAN - Electrificación Eficiente del Sector Térmico con Bombas de Calor Geotérmicas.

Shallow geothermal energy for the Canary Islands: SAGE4CAN project - Efficient electrification of the heating and cooling industry through geothermal heat pumps.

A. García Gil[1], J. Jimenez[1], M.Á. Marazuela[1], C. Baquedano[1], J. Martínez-León[1], S. Gasco Cavero[1,2], N. Cruz-Pérez[3], E. Garrido Schneider[1], T. Alonso Sánchez[4], M.Á. Rey Ronco[4], J.Á. Sánchez-Navarro[5], A. Andreu Gallego[6], J.M. Tiscar Cervero[6], J.C. Santamarta[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España. a.garcia@igme.es; ma.marazuela@igme.es; c.baquedano@igme.es; j.martinez@igme.es
2 Departamento de Salud de Madrid, Ayuntamiento de Madrid, España. gascocs@madrid.es
3 Departamento de Ingeniería Agraria y Ambiental. Universidad de La Laguna, Tenerife (Islas Canarias), España. ncruzper@ull.edu.es; jcsanta@ull.edu.es
4 Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo, España. tjalonso@uniovi.es; rey@uniovi.es
5 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. joseange@unizar.es
6 Departamento de Sostenibilidad, Instituto de Tecnología Cerámica, Castellón de la Plana, Españas. alicia.andreu@itc.uji.es; juanmiguel.tiscar@itc.uji.es

Palabras clave: geotermia somera; agua subterránea; acuíferos volcánicos; erupción volcánica.

Resumen

El proyecto SAGE4CAN tiene como objetivo demostrar el potencial de la energía geotérmica somera (EGS) como una solución clave para abordar el cambio climático, centrándose en las Islas Canarias como un sistema de control accesible. Para lograr esto, el proyecto se enfoca en evaluar los recursos de EGS, desarrollando una metodología mejorada para estimar el potencial geotérmico somero, incluyendo efectos transitorios de transporte de calor y la interferencia hidráulica entre instalaciones geotérmicas. También se investiga la eficiencia de las instalaciones geotérmicas someras existentes, así como los posibles riesgos e impactos ambientales asociados con su uso en Canarias. El proyecto SAGE4CAN busca impulsar el cambio de paradigma en el sector de la energía térmica mediante la evaluación del potencial geotérmico somero, lo que podría contribuir significativamente a la transición energética y al aumento del uso de energías renovables en el consumo total de energía.

Abstract

The SAGE4CAN project aims to demonstrate the potential of shallow geothermal energy (SGE) as a key solution to address climate change, with a focus on the Canary Islands as an accessible control system. To achieve this goal, the project is focused on assessing EGS resources, developing an enhanced methodology to estimate shallow geothermal potential, which includes transient heat transport effects and hydraulic interference among geothermal installations. Additionally, the efficiency of existing shallow geothermal installations is being investigated, along with potential risks and environmental impacts associated with their utilization in the Canary Islands. The SAGE4CAN project seeks to catalyze a paradigm shift in the thermal energy sector by evaluating shallow geothermal potential, thereby potentially making a significant contribution to energy transition, and increasing the utilization of renewable energies in total energy consumption.

Análisis estructural de lineamientos en terrenos volcánicos mediante el uso de la técnica LiDAR aplicada a la exploración geotérmica

Structural analysis of lineaments in volcanic terrains using the LiDAR technique applied to the geothermal exploration

P. Hernández[1], J. Álvarez[1], A. García[1], J.L. Huedo[1], J. Torres[1], A. Arnáiz[1]

1 Repsol Exploración. Méndez Álvaro, 44. 28045, Madrid, p.hernandez@repsol.com, jalvarezga@repsol.com, axel.garcia@repsol.com, joseluis.huedo@repsol.com, javier.torres@repsol.com, aarnaizg@repsol.com

Resumen: El uso de herramientas de teledetección en las primeras fases de exploración de recursos geológicos es ampliamente aceptado por la comunidad científica, debido a su reducido coste, naturaleza no invasiva y sostenibilidad ambiental, cobertura amplia y detallada y obtención de resultados de calidad en tiempos reducidos. En este estudio se han utilizado modelos digitales de elevación de alta resolución generados a partir de la técnica LiDAR para la interpretación de lineamientos en el área de dos permisos de exploración de recursos geotérmicos en la isla de Tenerife. Tras aplicar una iluminación multidireccional y adaptativa, se han identificado 3 tipos de lineamientos: fisuras eruptivas o centros de emisión, valles o barrancos y fracturas. Los datos interpretados han sido tratados estadísticamente para la generación de diagramas de rosetas. Los resultados obtenidos han permitido identificar áreas de interés que serán objeto de campañas de campo para verificar la presencia de fracturas, cuyas características y orientación serán considerados aspectos críticos en la planificación y diseño de sondeos de exploración geotérmica en la isla.

Palabras clave: teledetección, LiDAR, lineamientos, fracturas, potencial geotérmico.

Abstract: *The use of remote-sensing techniques in the early phases of exploration of geological resources is widely accepted by the scientific community, due to its reduced cost, non-invasive and environmentally friendly, wide and detailed coverage, high quality results in reduced time. In this study, high-resolution digital elevation models generated with LiDAR have been used for the interpretation of lineaments in the area of two exploration permits for geothermal resources in the island of Tenerife. After applying a multi-directional and adaptative illumination, three different types of lineaments have been interpreted: eruptive fissures or emission centers, valleys or ravines and fractures. The interpreted data has been statistically processed to generate rose diagrams. The results have been used to identify areas of interest where field campaigns will verify the presence of fractures, whose characteristics and orientation will be considered critical in the planning and design of exploratory wells in the island.*

Key words: *teledetection, LiDAR, lineaments, fractures, geothermal potential.*

INTRODUCCIÓN

Desde principios del año 2023, Repsol se encuentra realizando actividades exploratorias no invasivas para conocer el potencial geotérmico en la isla de Tenerife. Las áreas de interés estudiadas (Fig. 1) están localizadas en el sureste (Permiso Tajao, con una extensión de 193 km^2) y en el suroeste de la isla (Permiso Isora, con una extensión de 211 km2).

La detección de lineamientos geológicos en la superficie de la corteza mediante técnicas de teledetección es una herramienta muy común en las primeras fases de exploración geotérmica, proporcionando resultados eficaces a bajo coste. Su estudio permite la identificación de múltiples elementos de interés geológico, como son las fallas activas o inactivas, diques volcánicos, zonas de rift, cambios mineralógicos importantes y elementos hidrológicos y geomorfológicos, lo cual es una tarea clave en la definición de las áreas de mayor interés desde el punto de vista geotérmico. Además de la presencia de altas temperaturas en el subsuelo, la existencia de zonas altamente fracturadas es deseada en proyectos geotérmicos debido a que esto implica la existencia de vías preferenciales de circulación de fluido calientes profundos. Además, debido a la necesidad de un reservorio con alta permeabilidad, una alta fracturación se asocia con una mayor productividad de fluido geotérmico en superficie.

Los objetivos que se persiguen mediante la realización de este estudio son los siguientes:

- Entendimiento del patrón de fracturación de las distintas unidades volcano-estratigráficas en Tenerife y relación en su contexto geodinámico.

- Identificación de áreas con mayor densidad de fracturación, que pueden estar asociadas a zonas

donde la fracturación natural en el subsuelo es mayor, y donde la posibilidad de encontrar un recurso geotérmico es mayor. Esto es debido a que a través de estas fracturas el fluido geotérmico podría circular más fácilmente ya que pueden actuar como conductos de alta permeabilidad.

- Descripción de las principales orientaciones de fracturación presentes en la isla, lo cual tiene implicaciones directas en la planificación y diseño (así como en la trayectoria) de los sondeos de exploración profundos que confirmarán la presencia del recurso geotérmico en el subsuelo.



FIGURA 1. *Ubicación de los permisos de exploración de recursos geotérmicos "Isora" y "Tajao" en la isla de Tenerife.*

MARCO GEOLÓGICO

La geología y la vulcanología de la isla de Tenerife han sido objeto de numerosos estudios que proporcionan una base sólida para la exploración geotérmica (Cas et al., 2022; Carracedo et al., 2007). La isla tiene una historia geológica compleja que se remonta a más de 12 millones de años. Comenzó con la formación de escudos basálticos en los tres vértices de la isla (Anaga, Teno y Roque del Conde) y la evolución en un edificio central con frecuente actividad fonolítica explosiva (Edificio Cañadas) que culminó con la formación de la Caldera de Las Cañadas y del estratovolcán basáltico-fonolítico Teide-Pico Viejo. En paralelo a la formación del edificio central, se han sucedido erupciones basálticas fisurales a lo largo de dos elementos estructurales de primer orden presentes en la isla (las dorsales noreste y noroeste). Los estudios estructurales de detalle en la isla son escasos, y se han centrado en las zonas de Anaga (Marinoni y Gudmundsson, 2000) y Teno (Walter y Schmincke, 2002).

El permiso de exploración Tajao, localizado en el sureste de la isla de Tenerife, está caracterizado por materiales basálticos, piroclásticos, fonolíticos y tefríticos de la Serie Cañadas, con edades comprendidas entre 3.5 y 0.2 M.a. (principalmente de edad Pleistoceno Superior), y presencia puntual de conos y fisuras eruptivas con materiales basálticos y piroclásticos con edades de entre 126.000 y 20.000 años (Pleistoceno Superior). La orografía del terreno presenta claros relieves erosivos, con presencia de numerosos barrancos con una orientación preferencial noroeste-sureste.

El permiso Isora, presenta claras diferencias orográficas entre su parte norte y parte sur. La norte está dominada por materiales basálticos y traquibasálticos de la serie reciente con edades entre 126.000 y 20.000 años (principalmente Pleistoceno Superior) donde la red de drenaje está muy poco desarrollada y las variaciones topográficas son debidas principalmente a la presencia de distintas coladas basálticas. Por el contrario, en la zona sur del permiso destacan los materiales fonolíticos, traquibasálticos e ignimbríticos de la Serie Cañadas, con edades entre 3.5 y 0.2 M.a., donde la red de drenaje se encuentra más desarrollada y encajada, con numerosos barrancos con direcciones noreste-suroeste.

MÉTODO

La técnica LiDAR (acrónimo en ingles de Light Detection and Ranging, o Laser Imaging Detection and Ranging) es en una metodología de detección remota que mide distancias mediante la emisión de un láser (normalmente de onda ultravioleta, visible o infrarroja cercana) que ilumina un objetivo y analiza el pulso reflejado. Esta técnica permite la medida de propiedades físicas del terreno con una resolución lateral milimétrica. El uso del LiDAR está ampliamente aceptado por la comunidad científica para la detección y mapeo de fracturas en la superficie terrestre.

En España, gracias al "Plan Nacional de Ortografía Aerea" (PNOA-LiDAR) llevado a cabo entre 2009 y 2015, se ha obtenido una cobertura completa de todo el territorio nacional gracias a la adquisición de dato mediante sensores aerotransportados. En este estudio, se han usado los datos correspondientes de la isla de Tenerife, los cuales fueron adquiridos en el año 2009, y a los que se ha accedido a través del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional.

Debido a la extensión de los permisos de exploración Isora y Tajao (211 km2 y 193 km2, respectivamente) se ha optado por trabajar con un dato con una resolución horizontal de 5 metros, la cual permite la detección de lineamientos con una escala adecuada para el objetivo del presente estudio. El dato original consiste en una nube de puntos 3D, la cual ha sido cargada en el software de interpretación estructural Move, donde ha sido procesado para eliminar las zonas externas a los permisos de exploración y se ha convertido a formato grid para su mejor manejo y visualización. El producto final consiste en un modelo digital de elevación (MDE) con una resolución lateral de 5 metros, sobre el cual se ha realizado una interpretación manual de fisuras eruptivas, fracturas, y barrancos con posible correlación a fracturas.

La metodología para la interpretación de lineamientos ha consistido en aplicar una iluminación variable multidireccional y adaptativa, con distintos ángulos de incidencia al MDE (Fig. 2). Esta técnica permite la

generación de un sombreado variable que facilita la identificación de lineamientos con distintas orientaciones. Debido a la elevada resolución con la que se ha trabajado (5 metros) ha sido necesario realizar un control de calidad con imágenes satelitales de detalle para evitar la interpretación de elementos antropogénicos como carreteras o edificaciones.

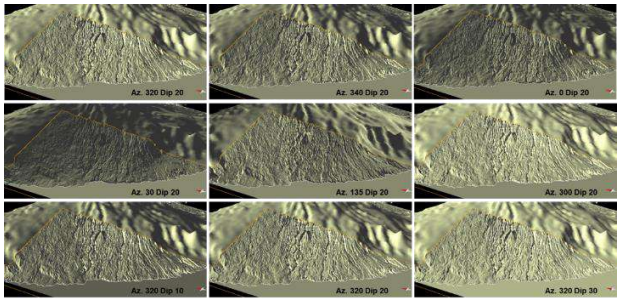


FIGURA 2. *Iluminación multidireccional y adaptativa aplicada al MDE del Permiso Isora.*

Por último, se ha realizado un tratamiento estadístico de los datos interpretados para la generación de rosetas de diagramas, las cuales permiten visualizar las orientaciones principales de los lineamientos interpretados. Los resultados de las orientaciones han sido contrastados con las fracturas y diques interpretadas en el interior de galerías de agua de la zona.

RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, se ha realizado una interpretación manual de tres tipos de lineamientos:

- Fisuras eruptivas o centros de emisión, únicamente presentes en el permiso de Tajao, donde se han interpretado un total de 5 lineamientos. La interpretación de estos lineamientos se ha realizado en base a la elongación de los centros de emisión y a la apertura del cono principal emisor, lo cual presenta buena correlación con la orientación de la zona de debilidad de la superficie a través de la cual migró el magma desde profundidad (como ha podido observarse en erupciones recientes e históricas). Por lo general estas fisuras son de longitudes cortas (inferiores a 1 km) y no presentan una orientación predominante.

- Barrancos con posible correlación a fracturas. Durante la interpretación de estos elementos, el criterio del intérprete juega un papel muy importante. Por lo general, se han interpretados lineamientos en aquellos barrancos que presentan quiebres a lo largo del cauce, los cuales pueden ser debidos a la presencia de elementos estructurales. En Tajao se han interpretado un total de 23 lineamientos de este estilo, cuyas orientaciones predominantes son NO-SE (aunque destaca alguno con orientación ENE-OSO en el sector NE del permiso, y que están asociados casi con toda seguridad a la presencia de fracturas). En el permiso Isora han sido 14 lineamientos con orientaciones predominantes NE-SO.

- Fracturas. Normalmente presentan orientaciones distintas a las de los barrancos (ya que aquellas con las mismas orientaciones de los barrancos quedan ocultas o se representan con los lineamientos anteriores), y se identifican debido a la zona de sombra que genera la iluminación multidireccional en el salto de falla. La presencia de parte de estas fallas coincide con las estaciones analizadas por el Análisis Poblacional de Fallas llevado a cabo por Rodriguez-Pascua y colaboradores (2016). En el permiso Tajao se han interpretado 13 fracturas de este tipo, mientras que en Isora se han interpretado 20. Las orientaciones principales en Tajao son NE-SO y ENE-OSO, mientras que en Isora hay una amplia dispersión de las orientaciones interpretadas, destacando las N-S.

La interpretación en Isora (Fig. 3) presenta un grado de incertidumbre elevado debido a dos factores. La parte norte del permiso está cubierto por materiales recientes, lo cual dificulta la interpretación de fracturas pre-existentes. Por otro lado, las características orográficas del terreno en la zona sur no han permitido una clara identificación de las fracturas, como sí ha ocurrido en el permiso Tajao. A pesar de estos factores, las 20 fracturas interpretadas presentan una dispersión en las orientaciones, pero con predominancia de la orientación N10E, que es la misma orientación observada en en fracturas y diques de los afloramientos de Roque del Conde, ubicados al oeste del permiso. Por otro lado, cabe destacar que solo se han podido analizar los datos de dos galerías dentro de los límites del permiso (Machado-1 y Rio Bermejo). En estas dos galerías tan solo se pudieron medir 6 fracturas, cuyas orientaciones presentan una elevada dispersión y no se puede establecer una clara correlación con los datos aquí interpretados. Las fisuras eruptivas interpretadas en Isora presentan una amplia dispersión y no se pueden extraer conclusiones claras.

La interpretación de fracturas en el permiso Tajao (Fig. 4) presenta un menor grado de incertidumbre, ya que la mayoría de estas fracturas tienen salto de falla y son claramente visibles en el modelo digital de elevación. Las fracturas con menor incertidumbre tienen orientación N30E. Esta orientación no había sido detectada por otros métodos, lo cual muestra la validez y necesidad de usar este método en futuras investigaciones. Por otro lado, también destacan las fracturas interpretadas con orientación N80E. Esta orientación había sido identificada en las galerías de la zona, especialmente en la galería Tamadaya, ubicada dentro del permiso. También destaca esta orientación en los barrancos interpretados con posible correlación estructural, donde la mayoría de las orientaciones son NO-SE, pero destaca la N80E (sin ser la dirección de máxima pendiente). Este hecho pone de manifiesto el sentido estructural de esta orientación.

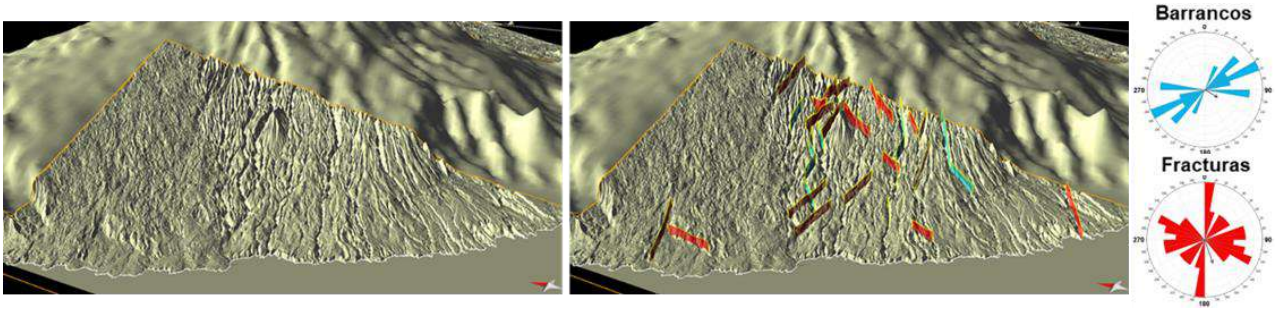


FIGURA 3. MDE del Permiso Isora sin interpretación (izquierda) y con interpretación de lineamientos (derecha)

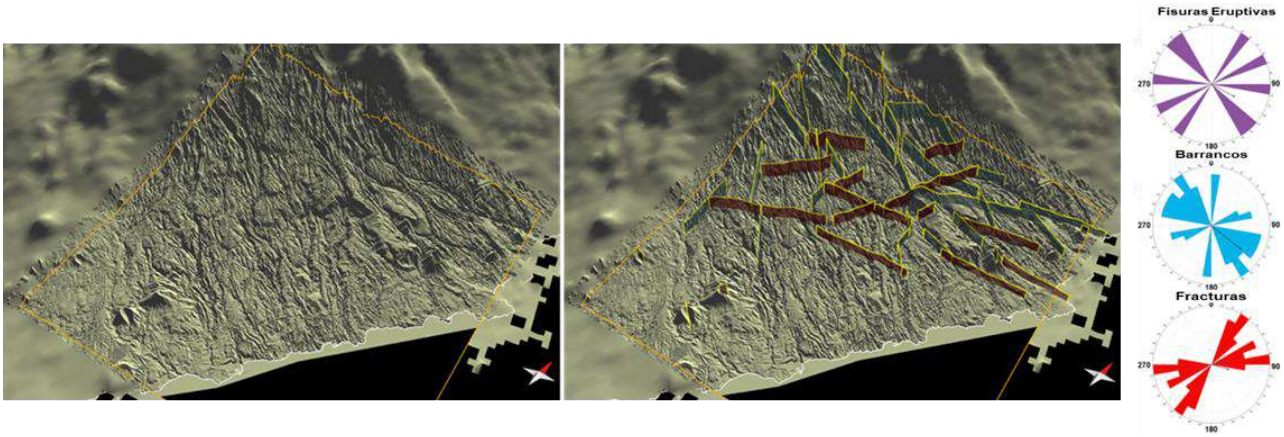


FIGURA 4. MDE del Permiso Tajao sin interpretación (izquierda) y con interpretación de lineamientos (derecha)

CONCLUSIONES

El uso de modelos digitales de elevación de alta resolución generados a partir de la técnica LiDAR ha permitido la interpretación de lineamientos estructurales y la definición de áreas de interés donde se llevarán a cabo campañas de campo específicas para la verificación de los datos interpretados. La existencia de fracturas en superficie supone un indicio de la existencia de zonas fracturadas en el subsuelo, lo cual es un elemento crítico para el desarrollo del recurso geotérmico y su conocimiento es necesario para la planificación y diseño del sondeo de exploración profundo. La metodología empleada ha permitido anticipar la comprensión del subsuelo, optimiza los flujos de trabajo y reduce los tiempos necesarios en la evaluación del subsuelo, lo cual impacta positivamente en la economicidad del proyecto.

REFERENCIAS

Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E., Guillou, H., Paterne, M., Scaillet, S., Pérez Torrado, F.J., Paris, R., Fra-Paleo, U., y Hansen, A. (2007): Eruptive and structural history of Teide Volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands. *GSA Bulletin*, 119: 1027-1051.

Cas, R.A.F., Wolff, J.A., Martí, J., Olin, P.H., Edgar, C.J., Pittari, A., y Simmons, J.M. (2022): Tenerife, a complex end member of basaltic oceanic island volcanoes, with explosive polygenetic phonolitic calderas, and phonolitic-basaltic stratovolcanoes. *Earth-Science Reviews*, 230, 103990.

Marinoni, L.B., y Gudmundsson, A., (2000): Dykes, faults and paleostresses in the Teno and Anaga massifs of Tenerife (Canary Islands).*Journal of Volcanology and Geothermal Research* ,1003: 83-103

Rodríguez-Pascua, M.A., Sánchez, N., Pérez López, R., Perucha, M.A., y Romero, C. (2016): Caracterización espacial de la deformación frágil en las islas de Tenerife y Lanzarote (Islas Canarias, España). *Geo-Temas*, 16 (1)

Walter, T.R. y Schmincke, H.U., (2002): Rifting, recurrent landsliding and Miocene structural reorganization on NW-Tenerife (Canary Island). *International Journal of Earth Sciences*, 91:615-628

Interpretación geológica, geofísica y geoquímica en la cuenca de El Camp (Tarragona) para la evaluación del potencial geotérmico

Geological, geophysical and geochemical interpretation in the El Camp basin (Tarragona) for the geothermal potential evaluation

J. L. Huedo[1], A. García[1], M.V. Olgado[1], J. Torres[1], A. Oláiz[1], A. Arnáiz[1]

1 Repsol Exploración. Méndez Álvaro 44, Madrid 28045. joseluis.huedo@repsol.com, axel.garcia@repsol.com, mvolgadoa@repsol.com, javier.torres@repsol.com, antoniojose.olaiz@repsol.com, aarnaiz@repsol.com

Resumen: Con el objetivo de evaluar el potencial geotérmico en la cuenca de El Camp (Tarragona) se ha llevado a cabo una recopilación e interpretación de los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos disponibles. Los análisis geoquímicos de muestras de pozos someros con anomalías termales muestran temperaturas de equilibrio de 140-160ºC en base a geotermómetros. Los sondeos profundos han permitido estimar gradientes geotermales, así como identificar las dolomías fracturadas y karstificadas del Dogger como almacén de recursos geotermales. A partir de la interpretación sísmica se ha generado un modelo geológico 3D que permite analizar la distribución de las distintas unidades y temperaturas en el subsuelo. El rango de temperaturas del Dogger en el depocentro de la cuenca se superpone con los geotermómetros de la anomalía en pozos someros, pudiendo indicar el origen de la anomalía en profundidad, además de una hipotética recarga meteórica a través de la Cordillera Prelitoral.

Palabras clave: geotermia, geología, geofísica, geotermómetros, modelado.

Abstract: *In order to evaluate the geothermal potential in the El Camp basin (Tarragona) a compilation and interpretation of the geological, geochemical and geophysical data has been carried out. Geochemical analysis from shallow wells samples in thermal anomalies show equilibrium temperatures of 140-160ºC based on geothermometers. Deep wells allow to estimate geothermal gradient and to identify Dogger fractured and karstified dolomites as a reservoir of geothermal resources. From the seismic interpretation a 3D structural-stratigraphic model has been generated that allows to analyze the distribution of the different units and temperatures in the subsurface. The temperature range of the Dogger in the basin depocenter overlaps with the geothermometers of the anomaly in shallow wells, that may indicate the anomaly origin at depth, in addition to a hypothetical meteoric recharge through the Prelitoral Range.*

Key words: *geothermal, geology, geophysics, geothermometers, modeling.*

INTRODUCCIÓN

La cuenca de El Camp (Tarragona) forma parte de las Cuencas Costero Catalanas. Se trata de una fosa tectónica desarrollada durante el Cenozoico. Está delimitada por la falla de El Camp y la cordillera Prelitoral al noroeste y por el cabo de Salou y el golfo de Valencia al sureste. La cuenca se asienta sobre una corteza continental delgada (Sàbat et al., 1995).

Existen anomalías termales en varios pozos de agua someros cercanos a la falla de El Camp, con temperaturas de hasta 81ºC a 52 metros de profundidad (IGME, 1984).

Gracias a proyectos de exploración y almacenamiento de hidrocarburos llevados a cabo por APEX en la década de los 70 y Enagás en los 90 y 2000 se dispone de datos de sondeos profundos y sísmica de reflexión 2D.

Mediante el análisis e interpretación de los datos geológicos, geofísicos y geoquímicos disponibles se ha tratado de evaluar el potencial geotérmico de la cuenca.

METODOLOGÍA

Los datos georreferenciados se han integrado en un sistema de información geográfica: geología de superficie (IGME, 2021), modelo digital del terreno (IGN, 2009-2015), gravimetría (Ayala *et al.*, 2016) y estudios previos (ICGC, 2022). Estos datos han permitido delimitar la cuenca y delinear grandes rasgos estructurales en superficie y en el subsuelo.

Se dispone de análisis geoquímicos de muestras de agua procedentes de pozos someros en anomalías termales (IGME, 1984). Se han analizado gráficamente y aplicado geotermómetros utilizando la hoja de cálculo desarrollada por Powell y Cummings (2010).

Los sondeos profundos han permitido estimar temperaturas a distintas profundidades, derivar un gradiente geotermal regional/conductivo, así como evaluar los potenciales almacenes que podrían contener recursos geotermales.

La sísmica de reflexión, junto al resto de datos, ha permitido generar mapas estructurales de las distintas unidades cronoestratigráficas. A partir de estas superficies se ha generado un modelo geológico 3D de la cuenca que ha permitido analizar la distribución de las distintas unidades y temperaturas en el subsuelo.

RESULTADOS

Las muestras de agua de pozos someros con anomalías termales muestran anomalías geoquímicas. Estas anomalías geoquímicas son proporcionales a la temperatura medida y disminuyen en general con la distancia a la máxima anomalía. De esos cambios de temperatura y geoquímica se deduce que el agua geotermal surge de niveles profundos y se mezcla con el acuífero dulce somero en materiales cenozoicos. La muestra MB-15 es la de mayor temperatura, con 81ºC en un pozo de 52 m de profundidad. Se trata de agua clorurada-sódica, con una salinidad de 2 g/l, que muestra equilibrio parcial con temperaturas de equilibrio en un rango de 140ºC a 160ºC en base a geotermómetros de sílice y distintas combinaciones de Na-K-Ca-Mg.

Los análisis geoquímicos de muestras de agua procedentes de una prueba de producción en el Dogger del sondeo Reus-1 (APEX, 1976) indican que se trata de agua clorurada-sódica, con una salinidad de 31 g/l, en equilibrio parcial con un rango de temperatura de equilibrio entre 120ºC y 150ºC en base a geotermómetros de Na-K-Ca-Mg. Desafortunadamente no se dispone del contenido en sílice en estas muestras.

Los sondeos profundos disponen de medidas de temperatura a distintas profundidades. Cuando ha sido posible se han aplicado correcciones a las temperaturas medidas utilizando el tiempo desde la última circulación y entre distintas medidas. En ocasiones se observa que la temperatura medida en el pozo está enfriada respecto a la temperatura de formación por las continuas pérdidas de lodo durante la perforación. Con los datos disponibles se estima una temperatura en la zona de los sondeos del Jurásico de unos 60ºC a unos 1500 m de profundidad y unos 65ºC en el Triásico a unos 1700 m de profundidad. Se estima por tanto un gradiente geotérmico medio de unos 30ºC/Km.

Las pérdidas totales de lodo durante la perforación en las dolomías del Dogger es un indicador de alta permeabilidad debida a fracturación y/o karstificación. Estas zonas de pérdidas coinciden con intervalos de decenas de metros de baja resistividad, velocidad y densidad en las diagrafías.

A partir de la interpretación sísmica se ha generado un modelo geológico 3D que permite analizar la distribución de las distintas unidades y temperaturas en el subsuelo. El rango de temperaturas del Jurásico, Triásico y Paleozoico en el depocentro de la cuenca se superpone con los resultados de la geotermometría en los pozos someros anómalos.

CONCLUSIONES

A pesar de no haber encontrado evidencias de un gradiente geotérmico conductivo elevado por adelgazamiento cortical, la presencia de anomalías térmicas someras cercanas a la falla de El Camp indica la presencia de circulación convectiva de fluidos asociada a la falla, bien desde el depocentro de la cuenca, bien desde la cordillera Prelitoral.

La presencia del Dogger con alta permeabilidad está probada por sondeos a profundidades intermedias y temperaturas moderadas y se espera en base a la sísmica 2D que se extienda hacia el suroeste a mayor profundidad y temperatura. Es posible que este acuífero fósil profundo alimente las anomalías térmicas y geoquímicas someras por circulación a través de la falla de El Camp, además de, hipotéticamente, la posible recarga meteórica a través del basamento fracturado aflorante en la cordillera Prelitoral. Estos distintos aportes y procesos de mezcla podrían explicar las diferencias de salinidad medidas entre los sondeos someros y profundos.

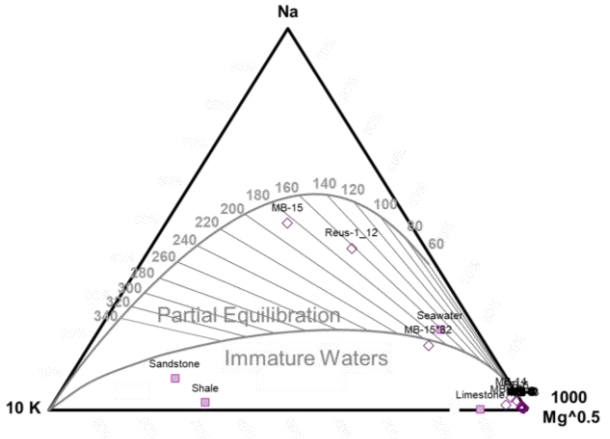


FIGURA 1. *Gráfico ternario Na-K-Mg de los análisis de muestras de agua del IGME (1984) y del sondeo profundo Reus-1 (APEX, 1976). La muestra MB-15 y la del sondeo profundo Reus-1 son las únicas en la zona de equilibrio parcial.*

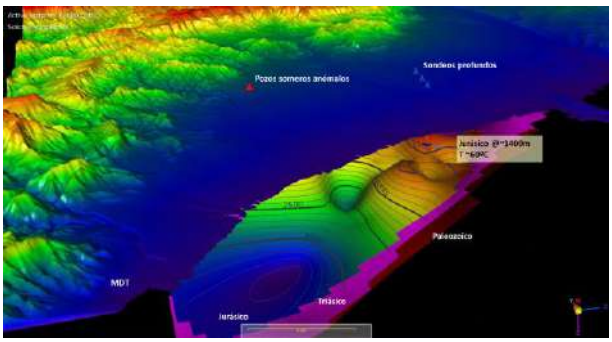


FIGURA 2. *Modelo digital del terreno, superficies procedentes de la interpretación sísmica 2D y localización de los sondeos profundos y pozos someros anómalos.*

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a Repsol por el permiso para la publicación de este trabajo, así como a todas las entidades y personas que han participado en la adquisición de los datos de los cuales nos hemos servido para llevar a cabo este estudio.

REFERENCIAS

APEX (1976). Informe geológico final del sondeo Reus-1.

Ayala, C., Bohoyo, F., Maestro, A., Reguera, M.I., Torne, M., Rubio, F., Fernàndez M., y García-Lobón, J.L. (2016). Updated Bouguer anomalies of the Iberian Peninsula: a new perspective to interpret the regional geology. *Journal of Maps*, 12:5, 1089-1092.

ICGC (2022). Visor Geoindex geotermia profunda.

IGME (1984). Estudio geotérmico preliminar del Prelitoral Catalán. *Proyecto de investigación geotérmica preliminar del Pirineo Oriental. Zona Meridional del Prelitoral Catalán e Islas Baleares*. Vol. 2.

IGME (2021). Mapa Geológico de España 1:50.000. Servidor ArcGIS.

IGN (2009-2015). Plan Nacional de Ortografía Aérea. MDT25 Modelo Digital del Terreno 1ª cobertura.

Powell, T. y Cummings, W. (2010). Spreadsheets for geothermal water and gas geochemistry. *Proceedings Stanford Geothermal Reservoir Engineering*.

Sàbat, F., Roca, E., Muñoz, J.A., Vergés, J., Santanach, P., Sans, M., Masana, E., Estévex, A. y Santisteban, C. (1995). Role of extension and compression in the evolution of the eastern margin of Iberia: the ESCI-Valencia Trough seismic profile. *Revista Sociedad Geológica España*, 8 (4).

Aplicación de Redes Bayesianas a la evaluación de riesgos del emplazamiento geológico de CO2 en Lopín, España.

Application of Bayesian Networks to the Risk Assessment of the CO2 Geological Site at Lopín, Spain.

A. Hurtado[1], S. Eguilior[1] y F. Recreo[1]

1 CIEMAT, Avda. Complutense 40, 28040 Madrid. Sonsoles.eguilior@ciemat.es , Antonio.hurtado@ciemat.es

Palabras clave: CO_2 Geological storage, Saline aquifer, Risk assessment, Bayesian Belief Networks.

Resumen

Este artículo presenta el uso de Redes Bayesianas de Creencias (BBN) para evaluar el riesgo ambiental en el almacenamiento geológico de CO2 (Kaikkonen *et al.*, 2021) dentro del contexto del cambio climático. La BBN estima el riesgo para la salud, seguridad y medio ambiente (HSE) por fuga del CO2 inyectado en acuíferos salinos profundos. Su utilidad radica en el análisis de escenarios y su capacidad predictiva de los riesgos medioambientales. La BBN fue aplicada a un emplazamiento específico, Lopín, al sur de la cuenca del Ebro, una estructura identificada a priori como favorable para el almacenamiento geológico. El trabajo también incluye la conceptualización del modelo y su parametrización, identificando la estructura causal, a través del desarrollo de un diagrama de influencias y asignación de estados y probabilidades a cada variable del sistema (Hurtado *et al.*, 2014). Los datos provienen de diversas fuentes, como datos observados, ecuaciones probabilísticas, simulaciones y la elicitación estructurada de expertos, crucial en las primeras etapas de evaluación de sitios. El modelo BBN permite analizar escenarios para evaluar cambios en las probabilidades de resultados y determinar estados necesarios para resultados deseados. Este enfoque mejora la función predictiva al perturbar las variables de entrada según la información proporcionada por los estudios de caracterización del emplazamiento.

Abstract

This article presents the use of Bayesian Belief Networks (BBN) to assess environmental risk in the geological storage of CO2 (Kaikkonen *et al*., 2021) in the context of climate change. The BBN estimates health, safety, and environmental (HSE) risks from the leakage of injected CO2 into deep saline aquifers. Its utility lies in scenario analysis and its predictive capacity for environmental risks. The BBN was applied to a specific site, Lopín, in the south of the Ebro basin, a structure identified a priori as favorable for geological storage. The work also encompasses the conceptualization of the model, its parameterization, and application to a specific site, identifying the causal structure through the development of an influence diagram and assigning states and probabilities to each variable in the system (Hurtado *et al.*, 2014). Data comes from various sources, including observed data, probabilistic equations, simulations, and structured expert elicitation, crucial in the early stages of site assessment. The BBN model allows for scenario analysis to assess changes in outcome probabilities and determine necessary states for desired outcomes. This approach enhances predictive function by perturbing input variables according to information provided by site characterization studies.

Referencias

Kaikkonen, L., Parviainen, T., Rahikainen, M., Uusitalo, L. and Lehikoinen, A. (2021). Bayesian Networks in Environmental Risk Assessment: A Review. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17 (1): 62-78. https://doi.org/10.1002/ieam.4332

Hurtado, A., Eguilior, S. and Recreo, F. (2014). Methodological development of a probabilistic model for CO2 geological storage safety assessment. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5, 84. https://doi.org/10.1007/s40095-014-0084-6

Desarrollo de soluciones para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno en cavernas de sal (proyecto H2SALT).

Development of solutions for underground hydrogen storage in salt caverns (H2SALT project).

E. Larrondo[1], I. Santamaría[1], J.F. Mediato[2], E. R. Berrezueta[2], I. Velasco[3]

1 Departamento de Innovación, Grupo Tecnologías del Hidrógeno. Departamento de Geología. TEAM Group, 48060 Derio. isantamaria@teamingenieria.com, elarrondo@teamingenieria.com
2 Departamento de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica, IGME-CSIC. jf.mediato@igme.es, e.berrezueta@igme.es
3 TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Mikeletegi Pasealekua 2, 20009 Donostia-San Sebastián. ion.velasco@tecnalia.com

Palabras clave: Hidrógeno, almacenamiento subterráneo, caverna salina, energía.

Resumen

La integración de nuevos productos y soluciones para el sector creciente del hidrógeno renovable es uno de los mayores retos para la descarbonización e independencia energética. Actualmente, a nivel nacional o europeo, la tecnología de almacenamiento subterráneo de hidrógeno está en desarrollo y existe cierto desconocimiento y limitaciones para disponer de un sistema de almacenamiento a gran escala. De este modo, el proyecto H2SALT pretende investigar y desarrollar las soluciones tecnológicas necesarias para el almacenamiento de hidrógeno subterráneo en cavernas de sal, de forma segura, eficiente y rentable.

Para lograr este objetivo, el proyecto H2SALT desarrolla diferentes actividades, entre lo que se encuentran, el estudio y caracterización de las facies evaporíticas para determinar el comportamiento/respuesta de las infraestructuras en contacto con H_2 bajo condiciones de servicio, el desarrollo de sistemas de inyección y extracción de H_2 resistentes al medio salino, el estudio y diseño de instalaciones superficiales y auxiliares necesarios para llevar a cabo el desarrollo del proyecto de almacenamiento en caverna salina y el estudio de viabilidad y de mercado.

Agradecimientos: Proyecto H2SALT Desarrollo de soluciones para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno en cavernas de sal (TEAM, TTI, TUBOS REUNIDOS, TAMOIN, ACE, SIDEREX e IBERDROLA) y colaboradores (TECNALIA, TUBACEX INNOVACIÓN e IGME)

Abstract

The integration of new products and solutions for the growing renewable hydrogen sector is one of the biggest challenges for decarbonization and energy independence. Currently, at national or European level, underground hydrogen storage technology is under development and there is a certain lack of knowledge and limitations for a large-scale storage system. Thus, the H2SALT project aims to research and develop the necessary technological solutions for storing hydrogen underground in salt caverns in a safe, efficient, and cost-effective manner.

To achieve this goal, the H2SALT project is developing different activities, including the study and characterization of evaporite facies to determine the behavior/response of infrastructures in contact with H_2 under service conditions, the development of H_2 injection and extraction systems resistant to the saline environment, the study and design of surface and auxiliary installations necessary to carry out the development of the salt cavern storage project and the feasibility and market study.

Acknowledgements: H2SALT Project Development of solutions for underground storage of hydrogen in salt caverns (TEAM, TTI, TUBOS REUNIDOS, TAMOIN, ACE, SIDEREX and IBERDROLA) and collaborators (TECNALIA, TUBACEX INNOVACIÓN and IGME).

Evaluación del potencial de almacenamiento geológico subterráneo de CO_2 y energía en las plataformas continentales mediterránea y cantábrica: Proyecto SEASTORAGE

Potential assessment for geological storage of CO_2 and energy on the Mediterranean and Cantabrian continental shelves: Proyecto SEASTORAGE

A. Maestro[1], F. Bohoyo[1], M.G. García Rodríguez[1], B. Benjumea[1], M. Druet[1], P. Fernández-Canteli[2], J. García Crespo[2], J. García Mayordomo[1], E. Llave[1], C. Marín Lechado[1], R. Martín Banda[3], J. Martín León[2], J. Mediato[2], C. Rey Moral[1], A. Robador[1], M. Rodrigo[1], F.M. Rubio[1], A. Franco[4], J. García Portero[4], L. Cortés[4], S. Ledesma[5], F. Pángaro[6] y I. Cameselle[6]

1 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC. C/ Calera, 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. a.maestro@igme.es; f.bohoyo@igme.es; mg.garcia@igme.es; b.benjumea@igme.es; m.druet@igme.es; julian.garcia@igme.es; e.llave@igme.es; c.marin@igme.es; c.rey@igme.es; a.robador@igme.es; m.rodrigo@igme.es; fm.rubio@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC. C/ Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid. paula.canteli@igme.es; garcia.crespo@igme.es; j.martin@igme.es; jf.mediato@igme.es
3 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC. Plaza de España, Torre Norte, 41013, Sevilla. r.martin@igme.es
4 Ente Vasco de la Energía. Alameda de Urquijo, 36, 1º. Edificio Plaza Biskaia, 48011 Bilbao. afranco@eve.eus; jgarcia@eve.eus; lcortes@eve.eus
5 Trinity Energy Storage. Madrid. sledesma@trinity-es.com
6 Repsol. C/ Méndez Álvaro, 44, 28045 Madrid. francisco.pangaro@repsol.com; icameseller@repsol.com

Resumen: El proyecto SEASTORAGE pretende evaluar el potencial y la tipología para el Almacenamiento Subterráneo de Gas (UGS, por sus siglas en inglés) de CO_2, H_2 u otras formas de energía mediante un estudio sistemático de la geología del subsuelo de las plataformas continentales del Mediterráneo y del Cantábrico, caracterizando su naturaleza, estructura, geometría y propiedades físicas. Para alcanzar el objetivo general, se llevarán a cabo las siguientes actividades: 1) Recopilación de la información geológica y geofísica existente para la identificación y caracterización de las estructuras geológicas favorables para actuar como almacenes; 2) Caracterización petrofísica de las formaciones potenciales almacén/sello; 3) Generación de modelos geológicos y geofísicos en 3D; 4) Análisis de riesgo sísmico de las áreas potenciales de UGS en relación con la actividad sísmica del área estudiada dentro del contexto geodinámico y/o debida a la reactivación de fallas preexistentes durante la inyección de fluidos; y 5) Establecimiento de la capacidad de almacenamiento de las estructuras geológicas estudiadas y clasificación de las estructuras seleccionadas.

Palabras clave: Bases de Datos Geofísicos, Modelos Geológicos 3D, Transición Ecológica.

Abstract: *The SEASTORAGE project aims to assess the potential and typology of Underground Gas Storage (UGS) of CO_2, H_2 or other forms of energy through an underground geology systematic study of the Mediterranean and Cantabrian continental shelves, characterising their nature, structure, geometry, and physical properties. In order to achieve the general objective, the following activities will be carried out: 1) Compilation of existing and available geological and geophysical information for the identification and characterisation of geological structures favourable for geological storage; 2) Petrophysical characterisation of potential storage and seal formations; 3) Generation of 3D geological and geophysical models; 4) Seismic risk analysis of potential UGS areas in relation to the intrinsic seismic activity of the studied area within the geodynamic context in which it is located and/or conditioned by the reactivation of pre-existing faults during fluid injection processes; and 5) Establishing the storage capacity of the geological structures studied and ranking the selected structures according to criteria of favourability and reliability.*

Key words: *Geophysical Databases, 3D Geological Modelling, Ecological Transition.*

INTRODUCCIÓN

El proyecto SEASTORAGE fue solicitado en la convocatoria 2021 de proyectos estratégicos orientados a la transición ecológica y a la transición digital, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación para el período 2021-2023, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Es un proyecto centrado en la generación de conocimiento científico que dio comienzo el 1 de diciembre de 2022 y que tiene una duración de dos años. La actividad propuesta en el proyecto se enmarca dentro de dos de los objetivos medioambientales que sustentan la transición ecológica, recogidos en el Reglamento (UE)

2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2020: la mitigación del cambio climático y la prevención y control de la contaminación. En particular, la actividad del proyecto aborda aspectos como la descarbonización y el desarrollo del almacenamiento de energía.

El proyecto SEASTORAGE está compuesto por 21 miembros, que conforman el Equipo de Investigación y el Equipo de Trabajo. Todos los miembros del Equipo de Investigación son investigadores del IGME, CSIC y cuentan con amplia experiencia en las técnicas que se consideran utilizar para alcanzar los objetivos principales del proyecto. Además, investigadores de las empresas Ente Vasco de la Energía (EVE), Sociedad de Hidrocarburos de Euskadi (SHESA), Trinity Energy Storage y Repsol apoyarán las actividades desarrolladas.

El proyecto SEASTORAGE pretende evaluar el potencial y la tipología del Almacenamiento Subterráneo de Gas (UGS) de CO_2, H_2 u otras formas de energía mediante un estudio sistemático de geología subterránea de las plataformas continentales mediterránea y cantábrica, caracterizando su naturaleza, estructura, geometría y propiedades físicas. Para alcanzar el objetivo general en este proyecto se llevarán a cabo los siguientes subobjetivos 1) Recopilación de información geológica y geofísica existente y disponible para la identificación y caracterización de estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico; 2) Caracterización petrofísica de potenciales formaciones de almacenamiento y sellado; 3) Generación de modelos geológicos y geofísicos 3D y bases de datos asociadas de los emplazamientos de almacenamiento seleccionados; 4) Análisis del riesgo sísmico de las áreas potenciales de UGS en relación con la actividad sísmica intrínseca del área estudiada dentro del contexto geodinámico en el que se encuentra y/o condicionada por la reactivación de fallas preexistentes durante los procesos de inyección de fluidos; y 5) Establecimiento de la capacidad de almacenamiento de las estructuras geológicas estudiadas y clasificación de las áreas seleccionadas según criterios de favorabilidad y fiabilidad. La condición de partida es que las zonas seleccionadas tengan una estructura tectónica sencilla y fácilmente modelizable, que estén situadas en un contexto geodinámico estable y que incluyan una o varias formaciones geológicas con suficiente espesor, extensión, capacidad de almacenamiento, aislamiento y estanqueidad.

Este proyecto pretende profundizar en el conocimiento de la estructura geológica de las plataformas continentales mediterránea y cantábrica, integrando información geológica, geofísica y de sondeos. El proyecto abarca la investigación y desarrollo de modelos geológicos 3D y aspectos de análisis estructural, en un intento de dar respuesta a los requerimientos establecidos por la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre Almacenamiento Geológico de Carbono, la Ley 40/2010 de almacenamiento geológico de dióxido de carbono en la legislación nacional española, y la Estrategia de Almacenamiento Energético aprobada por el Gobierno de España el 9 de febrero de 2021. El cumplimiento de estos objetivos implica la realización de trabajos de investigación en disciplinas geológicas básicas, como la geología estructural, la estratigrafía o la petrología, y la aplicación rigurosa de métodos y técnicas geofísicas para determinar con la mayor precisión posible la geometría y propiedades de las diferentes unidades del subsuelo. La justificación del estudio sobre el establecimiento de estructuras geológicas favorables al almacenamiento en la plataforma continental se debe a: 1) numerosos estudios que avalan que el almacenamiento en plataformas continentales minimiza algunos de los riesgos de la inyección de CO_2, favoreciendo la aceptación pública de esta tecnología, ya que aumenta la estabilidad del CO_2 al estar sometido a un régimen de altas presiones y temperaturas, y al estar todos los poros saturados de agua, que actúa como un manto de flotabilidad, asegurando la estabilidad gravitatoria del CO_2. Esto garantiza que, aunque se produjeran importantes perturbaciones geomecánicas en el almacén y en el sello, como terremotos, y fracturasen las formaciones geológicas, éstas no actuarían como conductos de fuga de CO_2; 2) la existencia de una amplia base de datos geológicos y geofísicos *offshore* de libre acceso, que proporciona una sólida base para la generación de conocimiento.

METODOLOGÍA

La metodología a seguir para alcanzar los resultados propuestos será la siguiente:

1. Recopilación de datos geológicos y geofísicos, principalmente perfiles sísmicos multicanal y registros geofísicos de sondeos a partir de la información proporcionada por las compañías petroleras de las zonas estudiadas y localizados en las bases de datos de acceso abierto SIGEOF (Sistema de Información Geofísica, IGME, CSIC, https://info.igme.es/SIGEOF/) y ATH (Archivo Técnico de Hidrocarburos, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico https://geoportal.minetur.gob.es/ATHv2/welcome.do), (Fig. 1). Además, se obtendrán datos de campos potenciales de bases de datos internacionales de acceso abierto. Por último, también se revisarán las referencias bibliográficas, los informes técnicos, las tesis doctorales y los informes de sondeos.

2. Digitalización y georreferenciación de secciones sísmicas y registros de sondeos a partir de formato papel o imagen en función de su calidad y disponibilidad de la navegación y registro continuo de los diferentes parámetros físicos obtenidos a lo largo de los sondeos.

3. Interpretación de los perfiles sísmicos mediante software de interpretación sísmica que permita la integración de diferentes tipos de datos (mapas,

horizontes, fallas, superficies, sísmica 2D y registros geofísicos de sondeos). Una vez realizada la interpretación sísmica de las unidades principales, se procederá a generar las superficies que definen las capas límite entre unidades georreferenciadas en TWT. A partir de esta información se obtendrá la cartografía de isobatas e isopacas de las diferentes unidades geológicas diferenciadas.

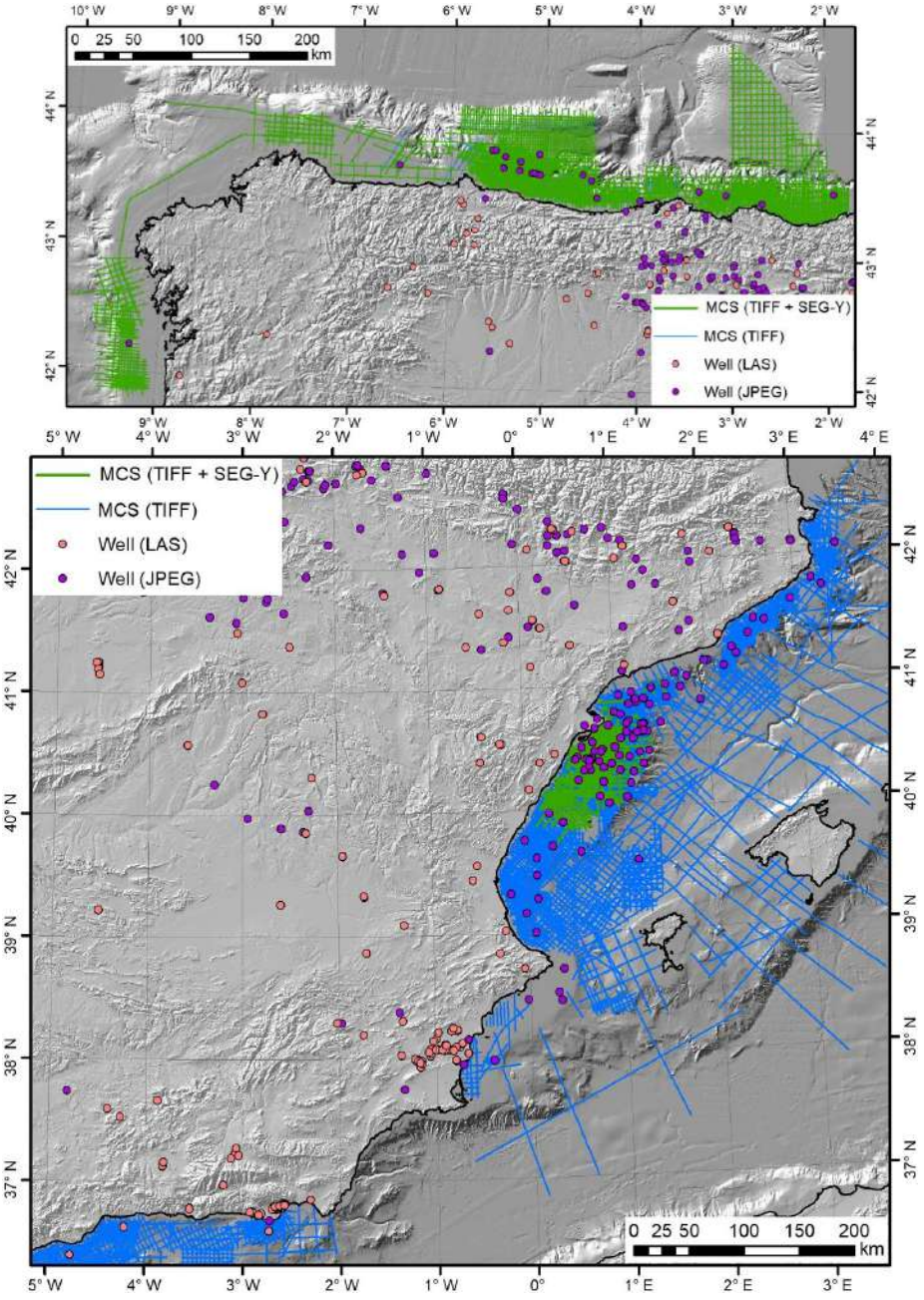


FIGURA 1. *Localización de los perfiles sísmicos en formato SEGY o imagen, así como de los sondeos en formato LAS o imagen, en las plataformas continentales Cantábrica (figura superior) y Mediterránea (figura inferior).*

4. Construcción de modelos de velocidad sísmica para la conversión/migración de capas límite desde el dominio de tiempos al de profundidad. Para la obtención de estos datos se considerará la siguiente información de velocidad sísmica para las diferentes interfases: datos de sondas XBT (*eXpendable BathyThermographer*) para determinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en la columna de agua, experimentos de refracción, registros geofísicos de sondeos, velocidad sísmica de intervalo obtenida a partir de la información de las secciones sísmicas, y otras aportaciones bibliográficas para determinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo.

5. Análisis litológico y petrofísico a partir del

análisis de los registros geofísicos. La interpretación litológica en las formaciones geológicas se llevará a cabo mediante dos técnicas: la zonificación de los registros y el uso de gráficos cruzados o agrupaciones de registros múltiples. Se llevarán a cabo estimaciones de parámetros petrofísicos necesarios para la caracterización de las formaciones sello y reservorio tales como: volumen de arcilla a partir del registro de radiactividad gamma natural, porosidad sónica a partir del registro sónico, porosidad por densidad derivada del registro de densidad aparente, y estimación cualitativa de la permeabilidad mediante registros de resistividad LLD y LLS.

6. La caracterización de la peligrosidad sísmica potencial de los emplazamientos seleccionados se llevará a cabo en tres niveles de detalle diferentes. En el primer nivel, se reevaluará la peligrosidad sísmica regional de la zona de trabajo a partir de los catálogos sísmicos existentes. En el siguiente nivel, en las zonas identificadas como interesantes, se estudiarán la distribución y las características de la sismicidad, así como la estructura tectónica y la actividad reciente de las fallas. En el siguiente nivel, a escala de trabajo de almacenamiento/sellado, se caracterizarán todas las fallas de la zona de almacenamiento/sellado y sus alrededores. Se determinará su grado de actividad y su tasa de deslizamiento y se calculará su potencial sismogénico.

7. Construcción y validación de modelos geofísicos y geológicos en 3D. Los modelos geofísicos 3D basados en datos de campo potenciales (gravedad y magnetismo) permitirán ampliar la geometría de los límites principales en ausencia de otros datos geológicos o geofísicos directos y alimentarán la construcción del modelo geológico 3D. El modelo geológico 3D facilita la visualización de las estructuras y el cálculo del volumen de roca que actuará como posible almacenamiento y determinará la geometría y extensión del sello.

8. Evaluar el potencial y la tipología de almacenamiento geológico de las estructuras identificadas en términos de capacidad de almacenamiento estimada. Los datos recogidos permitirán analizar y estimar la capacidad potencial de almacenamiento, y junto con sus diferentes niveles de confianza, establecer el nivel de madurez de la capacidad estimada calculada e identificar futuras actuaciones.

ALCANCE DEL PROYECTO

Desde el punto de vista científico-técnico, este proyecto pretende avanzar en el conocimiento de la estructura geológica del margen continental español, pero en particular, el proyecto permitirá profundizar en la investigación sobre: 1) Incrementar el conocimiento de la estructura geológica profunda de la plataforma continental mediterránea y cantábrica, centrándose en aspectos relacionados con su potencial como almacén de CO_2 y energía. Esta información es esencial para que los científicos nacionales e internacionales y la comunidad técnica puedan evaluar la capacidad de almacenamiento, y para permitir la planificación estratégica del desarrollo del almacenamiento para el desarrollo de un plan de cambio climático a nivel estatal. Esta información también será vital para el próximo "Atlas Europeo de Almacenamiento Energético Sostenible" solicitado por la Comisión Europea; y 2) Armonización de los datos y modelos geológicos que se utilizarán y desarrollarán en el marco del proyecto SEASTORAGE para cumplir con los principios de estandarización de datos FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable and Reusable*) para la gestión y administración de datos científicos.

En términos de impacto social y económico, abordar los problemas del cambio climático, como el almacenamiento de energía, proporcionará oportunidades clave para una transición energética limpia y para alcanzar el objetivo de cero emisiones para 2050. En concreto, las temáticas abordadas en la propuesta responden al eje estratégico V: Clima, energía y movilidad, en línea con las propuestas por la Unión Europea en el programa marco para la financiación de actividades de I+D+i "Horizonte Europa" y el acuerdo de prioridades alcanzado en el "Pacto Verde Europeo", que incluye el cambio climático y la descarbonización; la movilidad sostenible y los retos de las ciudades y ecosistemas sostenibles. Además, el objetivo del proyecto también está vinculado a los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas: 1) ODS 7 Energía asequible y limpia: El proyecto proporcionará información fiable para apoyar futuros estudios de almacenamiento geológico en las zonas del proyecto, lo que repercutirá en la lucha contra las emisiones de CO_2 o en el aumento del almacenamiento de energía; 2) ODS 9 Industria, innovación e infraestructuras: Uno de los resultados del proyecto será el desarrollo de bases de datos que favorecerán el intercambio y la colaboración entre investigadores y empresas; 3) ODS 13 Acción por el clima: Este proyecto tiene un fuerte vínculo con la acción por el clima, ya que sus resultados contribuirán a la estrategia de descarbonización con la caracterización del almacenamiento geológico de CO_2 y aportarán información relevante para futuros estudios sobre el almacenamiento de hidrógeno como ejemplo de recurso renovable.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto SEASTORAGE (proyecto de Transición Ecológica y Transición Digital con referencia TED2021-129816B-I00, financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/PRTR-C21 y por la Unión Europea NextGenerationEU).

Almacenamiento energético en acuíferos mediante sistemas de bombeo-inyección: aproximación al estudio del potencial en el norte de España.

Energy storage in aquifers through pumping-injection systems: an approach to the study of the potential in northern Spain.

A. L. Marqués Sierra[1], P. Cienfuegos[2] y I. Jares[3]

1 Grupo de modelización matemática (ICTEA). Independencia 13, 33004 Oviedo. Principado de Asturias, Universidad de Oviedo, marquesantonio@uniovi.es
2 Dpto. Explotación y Prospección de Minas, Independencia 13, 33004 Oviedo, Principado de Asturias, Universidad de Oviedo, cienfuegospablo@uniovi.es
3 Cimbra Ingeniería S.L., C/ Melquiades Cabal, 2 - 5 J, 33011 Oviedo, Principado de Asturias, ivan.jares@gmail.com

Palabras clave: Almacenamiento energético, hidroelectricidad, Picos de Europa, sostenibilidad.

Resumen

En un mundo impulsado por el aumento de la demanda energética y la transición hacia fuentes renovables de energía, la búsqueda de soluciones eficientes y sostenibles para el almacenamiento de energía se ha convertido en un imperativo. En este contexto, los acuíferos surgen como una opción prometedora y poco convencional para el almacenamiento de energía. La capacidad de transformar la energía sobrante en periodos de alta generación en recursos hídricos subterráneos en una reserva explotable presenta una perspectiva innovadora para abordar los retos asociados a la intermitencia de las fuentes renovables y la gestión eficiente de la oferta y la demanda de energía. En este trabajo se examinara cómo el almacenamiento de energía en los acuíferos no sólo contribuye a la estabilidad de la red eléctrica, sino que también puede tener importantes repercusiones en la mitigación del cambio climático y la promoción de un sistema energético más sostenible.

En este trabajo se presenta un estudio del potencial de almacenamiento de energía en acuíferos como una alternativa a los modelos convencionales. El trabajo se centra en los acuíferos de los macizos calcáreos del norte de España, analizando la casuística especifica del área de Poncebos-Caín como caso de estudio.

Abstract

In a world driven by increasing energy demand and the transition to renewable sources, the search for efficient and sustainable energy storage solutions has become imperative. In this context, aquifers emerge as a promising and unconventional option for energy storage. The ability to transform surplus energy in periods of high generation in groundwater resources into an exploitable reserve presents an innovative perspective to address the challenges associated with the intermittency of renewable sources and the efficient management of energy supply and demand. In this paper, we will examine how energy storage in aquifers not only contributes to the stability of the electricity grid, but can also have significant impacts on climate change mitigation and the promotion of a more sustainable energy system.

This paper presents a study of the potential for energy storage in aquifers as an alternative to conventional models. The work focuses on the aquifers of the limestone massifs of northern Spain, analysing the specific casuistry of the Poncebos-Caín area as a case study.

Referencias

Pendas, F., Laredo, J.L., Marqués Sierra, A.L., García, E., García, R., Cienfuegos, P. (2010) Recursos hídricos en Asturias. Análisis, reflexiones y alternativas. INFIDE. 226 p. doi: 10.6084/m9.figshare.23601159

Almacenamiento geológico de la energía: revisión de oportunidades.

Geological energy storage: a review of opportunities.

A. L. Marqués Sierra[1], P. Cienfuegos Suárez[2] y I. Jares Salguero[3]

1 Grupo de modelización matemática (ICTEA). Independencia 13, 33004 Oviedo. Principado de Asturias, Universidad de Oviedo, marquesantonio@uniovi.es
2 Dpto. Explotación y Prospección de Minas, Independencia 13, 33004 Oviedo, Principado de Asturias, Universidad de Oviedo, cienfuegospablo@uniovi.es
3 Cimbra Ingeniería S.L., C/ Melquiades Cabal, 2 - 5 J, 33011 Oviedo, Principado de Asturias, ivan.jares@gmail.com

Resumen: Este trabajo explora las posibilidades y perspectivas en el campo del almacenamiento geológico de energía. La revisión abarca diversas tecnologías y métodos de almacenamiento geológico, desde el almacenamiento de hidrógeno en cavernas hasta el uso de yacimientos agotados para retener energía a largo plazo. Además, se examinan los desafíos y criterios de selección asociados con estos enfoques, destacando la importancia de considerar factores geoquímicos, la capacidad de sellado de las formaciones rocosas y posibles interacciones microbianas subterráneas. En él se proporciona una visión integral de las oportunidades en el campo del almacenamiento geológico de energía, subrayando su potencial para contribuir a una transición más sostenible y eficiente en el ámbito energético.

Palabras clave: Mina abandonada, geología, sostenibilidad, transición energética.

Abstract: *This paper explores the possibilities and prospects in the field of geological energy storage. The review covers various geological storage technologies and methods, from hydrogen storage in caverns to the use of depleted reservoirs for long-term energy retention. It also examines the challenges and selection criteria associated with these approaches, highlighting the importance of considering geochemical factors, the sealing capacity of rock formations and possible subsurface microbial interactions. It provides a comprehensive overview of the opportunities in the field of geological energy storage, highlighting its potential to contribute to a more sustainable and efficient energy transition.*

Key words: *Abandoned mine, geology, sustainability, energy transition.*

INTRODUCCIÓN

A medida que Europa avance hacia la reducción de su dependencia de los combustibles fósiles, su economía se apoyará cada vez más en las fuentes de energía renovable. Dado que las fuentes actuales de energía renovable a veces generan un suministro variable, resulta crucial almacenar energía para su uso cuando la oferta no logre satisfacer la demanda. Aunque las baterías representan un método común para el almacenamiento energético, el almacenamiento geológico subterráneo podría tener la capacidad de retener cantidades significativamente mayores de energía durante períodos más extensos en comparación con las soluciones de almacenamiento de baterías convencionales. Además, el almacenamiento geológico de energía exhibe una notable flexibilidad, ya que permite utilizar diversos materiales para almacenar energía en formas químicas, térmicas o mecánicas en diversos entornos subterráneos.

Este enfoque de almacenamiento geológico de energía no solo ofrece una capacidad de retención a largo plazo, sino que también presenta una versatilidad excepcional. La posibilidad de emplear diversos tipos de materiales para almacenar energía química, térmica o mecánica en diferentes entornos subterráneos amplía significativamente las opciones disponibles.

En este contexto, la transición hacia el almacenamiento geológico de energía se presenta como una estrategia prometedora para abordar los desafíos asociados con la intermitencia de las fuentes renovables. Además, al superar las limitaciones temporales y de capacidad de las baterías convencionales, este método ofrece la oportunidad de respaldar la estabilidad de la red eléctrica de manera más eficiente y sostenible.

El almacenamiento geológico de energía también destaca por su capacidad para adaptarse a diversas condiciones geológicas y climáticas, lo que lo convierte en una solución flexible y escalable. La elección de entornos subterráneos específicos y la diversidad de materiales utilizables permiten ajustarse a las necesidades específicas de cada región, contribuyendo así a la creación de soluciones personalizadas y eficaces.

En resumen, la evolución hacia el almacenamiento geológico de energía en Europa representa un paso significativo hacia un sistema energético más robusto, sostenible y capaz de hacer frente a la creciente demanda de fuentes de energía limpias y renovables. Este enfoque innovador no solo promete superar los desafíos actuales en el almacenamiento de energía, sino que también puede desempeñar un papel crucial en la transformación hacia

una matriz energética más resiliente y respetuosa con el medio ambiente.

ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE ENERGÍA: CONCEPTOS

El concepto de "almacenamiento geológico de energía" se refiere a la práctica de almacenar los recursos excedentes de energía en entornos subterráneos, tales como formaciones rocosas. Este método de almacenamiento energético es esencial para hacer frente a la variabilidad estacional de la demanda, garantizar reservas estratégicas y proporcionar energía constante cuando las fuentes renovables son inherentemente variables. Aunque gran parte de la tecnología asociada con el almacenamiento geológico de energía se encuentra en fase de investigación y desarrollo, se han implementado con éxito varios proyectos de almacenamiento subterráneo de gran escala en diferentes partes del mundo.

La necesidad de almacenamiento de energía radica en la naturaleza intermitente de algunas fuentes renovables, como la solar y la eólica. El exceso de energía generado durante períodos de alta producción puede almacenarse en formaciones rocosas subterráneas, permitiendo su liberación posterior cuando la demanda supera la capacidad de generación. Esto no solo aborda la variabilidad inherente de las fuentes renovables, sino que también contribuye a garantizar un suministro de energía constante y fiable.

Aunque la tecnología de almacenamiento geológico de energía se encuentra en una fase temprana de desarrollo, los avances en este campo son notables. Investigadores como Crotogino et al. (2017) y Matos et al. (2019) han estado liderando esfuerzos para comprender mejor los aspectos técnicos, geológicos y ambientales asociados con esta forma de almacenamiento energético. A pesar de estar en una etapa incipiente, la viabilidad y eficacia de esta tecnología se han demostrado a través de la implementación exitosa de proyectos de almacenamiento a escala industrial.

Las técnicas de almacenamiento geológico de energía se pueden clasificar en tres categorías principales:

Métodos Químicos: Estos métodos implican el almacenamiento de energía como potencial químico en enlaces químicos. Ejemplos de esta categoría incluyen el almacenamiento de metano o gas natural, líquidos de gas natural e hidrógeno.

Métodos Mecánicos: En esta categoría, la energía se almacena como potencial mecánico utilizando diversos materiales o fluidos. Algunos ejemplos comprenden el almacenamiento de energía mediante aire comprimido, con variaciones de temperatura constantes o variables; el almacenamiento de energía mediante la gravedad, utilizando cargas suspendidas; y el almacenamiento de energía hidroeléctrica mediante bombeo.

Métodos Térmicos: Estos métodos se centran en almacenar energía como diferencia de temperatura en materiales o fluidos, para su posterior utilización en aplicaciones como calefacción, refrigeración o procesos industriales como el secado.

La mayoría de estos contextos geológicos podrían ser aprovechados para más de una modalidad de almacenamiento de energía (figura 1). Sin embargo, las normativas nacionales, especialmente en lo que respecta a la propiedad del subsuelo y los posibles impactos sobre las aguas subterráneas, podrían actuar como un obstáculo. Estas limitaciones legales y medioambientales pueden incidir en la elección del lugar de implementación y representar un riesgo económico.

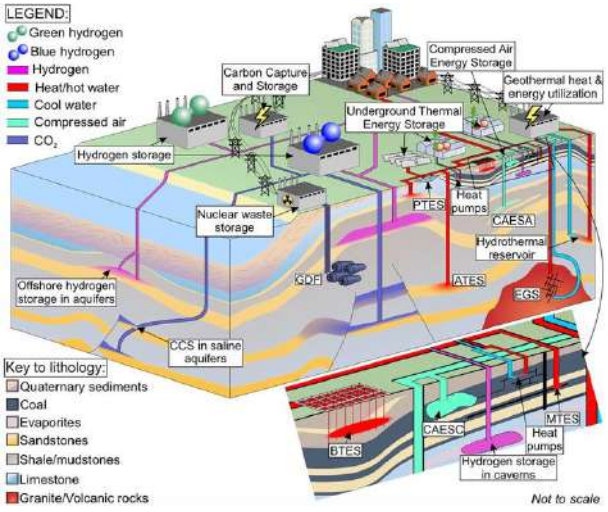


FIGURA 1. Ejemplos de métodos geológicos de almacenamiento de energía químicos, mecánicos y térmicos en posibles entornos subterráneos de una cuenca sedimentaria (Kaminskaite et al., 2022).

ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE ENERGÍA Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA: UNA PAREJA INSEPARABLE.

La transformación del panorama energético en Europa implica un cambio sustancial desde la producción y consumo de combustibles fósiles hacia una combinación que integra una mayor proporción de fuentes renovables y energía nuclear. Aunque las instalaciones de almacenamiento en baterías poseen tiempos de puesta en marcha breves y son capaces de suministrar energía rápidamente, su duración limitada y capacidad reducida son evidentes. En contraste, los métodos de almacenamiento geológico de energía pueden retener cantidades significativamente mayores durante períodos mucho más extensos, aunque los tiempos de puesta en marcha no sean tan ágiles (Aneke y Wang, 2016).

La implementación de una red eléctrica que incorpore proyectos de almacenamiento de energía de larga

duración, con más de 100 horas de capacidad de almacenamiento, podría conducir a una notable reducción en los costos de electricidad (Sepúlveda et al., 2021). El almacenamiento geológico de energía emerge como una solución práctica capaz de retener 100 horas o más de energía, proporcionando una alternativa viable.

A diferencia de las baterías, diseñadas principalmente para almacenar energía eléctrica, los métodos de almacenamiento geológico ofrecen la ventaja de poder almacenar energía química y térmica directamente. Esto significa que se puede utilizar para calefacción de espacios, entre otras aplicaciones, sin necesidad de pasar por la conversión a electricidad.

Además, el almacenamiento de energía química y térmica en este contexto no depende de los minerales críticos utilizados en las baterías, los cuales pueden experimentar escasez. Estas características distintivas consolidan el papel del almacenamiento geológico de energía como una contribución significativa para la transición energética en Europa, ofreciendo una solución versátil, eficiente y menos vulnerable a limitaciones de recursos (Pendas et al., 2010).

Un aspecto importante en el almacenamiento geológico de energía es el hidrógeno, ya sea en forma gaseosa, líquida o dentro de moléculas como el amoníaco, que tiene la capacidad de almacenar una cantidad sustancial de energía química. La utilización posterior de esta energía a través de pilas de combustible eléctricas o combustión presenta ventajas ambientales notables en comparación con el uso de combustibles fósiles.

Debido a las aplicaciones limpias del hidrógeno, se está llevando a cabo una investigación significativa centrada en su almacenamiento. Este gas versátil puede almacenarse subterráneamente, principalmente en cavernas de sal formadas por disolución y en yacimientos de gas agotados, aunque también se exploran otras opciones de almacenamiento. Dada la capacidad de la pequeña molécula de hidrógeno para desplazarse fácilmente a través de rocas permeables y su capacidad para interactuar químicamente con el entorno, es esencial aplicar criterios de selección adicionales al evaluar posibles lugares de almacenamiento. Estos criterios abarcan la capacidad de sellado de la roca que recubre la formación de almacenamiento y las posibles reacciones geoquímicas entre el hidrógeno y la roca huésped, así como las aguas subterráneas locales.

Además, se deben considerar las interacciones microbianas subterráneas, que podrían resultar en la conversión de parte del hidrógeno en metano, afectando la eficacia del almacenamiento. Aunque el hidrógeno puede producirse de diversas maneras, incluyendo fuentes de energía renovable y no renovable, se espera que las distintas formas de producción no afecten significativamente a la cantidad de hidrógeno que puede almacenarse en entornos geológicos. Este enfoque hacia el almacenamiento de hidrógeno no solo respalda las metas ambientales, sino que también requiere una cuidadosa consideración de los factores geológicos, químicos y biológicos para garantizar una implementación efectiva y sostenible.

CONCLUSIONES

En conclusión, la evaluación del potencial de almacenamiento geológico de energía se presenta de manera detallada en la Tabla 1, que expone las posibles combinaciones de métodos de almacenamiento geológico obtenidas durante estas evaluaciones iniciales. Se prevé que futuros análisis consideren otras combinaciones de métodos de almacenamiento y diversos entornos geológicos, con el objetivo de estimar los recursos totales de almacenamiento en zonas específicas.

Entorno de almacenamiento	Método de almacenamiento geológico de energía		
	Químico	Térmico	Mecánico
Yacimientos de hidrocarburos agotados	Posible	Posible	No aplicable
Huecos en domos salinos	Posible	No aplicable	Posible
Minas abandonadas	Posible	Posible	Posible
Acuíferos no potables	Posible	Posible	No aplicable

TABLA I. *Resumen de las combinaciones actuales o probables de métodos y entornos de almacenamiento geológico de energía.*

El almacenamiento geológico, ya sea en cavernas de sal extraídas por disolución, yacimientos de gas agotados u otros entornos, destaca como una opción prometedora. Sin embargo, la implementación exitosa de estas soluciones requiere un enfoque cuidadoso. La movilidad de la pequeña molécula de hidrógeno a través de rocas permeables y su capacidad para interactuar químicamente con el entorno destacan la necesidad de aplicar criterios de selección adicionales al evaluar posibles lugares de almacenamiento. Estos criterios abarcan la capacidad de sellado de la roca que recubre la formación de almacenamiento y las posibles reacciones geoquímicas entre el hidrógeno y la roca huésped o las aguas subterráneas del lugar.

Además, consideraciones como las interacciones microbianas subterráneas, que podrían generar la conversión del hidrógeno en metano, plantean desafíos adicionales que deben abordarse para garantizar la eficacia del almacenamiento. La producción diversa de hidrógeno, proveniente tanto de fuentes renovables como no renovables, contribuye a su viabilidad como fuente energética, sin que se espere que la variante del hidrógeno afecte significativamente la cantidad que puede almacenarse en entornos geológicos. En este sentido, el almacenamiento geológico de energía se presenta como un componente integral y prometedor en

la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles y eficientes.

REFERENCIAS

Aneke, M., y Wang, M. (2016): Energy storage technologies and real life applications–A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350-377. doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.097.

Crotogino, F., Schneider, G. S., y Evans, D. J. (2018): Renewable energy storage in geological formations. En: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 232(1), 100-114.. doi: 10.1177/0957650917731181

Kaminskaite, I., Piazolo, S., Emery, A.R., Shaw, N.D., Fisher, Q. (2022): The importance of physiochemical processes in decarbonisation technology applications utilizing the subsurface: A review. En: *Earth Science, Systems and Society*, 2. 10043.

Matos, C.R., Carneiro, J.F., Silva, P. (2019): Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. En *Journal of Energy Storage*, 21: 241-258. doi: 10.1016/j.est.2018.11.023.

Pendás, F., Laredo, J.L., Marqués, A.L., García, E., García, R., Cienfuegos, P. (2010): Recursos hídricos en Asturias. Análisis, reflexiones y alternativas. INFIDE. 226 p. doi: 10.6084/m9.figshare.23601159

Sepulveda, N. A., Jenkins, J. D., Edington, A., Mallapragada, D. S., y Lester, R. K. (2021): The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems. *Nature Energy*, 6(5), 506-516. Doi: 10.1038/s41560-021-00796-8

Nueva aproximación multidisciplinar a la caracterización de fallas activas, y su interacción y control de los procesos geotérmicos y sísmicos del NW de la Península (Proyecto FACTER)

New multidisciplinary approach to the characterization of active faults, and their interaction and control of geothermal processes and seismicity in the NW Iberian Peninsula (FACTER project)

F. Martín-González[1], P. Araujo[2], A.G. Bruzón[1], S. Cesca[3], M.R. Carvalho[4], P. M Carreira[5], J.A. Cid[2], C. Crespo-Martín[1], P. Farias[6], G. Schreurs[7]; S. González-Muñoz[1], B. Gonzalo[8], S. Hainzl[3], N. Heredia[8], A. Jiménez-Díaz[1], B. López-Mir[1], J.M. Marques [5], R. Marrero[8], M. Meléndez[8], C.J. Novillo[1], A. Olaiz[9], M. Rincón[1], P. Villamor[10]

1 Universidad Rey Juan Carlos, C /Tulipán s/n, 28933, Móstoles, España fidel.martin@urjc.es; adrian.bruzon@urjc.es
2 Universidade de Vigo, Facultade de Ciencias, 32004 Ourense, España araujo@uvigo.gal; joseangel@xeoaquis.com;
3 GFZ Telegrafenberg, D-14473, Germany cesca@gfz-potsdam.de; hainzl@gfz-potsdam.de
4 Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Instituto Dom Luiz, Portugal mdrcarvalho@ciencias.ulisboa.pt;
5 Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal carreira@ctn.tecnico.ulisboa.pt; jose.marques@tecnico.ulisboa.pt
6 Universidad de Oviedo, C /Jesús Arias de Velasco s/n, 33005, Oviedo, España pfarias@uniovi.es
7 University of Bern, Baltzerstrasse 1, 3012 Bern, Switzerland schreurs@geo.unibe.ch
8 Instituto Geológico y Minero de España-CSIC, España n.heredia@igme.es; b.gonzalo@igme.es; r.marrero@igme.es
9 Repsol E&P, C/Méndez Álvaro, 44, 28045, Madrid, España antoniojose.olaiz@repsol.com
10 GNS Science, PO Box 30-368, New Zealand p.villamor@gns.cri.nz

Palabras clave: Geotermia, Fallas activas, Sismicidad intraplaca, Noroeste Península Ibérica

Resumen

Entre los principales retos en la evaluación de los recursos geotérmicos en regiones intraplaca amagmáticas, se encuentra la localización y caracterización de las fallas, y la comprensión de sus complejos procesos de generación. Estos estudios requieren nuevas aproximaciones multidisciplinares. El NO de la Península Ibérica es una de las zonas de mayor potencial geotérmico. Investigaciones recientes han sugerido que la sismicidad de tipo enjambre en esta zona se debe a la migración de fluidos profundos de alta presión y temperatura (Martín-González et al., 2023). Por ahora, existe un escaso conocimiento de las fallas y/o estructuras que permiten y controlan el ascenso de los fluidos y los procesos de sismicidad natural. En el proyecto FACTER (PID2022-139527OB-I00) se están estudiando estos sistemas termales para establecer un modelo conceptual y las orientaciones mínimas para la localización y gestión de este recurso energético.

Abstract

Among the challenges in assessing geothermal resources in amagmatic intraplate regions is the identification and characterization of faults and their complex processes. These studies require multidisciplinary approaches. The NW of the Iberian Peninsula is one of the highest geothermal potentials in Iberia. Recent studies have suggested that swarm-type seismicity in this area is due to the migration of deep fluids at high pressure and temperature (Martín-González et al., 2023). Currently, there is limited knowledge regarding the faults and/or structures that enable and control fluid ascent and natural seismic processes. In the FACTER project (PID2022-139527OB-I00), the thermal systems are under investigation to develop a conceptual model and the minimum guidelines for locating and managing this energy resource.

Referencias

Martín-González, F., Crespo-Martín, C., Cesca, S., González-Muñoz, S., 2023. *Global and Planetary Change* 227. 104177. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104177

Evaluación del sello del almacenamiento geológico de carbono de TarraCO_2 en la parte sumergida del delta del Ebro.

Seal Assessment for the TarraCO_2 Geological Carbon Storage Site, Offshore Ebro Delta.

A. Martín-Monge[1], Á. Carrasco Castro[1], M. Mañas Fernández[1], P. Lukito[1], M. Ron Martín[1], D. García Fernández-Valderrama[1] y F. Pángaro[1]

[1]Geological Low Carbon Solutions, Repsol Exploración, SA, calle de Méndez Álvaro, 44, 28045 Madrid, España
martin.monge.antonio@repsol.com

Palabras clave: almacenamiento geológico de carbono; sello; sello de membrana; sello de falla.

Resumen

El proyecto TarraCO_2 tiene como objetivo investigar el potencial de las areniscas neógenas de la parte sumergida del delta del Ebro para el almacenamiento seguro de CO_2 a largo plazo. El foco inicial se ha puesto en el acuífero salino de las areniscas del Grupo Castellón, de edad Tortoniense a Messiniense. Este proyecto de almacenamiento geológico de carbono (AGC) busca facilitar una solución de descarbonización para industrias en la región *circum*-mediterránea con emisiones difíciles de abatir (Pángaro *et al.*, 2024).

La caracterización de las rocas sello constituye una de las piedras angulares de la evaluación de riesgos de contención para proyectos de AGC. Los sedimentos pliocenos del Grupo Ebro constituyen el sello principal de las areniscas del Grupo Castellón, mientras que intervalos limosos y arcillosos intercalados dentro del Grupo Castellón podrían constituir sellos secundarios. Se ha llevado a cabo la caracterización de estos sellos mediante un trabajo interdisciplinar con objeto de evaluar las capacidades de los sellos de membrana y falla. Este flujo de trabajo ha integrado la interpretación de datos sísmicos y de registros eléctricos de pozo con una caracterización de laboratorio completa de muestras de testigos convencionales, testigos laterales y ripios de perforación provenientes de sondeos dentro y alrededor del área de interés. Los análisis de laboratorio efectuados incluyen análisis de microscopía, mineralogía, porosidad, permeabilidad y presión capilar. Este estudio concluye que los sellos de membrana en el proyecto TarraCO_2 exhiben una alta capacidad para retener CO_2 en el subsuelo y que el riesgo del sello de falla es muy limitado.

Abstract

The TarraCO_2 project aims at evaluating the potential of the Neogene sandstones of the Ebro delta, offshore Spain, for safe long-term CO_2 storage, with the initial focus in the saline aquifer of the Tortonian to Messinian Castellón Group sandstones. This geological carbon storage (GCS) project seeks to provide a decarbonization solution for hard-to-abate industries across the circum-Mediterranean region (Pángaro *et al.*, 2024).

Seal characterization constitutes one of the keystones of containment risk assessment for GCS projects. The primary caprock of the Castellón Group sandstones is provided by the sediments of the Pliocene Ebro Group, while secondary sealing could be provided by interbedded intra-Castellón silty and shaly intervals. The characterization of these seals has been carried out through a multidisciplinary workflow to evaluate membrane and fault seal capacities. This workflow integrates the interpretation of seismic and electrical well log data with a complete laboratory characterization of conventional cores, sidewall cores and cutting samples from wells within and around the area of interest. Laboratory studies include microscopy, mineralogy, porosity, permeability, and capillary pressure analyses. This study concludes that the membrane seals at TarraCO_2 GCS project exhibit a high capacity for withholding CO_2 in the subsurface, and that the fault seal risk is very limited.

Referencias

Pángaro, F., García Fernández-Valderrama, D., Mañas Fernández, M., Carrasco, A., Lukito, P., Ron Martín, M., Martín-Monge, A., Mozetic Meaglia, L. and de Mena Begay. O. (2024). AAPG CCUS, Houston.

Caracterización de análogos de campo de la formación Arenas del Guadalquivir (Mioceno medio-superior) para almacenamiento geológico de H2 verde.

Characterization of field analogues of the Guadalquivir Sands formation (middle-upper Miocene) for geological storage of green H2.

J. F. Mediato[1], S Ledesma[2], D. Chinchilla[1], F.J. Sierro[3], D. Fernández-Toledano[2], E. Berrezueta[1], C. Yuste[2], M.P. Mata[1]

1 Instituto Geológico y Minero de España. (CN IGME-CSIC), Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España - jf.mediato@igme.es
2 Trinity Energy Storage. Edif. Arqborea – C/Quintanadueñas, 6. 28050 Madrid, España.
3. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, España

Palabras clave: Hidrógeno, H2 verde, Cuenca del Guadalquivir, análogos, Mioceno, estratigrafía

Resumen

La Cuenca del Guadalquivir durante el Mioceno hasta la actualidad fue rellenada por una serie de unidades clásticas progradantes de ENE a OSO de sección sigmoidal (Martínez del Olmo, et al., 1984). Asociada a este relleno, la cuenca presenta en su parte media casi una veintena de yacimientos de hidrocarburos de gas seco biogénico, que han sido tradicionalmente explotados. Muchos de ellos, hoy en día, se encuentran depletados y, por tanto, pueden tener un nuevo uso como almacén de gas, como el H_2 verde procedente de fuentes renovables. Los yacimientos más importantes se explotaban en la parte media y occidental de la cuenca, en los niveles de Arenas del Guadalquivir, de edad Mioceno medio a superior, que se interpretan a partir de secciones sísmicas y pozos, como unidades arenosas de ambiente marino, que pasan a canales turbidíticos. La caracterización de estos depósitos a más 800 m está muy limitada debido a la falta de testigos obtenidos durante la perforación de los sondeos, la escasa disponibilidad de los existentes en las diversas litotecas y la baja calidad de los mismos. Complementariamente al estudio del material disponible se perforaron 6 sondeos con recuperación de testigo continuo, de entre 15 y 30 metros cada uno, entre Sabiote (Jaén) y Córdoba, para recuperar muestras de formaciones análogas con edades entre el Tortoniense superior y el Plioceno inferior. Sobre dichos testigos se han llevado a cabo análisis estratigráficos, sedimentológicos, geoquímicos, petrológicos y petrofísicos.

Abstract

A series of clastic prograding units from ENE to WSW of sigmoidal section have filled the Guadalquivir Basin since the Miocene to the present (Martínez del Olmo, et al., 1984). The Guadalquivir Basin presents in its middle part a series of biogenic dry gas hydrocarbon deposits, which have been traditionally exploited. Today, these reservoirs are depleted and, therefore, can have a new use as gas stores, such as green H_2 from renewable sources. The most important deposits were exploited in the middle and western part of the basin, in the Guadalquivir Sand levels, of middle to upper Miocene age, which are interpreted from seismic sections and wells as sandy units of a tidal environment to turbiditic channels. The characterization of these deposits, above 800 m depth is very limited by the absence of well cores. For all these reasons, 6 boreholes with continuous core recovery of 15 to 30 m, have been carried out between Sabiote and Córdoba, in order to recover analogue samples from Tortonian to Lower Pliocene age. Stratigraphic, sedimentological, geochemical, petrological, petrophysical analysis has been conducted in the recovered cores.

Referencias

Martínez del Olmo, W., García Mallo, J., Leret Verdú, G., Serrano, A. y Suárez, J. (1984). Modelo tectosedimentario del Bajo Guadalquivir. En: *I Congreso Geológico de España*. Segovia, 1: 199-213.

Cuantificación de porosidad de rocas mediante ADI y análisis del potencial como almacén de CO_2

Quantification of rock porosity by ADI and analysis of its potential as a CO_2 storage

S. Roces[1], M.J. Domínguez-Cuesta[1] y E. Berrezueta[2]

1 Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005 Oviedo (España).
UO270299@uniovi.es, dominguezmaria@uniovi.es
2 CN Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). C/ Matemático Pedrayes, 25, 33005 Oviedo (España).
e.berrezueta@igme.es

Palabras clave: Análisis Digital de Imagen, porosidad, almacenamiento geológico de CO_2, petrografía.

Resumen

En este trabajo se aplica la técnica de Análisis Digital de Imagen (ADI) para la caracterización del sistema poroso de dos areniscas (Tiermes y Linares), antes y después de su exposición a CO_2 supercrítico + salmuera, en un Autoclave. La investigación comprendió las siguientes etapas: i) configuración y calibración de los equipos (Berrezueta y Kovacs, 2017); ii) estudio petrográfico de las muestras; iii) exposición de muestras a CO_2 en condiciones supercríticas (Berrezueta *et al*., 2019) y iv) cuantificación y análisis de la porosidad (sobre imágenes) en muestras pre y post CO_2 (Roces, 2022). Los resultados revelan que la exposición de las muestras a CO_2 + salmuera (80 bar, 40ºC, 60 días) aumenta la porosidad un 5% en la arenisca de Tiermes y un 10% en la de Linares. Ello se atribuye a la pérdida de material arcilloso de la matriz y a la disolución del cemento carbonatado. Además, se constató la unión de poros preexistentes y la creación de nuevos poros (> 500 µm). Se ha podido cuantificar la evolución del sistema poroso de rocas durante las primeras fases de inyección de CO_2 y presentar la precisión, eficacia y reproducibilidad de esta técnica como complemento a métodos petrográficos tradicionales.

Abstract

In this work, the Digital Image Analysis (DIA) technique for the characterization of the porous system of two sandstones (Tiermes and Linares), before and after their exposure to supercritical CO_2 + brine, in an Autoclave. The research consisted of the following stages: i) equipment setup and calibration (Berrezueta and Kovacs, 2017); ii) petrographic study of the samples; iii) exposure of samples to CO_2 under supercritical conditions (Berrezueta *et al*., 2019) and iv) quantification and analysis of porosity (on images) in pre- and post-CO_2 samples (Roces, 2022). The results reveal that exposure of the samples to CO_2 + brine (80 bar, 40ºC, 60 days) increases porosity by 5% in the Tiermes sandstone and 10% in the Linares sandstone. This is attributed to the loss of clay material from the matrix and to the dissolution of the carbonate cement. In addition, the union of pre-existing pores and the creation of new pores (> 500 µm) were observed. It has been possible to quantify the evolution of the pore system of rocks during the first phases of CO_2 injection and to present the accuracy, efficiency and reproducibility of this technique as a complement to traditional petrographic methods.

Referencias

Berrezueta, E. y Kovacs, T. (2017) *Journal of Petroleum Science and Engineering*, doi: 10.1016/j.petrol.2017.08.039

Berrezueta, E., Rodríguez-Rey, A. y Domínguez-Cuesta, M. J. (2019) *Computers and Geosciences*, doi: 10.1016/j.cageo.2018.12.009

Roces, S. (2022) *Aplicación de ADI para cuantificación de porosidad de rocas y análisis de su potencial como almacenes de CO_2*. Trabajo Fin de Grado, Univ. de Oviedo, 16 pp.

Evaluación geológica regional para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno en cavernas salinas

Geological screening for underground hydrogen storage in salt caverns

S. Subías[1], A. Herra[1], J.L. Trigo[1], R. Pérez[1], A.M. García[2]

1 Repsol, Geological Low Carbon Solutions. C/Méndez Álvaro, 44, 28045 Madrid (España). saul.subias@repsol.com; adela.herra@repsol.com; jltrigos@repsol.com; perez.martin.ruben@repsol.com
2 Enagás. P.º de los Olmos, 19, Arganzuela, 28005 Madrid (España). amgarcia@enagas.es

Palabras clave: Almacenamiento Geológico Profundo, hidrógeno

Resumen

La implementación de sistemas de generación de energías renovables se está convirtiendo en un factor clave para reducir los efectos del cambio climático. La producción intermitente de energía de estas fuentes da como resultado desajustes temporales entre la demanda y la oferta. La conversión de energía renovable en hidrógeno y su posterior almacenamiento es una opción para compensar esta fluctuación energética. Para el despliegue de hidrógeno a gran escala, el almacenamiento subterráneo en cavernas salinas parece ser la mejor opción, especialmente en aquellos casos en los que la demanda de energía requerida debe satisfacerse con ciclos tanto estacionales como rápidos de inyección y producción.

Para lograr el almacenamiento esperado, los esfuerzos deben concentrarse en la detección y evaluación de estructuras evaporíticas. La caracterización geológica de estas estructuras implica un enfoque multidisciplinar a través de diferentes ramas de la geología: estructural, estratigrafía y sedimentología, petrología, geoquímica, etc. El análisis sistemático de parámetros clave permite discriminar semi-cuantitativamente las zonas más favorables en etapas tempranas de proyectos de almacenamiento profundo.

Abstract

The deployment of renewable energy generation systems is becoming a key factor in reducing the effects of climate change. However, the intermittent energy production of these source results in temporary mismatches between demand and supply. One option to buffer this energy fluctuation is the conversion of renewable energy into hydrogen and its subsequent storage. For large-scale hydrogen deployment, underground storage in salt caverns appears as the best option, especially for cases where the required energy demand needs to be fulfilled with both seasonal and fast cycles of injection and withdrawal.

To achieve the expected storage capacity, efforts must be concentrated on screening and evaluating natural evaporitic structures. The geological characterization of these structures requires a multidisciplinary approach through various geosciences, including structural geology, stratigraphy, sedimentology, petrology, geochemistry, etc. The systematic analysis of key parameters allows for the relative ranking of the most favorable areas in the early stages of underground hydrogen storage projects.

¿Tiene la Sedimentología un papel en la transición energética? Una propuesta

Does Sedimentology have a role in the energy transition? A proposal

C. Viseras [1], P. Cabello[2], L. M. Yeste[1], J. Alcalde[3], M. López-Blanco[2], J. L. Cuevas[2], M. Gil-Ortiz[4], L. Caracciolo[5], F. De Mesquita Veloso[6], N. Heinemann[7], O. Falivene[8], A. N. Varela[9,10], E. Rua-Alkain[2], A. Blanco[11] y J. Jaímez[12]

[1] Departamento de Estratigrafía y Paleontología (SEDREGROUP), Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Severo Ochoa s/n, 18071 Granada. viseras@ugr.es, lmyeste@ugr.es
[2] Dept. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. pcabello@ub.edu, m.lopezblanco@ub.edu, jcuevas@ub.edu, eruaalka7@alumnes.ub.edu
[3] Geociencias Barcelona (GEO3BCN), CSIC, c/ Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. jalcalde@geo3bcn.csic.es
[4] Dept. Mineralogía, Petrología i Geología Aplicada, UB-Geomodels, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. marc.gilortiz@ub.edu
[5]Lehrstuhl für Geologie, GeoZentrum Nordbayern, Friedrich - Alexander Universität, Schlossgarten 5, 91054 Erlangen, Germany. luca.caracciolo@fau.de
[6] Risk and Prevention Division Safety and Performance of Subsurface, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 45060, France. f.veloso@brgm.fr
[7] School of Geosciences, University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3FE, UK. n.heinemann@ed.ac.uk
[8] Shell International Exploration and Production, The Hague (Netherlands). Oriol.Falivene@shell.com
[9] Cátedra de Micromorfología de Suelos, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, c/ 122 y 60 s/n (1900), La Plata, Argentina. augustovarela@cig.museo.unlp.edu.ar
[10] CONICET, Y-TEC (YPF-Tecnología), Av. Del Petróleo s/n (1923), Berisso, Argentina. augusto.n.varela@ypf.com
[11] Repsol Technology Lab, c/ Agustín de Bentancourt, s/n, 28935, Madrid, Spain. anabell.blanco@repsol.com
[12] Unidad de Perforación y Testificación de Rocas. Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada (CIC). c/ Profesor Juan Osorio s/n, 18071 Granada. jjaimez@ugr.es

Palabras clave: sedimentology, energy transition, fluid geo-storage, heterogeneity, modeling

Resumen

El proyecto SOSGAS tiene por objeto calibrar el impacto de la heterogeneidad sedimentaria inherente a formaciones fluviales y deltaicas en el geo-almacenamiento sostenible de CO_2 y H_2 verde. Se han seleccionado 6 ejemplos mesozoicos y cenozoicos en la Meseta Ibérica, la Cuenca del Ebro y la Cuenca de Graus-Tremp a los que se aplica el flujo de trabajo OBO. Con esta base de datos de afloramiento y subsuelo se construyen modelos estáticos 3D de distribución de facies reservorio y sello y de propiedades petrofísicas, y finalmente se simula la inyección de los fluidos. Diferentes hipótesis de conectividad entre litofacies porosas y de distribución de los sellos conducen a diferentes escenarios de dinámica de fluidos y de entrampamiento. Con este proyecto iniciamos una línea de investigación que permitirá evaluar la validez de la sedimentología para contribuir al reto social de la transición energética.

Abstract

The SOSGAS project aims to gauge the impact of sedimentary heterogeneity inherent to fluvial and deltaic formations on the sustainability of a possible geo-storage of CO_2 and green H_2. 6 Mesozoic and Cenozoic examples have been selected in the Iberian Meseta, the Ebro Basin and the Graus-Tremp Basin to which the OBO workflow is applied. Using this outcrop and subsurface database, 3D static models are constructed to reproduce the distribution of reservoir and seal facies and petrophysical properties, and finally fluid injection is simulated. Different hypotheses of connectivity of porous lithofacies and seal distribution lead to different scenarios of fluid flow dynamics and trapping. With this project, we are initiating a line of research that will make it possible to assess the validity of sedimentology in contributing to the social challenge of the energy transition.

Acknowledgements: Grants PID2022-140850OB-C21 and PID2022-140850OB-C22 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ and by "ERDF A way of making Europe". REPSOL EP, CEPSA EP, ENAGAS, SLB, AGGEP, the MS2022-17 contract -NextGenerationEU- and the groups RNM369 (PAI) and 2021SGR00076 (GC) are also grateful.

Los estromatolitos paleoproterozoicos de la Formación Leba, Angola: un caso excepcional de conservación de la textura deposicional.

Palaeoproterozoic stromatolites from the Leba Formation, Angola: an exceptional case of preservation of the depositional texture.

A.M. Alonso-Zarza[1*], R. Martín-García[2], J. Fernández-Suarez[1], E. Merino-Martínez[1], J.L. García-Lobón[1], A. Rodríguez-Berriguete[3] y A. Martín-Pérez[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. *a.alonsozarza@igme.es
2 Dpto. Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais, 12. 28040 – Madrid, España.
3 Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 90040-060, Brasil.
4 Instituto de Paleontología Ivan Rakovec, ZRC-SAZU. Novi trg 2, SI-1000, Liubliana, Eslovenia.

Palabras clave: Estromatolitos, Formación Leba, Paleoproterozoico, textura deposicional, Angola

Resumen

La Sierra de Leba (provincia de Huila, Angola) contiene un magnífico ejemplo de una formación estromatolítica, la Formación Leba. Esta formación aflora de manera dispersa en disconformidad sobre la secuencia meta-volcanosedimentaria paleoproterozoica del Grupo Chela. La Fm Leba, con espesores de hasta 70 m, está constituida por bancos tabulares bien estratificados, constituidos en gran parte por capas estromatolíticas de espesores variables (cm a dm). Los estromatolitos muestran morfologías planares a dómicas. Los domos, conectados lateralmente, suelen ser cónicos y alcanzar 30 cm de altura y 25 cm de diámetro. El estudio petrográfico muestra la textura deposicional bien conservada, caracterizada por laminas micríticas milimétricas, con grietas de desecación, brechificación y cantos planos. Entre las láminas micríticas, se observan bandas con cristales fibrosorradiados de calcita (*shrubs*). Algunos niveles contienen granos con cubiertas micríticas irregulares (oncoides) y otros con envueltas regulares y cristales radiales (ooides). La porosidad entre láminas micríticas está ocupada por cemento esparítico que rellena grietas de desecación o porosidad de fractura. Se observan nódulos irregulares de cuarzo en mosaico que reemplazan la textura general, indicando procesos de silicificación. Las características descritas indican que la sedimentación de la Fm. Leba tuvo lugar en un ambiente de plataforma marina somera de baja energía, con etapas de mayor energía que favorecieron la formación de oncoides y ooides, así como la ruptura de los tapices microbianos carbonáticos (láminas micríticas). Dada la antigüedad de esta formación, la conservación de todas estas microestructuras es un hecho muy relevante.

Abstract

The Sierra de Leba (Huila province, Angola) contains a magnificent example of a Palaeoproterozoic stromatolitic formation, the Leba Formation. This formation outcrops sparsely in unconformity on the meta-vulcanosedimentary Palaeoproterozoic sequence of the Chela Group. The Leba Fm., up to 70 m thick, consist of a well-stratified tabular beds, mostly composed of stromatolitic layers of variable thickness (cm to dm). Stromatolites show planar to domed morphologies. The domes are usually conical and can reach 30 cm in height and 25 cm in diameter. The petrographic study shows a well-preserved depositional texture characterised by millimetric micritic lamellae with desiccation cracks, brecciation and flat pebbles bands and also bands of fibrous-radiated calcite crystals (shrubs). Some beds contain grains with irregular micritic coatings (oncoids) and more regular with radial crystals (ooids). Diagenetic processes can be recognised by scattered sparitic cement in the porosity between micritic laminae, filling desiccation cracks or fracture porosity. Irregular mosaic quartz nodules replace the general texture, indicating silicification processes. These features indicate that the sedimentation of the Leba Fm. took place in a low energy shallow marine platform environment, with higher energy stages favouring the formation of oncoids and ooids, and the rupture of carbonate microbials mats (micritic lamellae). Given the age of this formation, the preservation of these microstructures is an outstanding feature.

Mapas de potencial mineral en el sur de Angola: el primer enfoque de un mapa de prospectividad basado en datos y conocimiento adquirido en la región de Au-Fe del sur de Angola.

Mineral Potential Maps Angola: The first approach of data and knowledge driven prospectivity mapping in the Au-Fe region of Southern Angola.

M.J. Batista[1], I. Martín-Méndez[2], E. Merino-Martínez[2], C. Prazeres[1], I. Cuervo[3], J. Manuel[4], D. de Oliveira[1], J. F. Rodrigues[1] y J.L. García-Lobón[2]

1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Apartado 7586, 2610-999 Alfragide, Portugal. mjoao.batista@lneg.pt
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/Rio Rosas 23, 28003, Madrid, España.
3 Impulso Industrial Alternativo (IMPULSO), R. Ndunduma 85, Luanda, Angola.
4 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Cidade de Kilamba, Luanda, Angola.

Palabras clave: potencial mineral, geoquímica, análisis multivariante, XRFp.

Resumen

Los mapas de recursos minerales a escala 1:50.000 fueron realizados en la última fase del Proyecto PLANAGEO con el objetivo de evaluar el potencial mineral de la región sur de Angola. Los objetivos elegidos fueron, entre otros, las zonas que contienen Au-Fe en las áreas de Jamba-Cassinga-Tchamutete, Chipindo y Cuima-Samboto. Los mapas integraron mapas geológicos, datos magnéticos y radiométricos aéreos y resultados de FRXp de campañas de campo de PLANAGEO y yacimientos minerales conocidos. Se obtuvieron análisis univariantes, bivariantes y multivariantes y grupos de *pathfinders*, tales como: Factor 1 (F1)- Cd, Hg, Fe_2O_3, As, V, Ni de rocas en Chipindo o Factor 1(F1) - Fe_2O_3, As, Sn, Sb, Ta en rocas de Jamba. Esos grupos fueron identificados como *pathfinders* de Au, representados en los Mapas de Potencial por encima del percentil 80. En el caso de Jamba era >0,838 y el área delimitada incluía rocas *BIF*, rocas metavolcánicas bimodales del terreno Arcaico del Grupo Jamba.

Abstract

The mineral resources maps at 1:50.000 scale were made in the last phase of PLANAGEO Project with the objective of increasing mineral potential of Southern Angola. The targets chosen were the brownfields areas containing Au-Fe in Jamba-Cassinga-Tchamutete, Chipindo and Cuima-Samboto areas. The maps were produced by integrating the geological maps, airborne magnetic and radiometric data and pXRF results from PLANAGEO´s field campaigns and known mineral occurrences. Univariate, bivariate and multivariate analysis were obtained and groups of pathfinders, such as: Factor 1 (F1)- Cd, Hg, Fe_2O_3, As, V, Ni from rocks in Chipindo or Factor 1(F1) - Fe_2O_3, As, Sn, Sb, Ta in rocks of the Jamba area. Those groups of elements were identified as Au pathfinders, represented in the Potential Maps above the 80th percentile, in the case of Jamba was >0.838 and the delimited area included BIF rocks, bimodal metavolcanic rocks of the Archean terrain of Jamba Group.

Referencias

Pereira, L. F., Osório, A., Represas, P., Carvalho, J., Prazeres, C., Morais, I., Albardeiro, L. y Batista, M. J. (2022). *Notícia Explicativa da Carta de Recursos Minerais Metálicos. Escala 1:50.000, Folha 341A.* IGEO, Luanda, 109 p.

Merino-Martínez, E., Martín-Méndez, I., Feria, M.C., Buzzi, J., Potti, J., Rey-Moral M.C. y Chinchilla D. (2022). *Notícia Explicativa da Carta de Recursos Minerais Metálicos. Escala 1:50 000, Cluster Au-Fe. Subcluster do Chipindo. Carta 300-C da Calondada.* IGEO, Luanda, 161 p.

Marco tectono-estratigráfico de las cuencas sedimentarias de Benguela y Namibe (SO Angola).

Tectono-stratigraphic framework of the Benguela and Namibe sedimentary basins (SW Angola).

M. Chamizo Borreguero[1*], L. Pereira [2], J. Escuder Viruete[1], J. Da Cruz Correia[2], M. Gutiérrez-Medina[2], J. Buzzi Marcos[2], A.M.L. Victorino[3] y J. Manuel[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC. C/ Calera, 1. 28760, Tres Cantos (Madrid), España. *m.chamizo@igme.es, j.escuder@igme.es.
2 UTE-PLANAGEO (IGME, LNEG E IIA), Parque Tecnológico de Asturias 13A. 33428, Llanera (Asturias) España. miguelgutierrezmedina@gmail.com, lfrfpereira@gmail.com, jorge.buzzi@xcaliburmp.com.
3 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Rua 311, Centralidade do Kilamba, Luanda, Angola. amevictorino@yahoo.com.br, jose.manuel@igeo.gov.ao.

Palabras clave: Benguela, Namibe, Rifting, Meso-Cenozoico, Tectonoestratigrafía

Resumen

Las cuencas costeras de Benguela y Namibe (SO de Angola) se formaron debido a la fragmentación de Gondwana y la posterior apertura del segmento central del Océano Atlántico Sur durante el Cretácico Inferior (Torsvik *et al*., 2009). Sus complejos registros sedimentarios muestran la transición progresiva de ambientes continentales a marinos, caracterizados por una potente y extensa capa de evaporitas depositada durante el Aptiense (Marton *et al*., 2000). El registro sedimentario Meso-Cenozoico de las denominadas Cuencas Salinas Aptienses ha sido objeto de estudio debido a su potencial para el almacenamiento de petróleo y gas. Sin embargo, las cuencas de Benguela y Namibe han permanecido relativamente inexploradas en comparación con otras cuencas de África Occidental y su margen brasileño conjugado. Los trabajos de cartografía geológica realizados durante el proyecto PLANAGEO (Plan Nacional de Geología de Angola) han permitido revisar las unidades litoestratigráficas y establecer un marco tectono-estratigráfico de estas cuencas sedimentarias en relación con las diferentes etapas de rift.

Abstract

The Benguela and Namibe coastal basins (SW Angola) were formed due to the fragmentation of Gondwana and the subsequent opening of the central segment of the South Atlantic Ocean during the Lower Cretaceous (Torsvik *et al*., 2009). Their complex sedimentary records show the progressive transition from continental to marine environments, characterised by a thick and extensive layer of evaporites deposited during the Aptian (Marton *et al*., 2000). Meso-Cenozoic sedimentary record of so-called Aptian Salt Basins, have been subject of study due to their potential for oil and gas storage. However, the Benguela and Namibe basins have remained relatively unexplored compared to other West African basins and their conjugate Brazilian margin. Geological mapping works carried out during the PLANAGEO project (National Geological Plan of Angola) has made it possible to review lithostratigraphic units and to establish a tectono-stratigraphic framework of these sedimentary basins in relation to the different rift stages.

Referencias

Marton, L.G., Tari, G.C. y Lehmann, C.T. (2000). Evolution of the Angolan passive margin, West Africa, with emphasis on post-salt structural styles. En: Mohriac, W. y Talwani, M. (Eds), *Atlantic Rifts and Continental Margins*. American Geophysical Union, Washington. pp. 129-149.

Torsvik, T.H., Rousse, S., Labails, S. y Smethurst, M.A. (2009). A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin. *Geophysics Journal International*, 177, 1315–1333.

Magmatismo carbonatítico de Catanda (Angola): nueva edad mediante Ar-Ar y las implicaciones sobre su origen.

Carbonatite magmatism of Catanda (Angola): new Ar-Ar age and implications for its origin.

D. Chinchilla-Benavides[1*], E. Merino-Martínez[1], M. Chamizo-Borreguero[1], P. Valverde-Vaquero[1], A. Beranoaguirre[2], J. Gabites[3] y J. Manuel[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España, IGME (CSIC), c/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. * dchbenavides@gmail.com
2 Institut für Geowissenschaften (IfG), Goethe-Universität Frankfurt, Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt am Main, Alemania.
3 Pacific Center for Isotopic and Geochemical Research (PCIGR), The University of British Columbia, Vancouver, Canadá.
4 Instituto Geológico de Angola (IGEO). Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Palabras clave: Geocronología Ar-Ar, Magmatismo alcalino-carbonatítico, Catanda, Pleistoceno, Angola

Resumen

El complejo de Catanda es uno de los pocos ejemplos de volcanes carbonatíticos extrusivos del mundo y el único conocido en Angola. El magmatismo alcalino-carbonatítico de Angola se distribuye a favor de alineaciones tectónicas reactivadas durante el Mesozoico en respuesta al *rifting* continental y la apertura del océano Atlántico Sur (Comin-Chiaramonti *et al*., 2005). Sin embargo, las unidades volcánicas carbonatíticas del Complejo de Catanda han revelado estar asociadas a reactivaciones tectónicas de edad Pleistoceno (0,56-0,78 Ma; Giuliani *et al*., 2017). La edad obtenida en el proyecto PLANAGEO mediante ^{39}Ar-^{40}Ar en roca total revela la presencia de exceso de Ar con dos escalones bien definidos a 471 ± 28 Ma y 210 ± 6 Ma, indicando la presencia de reservorios de Ar más antiguos. En cambio, el separado de flogopita de la misma muestra, muestra un espectro fiable con una edad Ar-Ar plateau de 3,01 ± 0,53 Ma y una edad isocrona de Ar concordante de 2,83 ± 0,66 Ma. Estas nuevas edades evidencian una compleja historia geológica de la región de Catanda relacionada con los diferentes eventos de *uplif*t ocurridos desde el Mesozoico hasta el Pleistoceno.

Abstract

The Catanda complex is one of the few examples of extrusive carbonate volcanoes in the world and the only one known in Angola. The alkaline-carbonate magmatism of Angola is distributed along tectonic alignments reactivated during the Mesozoic in response to continental rifting and the South Atlantic Ocean opening (Comin-Chiaramonti *et al*., 2005). However, the carbonatitic volcanic units of the Catanda Complex have revealed to be associated with tectonic reactivations of Pleistocene age (0.56-0.78 Ma; Giuliani *et al*., 2017). The whole-rock ^{39}Ar-^{40}Ar age obtained in the PLANAGEO project reveals two well-defined steps at 471 ± 28 Ma and 210 ± 6 Ma, indicating the presence of older Ar reservoirs. In contrast, the phlogopite separate of the same sample has a reliable spectrum with an Ar-Ar plateau age of 3.01 ± 0.53 Ma and a concordant Ar isochron age of 2.83 ± 0.66 Ma. These new ages reveal a complex geological history of the Catanda region related to the different uplift events ranging from the Mesozoic to the Pleistocene.

Referencias

Comin-Chiaramonti, P., Barros Gomes, C., Cundari, A., Castorina, F. y Censi, P. (2007). A review of carbonatitic magmatism in the Paraná-Angola-Namibia (PAN) system. *Periodico di Mineralogia* 76 (2-3), 25-78.

Giuliani, A., Campeny, M., Kamenetsky, V.S., Afonso, J.C., Maas, R., Melgarejo, J.C. y Manuel, J. (2017). Southwestern Africa on the burner: Pleistocene carbonatite volcanism linked to deep mantle upwelling in Angola. *Geology* 45 (11), 971-974.

Litoestratigrafía, estructura y geocronología U-Pb SHRIMP en zircón de las rocas metamórficas de la región de Namibe (suroeste de Angola): un fragmento del Escudo del Congo Suroccidental deformado durante la orogenia Eburneana.

Lithostratigraphy, structure and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of metamorphic rocks from the Namibe region (southwestern Angola): a fragment of the Southwestern Congo Shield deformed during the Eburnean orogeny.

J. Escuder-Viruete[1*], L. Quintana[1], A. Beranoaguirre[2], P. Montero[3], J. Gabites[4], P. Valverde-Vaquero[1] y **A.M.L. Victorino[5]**

1 Instituto Geológico y Minero España (IGME), CSIC, C/ La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid. España. *j.escuder@igme.es
2 Institut für Geowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt, Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt am Main, Alemania.
3 Laboratorio de Microsonda Iónica-IBERSIMS. Centro de Instrumentación Científica. Universidad de Granada, Granada, España.
4 Pacific Centre for Isotopic and Geochemical Research, University of British Columbia, 6339 Stores Road, Vancouver, BC V6T-1Z4, Canadá.
5 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Kilamba. Luanda, Angola.

Resumen: La región de Namibe del suroeste de Angola forma parte del Escudo del Congo Suroccidental, que es un dominio cortical sometido a los procesos tectono-metamórficos relacionados con la orogenia Eburneana. En la región se distinguen dos conjuntos metamórficos de edad Neoarcaico a Paleoproterozoico: el Complejo de Epupa y el Grupo Namibe. El Complejo de Epupa está constituido por ortogneises graníticos, tonalíticos y dioríticos, leucogneises y paragneises pelíticos, variablemente migmatizados. El Grupo Namibe incluye anfibolitas y mármoles calcíticos y dolomíticos basales sobre los que superpone una potente secuencia de pizarras, esquistos y metagrauvacas alternantes con intercalaciones de cuarcitas y metaconglomerados. Durante la orogenia Eburneana, tanto el Complejo de Epupa como el Grupo Namibe experimentaron una deformación dúctil polifásica y un metamorfismo regional que, en amplios sectores, alcanzó las condiciones de fusión parcial. Las estructuras se agrupan en dos eventos deformativos dúctiles principales, D1 y D2, junto con otros dos eventos tardíos de menor penetratividad, D3 y D4. Los nuevos datos U-Pb SHRIMP en zircón indican que el pico térmico del metamorfismo, la cristalización de leucosomas, el emplazamiento de leucogranitos anatécticos y el enfriamiento del conjunto tuvieron lugar en un relativo corto intervalo de tiempo (~25 Ma).

Palabras clave: Escudo del Congo, orogenia Eburneana, Complejo de Epupa, Grupo Namibe, Angola.

Abstract: *The Namibe region of southwestern Angola is part of the Southwestern Congo Shield, which constitutes a crustal domain subjected to tectono-metamorphic processes related to the Eburnean orogeny. In the region, two metamorphic assemblages of Neoarchean to Paleoproterozoic age are distinguished: the Epupa Complex and the Namibe Group. The Epupa Complex is made up of granitic, tonalitic and dioritic orthogneisses, leucogneisses and pelitic paragneisses, variably migmatized. The Namibe Group includes basal amphibolites and calcitic and dolomitic marbles overlaid by a thick and monotonous sequence of alternating slates, schists and metagreywackes with intercalations of quartzites and metaconglomerates. During the Eburnean orogeny, both the Epupa Complex and the Namibe Group underwent polyphase ductile deformation and regional metamorphism that, in large sectors, reached partial melting conditions. Eburnean structures can be grouped into two main ductile deformation events, D1 and D2, together with two other less penetrative late events, D3 and D4. SHRIMP U-Pb zircon data indicate that the thermal peak of metamorphism, the crystallization of leucosomes, the emplacement of anatectic leucogranites, and the cooling of the assemblage took place in a relatively short time interval (~25 Ma).*

Key words: *Southwestern Congo Shield, Eburnean orogeny, Epupa Complex, Namibe Group, Angola.*

INTRODUCCIÓN

La región de Namibe del suroeste de Angola forma parte del Escudo del Congo Suroccidental (*sensu* de Wit y Linol, 2015), que constituye un dominio cortical sometido a los procesos tectono-metamórficos relacionados con la orogenia Eburneana. En el presente trabajo se presentan la litoestratigrafía, estructura y geocronología de las rocas metamórficas de la región de Namibe del suroeste de Angola. Estos datos constituyen los resultados de los trabajos de cartografía geológica a escala 1:250.000 realizados en las Hojas Sul D-33/S - Sul E-32/Z de Namibe y Sul D-33/M de Munhino, obtenidos en el PLANAGEO (Escuder-Viruete et al., 2021; Gutiérrez-Medina, 2021). Considerados en conjunto, estos datos permiten por primera vez establecer: (1) las

relaciones litoestratigráficas entre el Complejo de Epupa y el Grupo Namibe; (2) las macro- y mesoestructuras producidas por la deformación Eburneana; y (3) la edad de la deformación y del metamorfismo regional Paleoproterozoico.

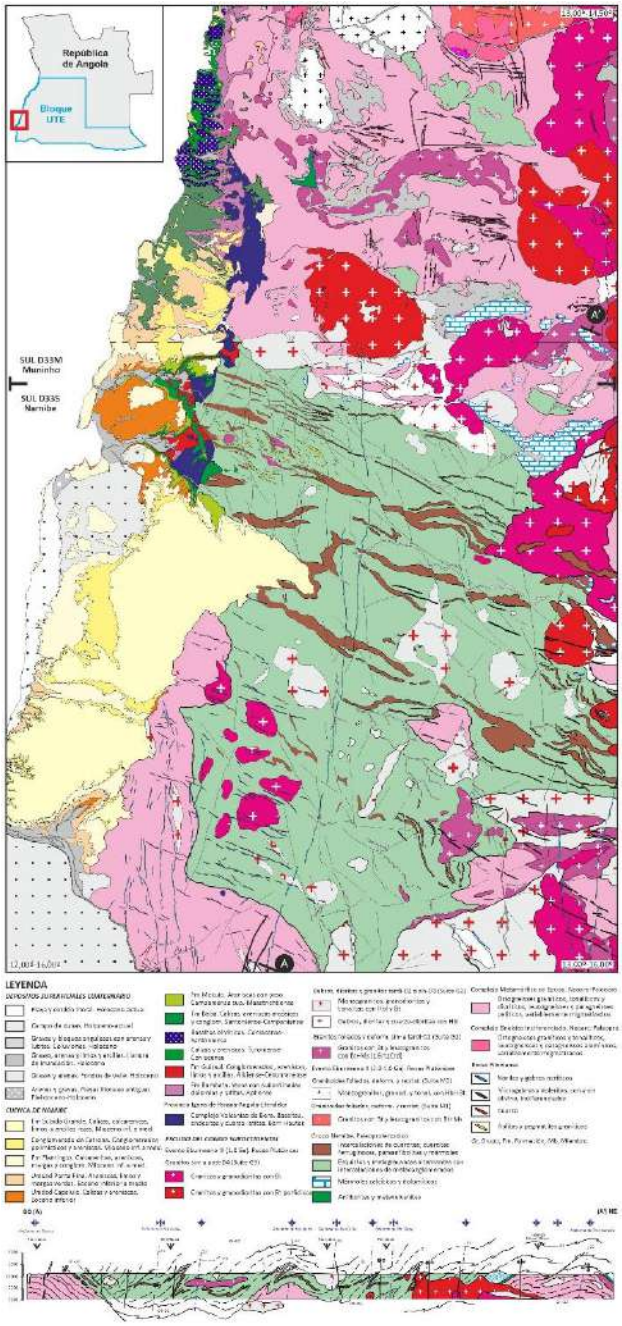


FIGURA 1. *Mapa y corte geológico esquemático de las Hojas a escala 1:250.000 Sul D-33/S de Namibe y mitad sur Sul D-33/M de Munhino (mod. Escuder-Viruete et al., 2021; Gutiérrez-Medina, 2021).*

LITOESTRATIGRAFÍA

En la región de Namibe es posible distinguir litológicamente el conjunto de orto- y paragneises del Complejo de Epupa (CE) de los metasedimentos supracorticales del Grupo Namibe (GN; Fig. 1). El CE está constituido litológicamente por ortogneises graníticos, leucogneises y paragneises pelíticos, con subordinados ortogneises tonalíticos y dioríticos, todos ellos variablemente migmatizados. El GN está constituido por un tramo basal de anfibolitas y mármoles calcíticos y dolomíticos, sobre el que se superponen pizarras, esquistos, cuarzo-esquistos y metagrauvacas alternantes con intercalaciones de metaconglomerados, cuarcitas y cuarcitas ferruginosas. En el CE, la existencia de enclaves de paragneises en los ortogneises bandeados y augen-gneises sugiere que los paragneises constituyen el encajante donde intruyeron los protolitos graníticos en el Paleoproterozoico. Los datos geocronológicos indican edades heredadas de entre 2,05 y 1,95 Ga, así como más antiguas. Estos protolitos serían rocas ígneas de composición calco-alcalina, formadas en un arco volcánico continental Eburneano de edad 2,0 ± 0,2 Ga, edificado en el margen meridional del Cratón del Congo (Kröner y Rojas-Agramonte, 2017). Estos granitoides calco-alcalinos fueron deformados, metamorfizados y migmatizados durante eventos posteriores de la orogenia Eburneana.

Las relaciones cartográficas, el contraste litológico, la presencia de conglomerados a la base, el carácter monocíclico y la ausencia de intercalaciones de ortogneises indican que el GN se depositó discordante sobre el CE. La existencia de un magmatismo máfico basal, registrado por los protolitos de las anfibolitas, sugiere que la cuenca se formó por procesos de extensión cortical y fusión del manto. La sedimentación fue inicialmente carbonatada, depositándose los protolitos de mármoles, continuándose con la acumulación de una monótona y potente secuencia siliciclástica azoica, cuyas características sedimentológicas reconocibles indican su deposición en la zona de canales de alimentación y de lóbulos deposicionales de un sistema turbidítico submarino. La composición de los conglomerados de las facies canalizadas, indican la existencia de áreas fuente de composición granítica y cuarcítica, así como un rápido transporte por corrientes de turbidez.

ESTRUCTURA Y METAMORFISMO

Los datos estructurales a todas las escalas indican que tanto las rocas del CE como las del GN suprayacente experimentaron una deformación dúctil polifásica (D1 a D4) y un metamorfismo regional que alcanzó las condiciones de fusión parcial durante la orogenia Eburneana. La deformación D1 fue pervasiva en los metasedimentos del GN y produjo una macroestructura de pliegues D1 de dirección ONO a NO y vergencia al NNE, que pliega a la estratificación S0 y dan lugar a una esquistosidad de plano axial S1 y a una lineación de intersección subvertical L1. D1 consistió en un régimen transpresivo senestro relacionado con una convergencia oblicua que produjo un acortamiento NE a NNE perpendicular a S1 y un estiramiento subvertical paralelo a L1, produciendo un engrosamiento cortical. En el CE sólo se han reconocido mesoestructuras D1, como pliegues isoclinales D1 y una S1 plegada intrafoliarmente.

La deformación D2 produjo fábricas plano-lineares S2-L2 y zonas de cizalla dúctil subparalelas al contacto entre el GN y el CE, que constituyó una zona de mayor deformación originalmente subhorizontal. Hacia los

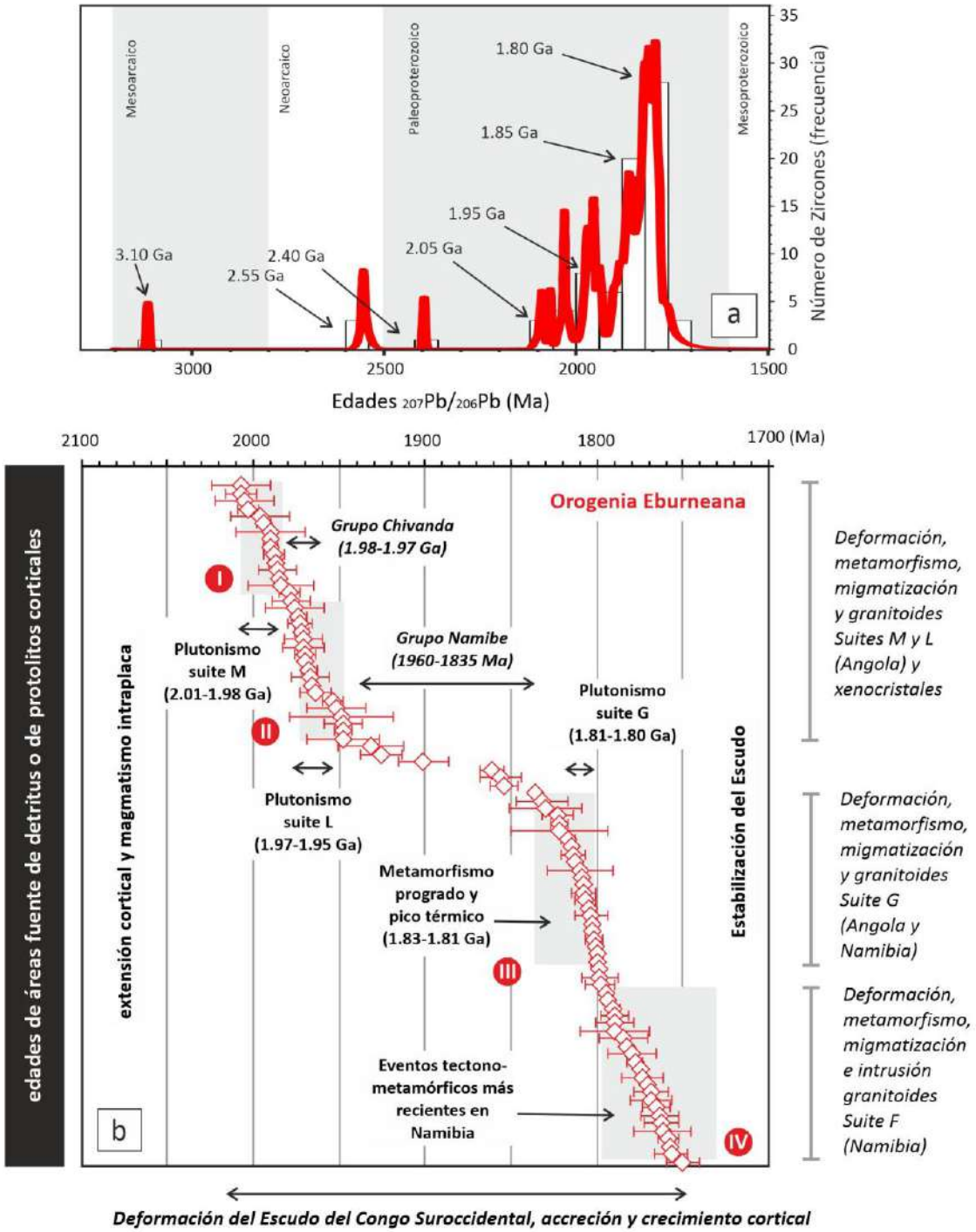


FIGURA 2. *(a) Diagramas de frecuencia y de densidad de probabilidad de todos los zircones analizados en las muestras de orto- y paragneises del Complejo de Epupa. (b) Síntesis de edades U-Pb en zircones obtenidas por TIMS y SHRIMP II en las rocas ígneas y metamórficas Paleoproterozoicas del Bloque UTE-PLANAGEO, así como datos del Escudo del Congo Suroccidental procedentes de la bibliografía regional (compilados en Escuder-Viruete et al., 2021a, b, c). La compilación de edades permite distinguir cuatro eventos tectonomagmáticos ebuneanos (I, II, III y IV), acompañados por tres eventos tectonometamórficos de alta-T y migmatización, pero de diferente desarrollo geográfico.*

niveles estructuralmente bajos del GN y en el CE infrayacente, la deformación D2 produjo la transposición por la S2 de las fábricas previas y la formación de leucosomas paralelos. D2 estuvo también acompañada por la formación de venas y sills de aplitas, pegmatitas y leucogranitos concordantes con S2. El metamorfismo prograd contemporáneo con D1 y D2 alcanzó condiciones de la facies de los esquistos verdes y de las anfibolitas en el GN y de las anfibolitas de alta-T en el CE. D2 consistió en un estiramiento subhorizontal de orientación NO-SE, acompañado por un cizallamiento subhorizontal dirigido al SE, que produjo el desplazamiento lateral del CE a escala regional. Este flujo lateral de la corteza media fue cinemáticamente compatible con el acortamiento NE perpendicular de la corteza superior representada por el GN.

La deformación dúctil D3 fue más heterogénea y deformó conjuntamente al GN y al CE. Produjo un plegamiento de dirección ONO a NO y vergencia al NNE/NE, responsable de la macroestructura regional en antiformas y sinformas. En el GN, la S1/S2 está localmente crenulada por una S3 desarrollada en facies de los esquistos verdes a anfibolítica. En el CE, D3 dio lugar a una S3 subvertical y una L3 de crenulación subhorizontal longitudinal a los antiformes. La presencia de leucosomas paralelos a la S3 indica condiciones metamórficas locales de la facies anfibolítica superior. La deformación D4 tuvo un carácter dúctil-frágil y se desarrolló en bandas. Macroscópicamente produjo pliegues subverticales de geometría *kink* y dirección NNE, que indican un acortamiento regional O a ONO.

GEOCRONOLOGÍA

Los datos geocronológicos obtenidos mediante U-Pb SHRIMP en los gneises indican la existencia de edades entre 2600 y 1970 Ma en xenocristales heredados o en núcleos detríticos de zircones zonados. Estas edades dan cuenta de las edades tanto de las áreas fuente de los protolitos sedimentarios como de los protolitos ígneos del CE. El grupo de edades entre 1830 y 1810 Ma ha sido generalmente obtenido en monozircones y bordes recrecidos de zircones zonados de orto- y paragneises del CE. Estas edades se relacionan con la evolución tectonometamórfica de la región de Namibe durante un evento Eburneano relativamente tardío. En particular, las edades indican que el pico térmico del metamorfismo sin-D2 (1832 ± 15 Ma y 1810 ± 19 Ma), la cristalización de leucosomas S2 (1830 ± 21 Ma), la cristalización de leucogranitos anatécticos (1808 ± 7 Ma; suite G1) y la rápida exhumación del CE a T < 350-400 ºC (1822 ± 5 Ma; $^{40}Ar/^{39}Ar$ en moscovita), tuvieron lugar en un corto intervalo de tiempo.

La Fig. 2 incluye una compilación de las edades U-Pb en zircones obtenidas por TIMS y SHRIMP II en las rocas ígneas y metamórficas Paleoproterozoicas del Bloque UTE-PLANAGEO, así como datos de la bibliografía regional del Escudo del Congo. La compilación permite distinguir cuatro eventos tectonomagmáticos eburneanos, acompañados por tres eventos tectonometamórficos de alta-T y migmatización, pero de diferente desarrollo geográfico.

El evento I de edades 2,01-1,98 Ga está registrado con la intrusión de la suite magmática M en el sector de Andulo, próximo al Cinturón Móvil de Angola Central, así como en xenocristales heredados en gneises del CE o en granitoides más jóvenes, sugiriendo procesos de retrabajamiento cortical. El evento tectonometamórfico contemporáneo se caracteriza por una deformación dúctil polifásica y penetrativa, que originó un engrosamiento cortical y un metamorfismo regional de media y baja-P.

El evento II de edades 1,97-1,95 Ga está definido por la intrusión de granitoides de la serie magmática L en el sector de Kuito y Andulo. Indirectamente, este grupo de intrusiones establece la edad del Grupo Chivanda entre 1,98 y 1,97 Ga.

El evento III de edades 1,83-1,81 Ga está registrado en los gneises del CE y metasedimentos del GN del sector de Namibe y norte de Namibia. Por tanto, la orogenia Eburneana se desplazó hacia el SO. Está relacionado con un evento tectonometamórfico caracterizado por una deformación dúctil polifásica, engrosamiento cortical, metamorfismo regional de baja-P, procesos de fusión parcial y formación de leucogranitos anatécticos de la suite magmática G1. Estas relaciones permiten establecer una edad para la sedimentación del GN entre 1,97-1,95 y 1,85-1,83 Ga (Fig, 2). Entre 1,81 y 1,80 Ga se emplazaron las rocas plutónicas de las suites G1, G2 y G3 (Escuder-Viruete et al., 2021). Por tanto, la deformación y metamorfismo regional Eburneano desarrollado en la región de Namibe es relativamente tardío. Las edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ en moscovita son muy próximas a las obtenidas en la misma muestra para el pico térmico del metamorfismo sin-D2 (evento III) y la de formación de leucosomas S2, lo que indica que el enfriamiento del complejo fue muy rápido, implicando una rápida exhumación.

El evento IV de edades entre 1,80 y 1,76 Ga está registrado en el CE aflorante en la región N de Namibia, englobando deformación dúctil, metamorfismo regional, migmatización e intrusión de granitoides (Kröner y Rojas-Agramonte, 2017).

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Proyecto PLANAGEO. Los autores agradecen al IGEO angolano el permiso para publicar los resultados y a la UTE IGME-LNEG-IMPULSO el apoyo recibido durante los trabajos de campo en la región de Namibe.

REFERENCIAS

de Wit, M.J. y Linol, B. (2015): Precambrian Basement of the Congo Basin and its flanking terrains. En: *Geology and Resource Potential of the Congo Basin* (M.J. de Wit, ed.). Regional Geology Reviews. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 417 p.

Escuder-Viruete, J., Correia, J. y Quintana, L. (2021): *Notícia Explicativa da Carta Geológica à escala 1:250.000 SUL D-33/S e SUL D-33/Z do Namibe*. Instituto Geológico de Angola. Ministério de Recursos Minerais e Petróleos. Luanda. 180 p.

Gutiérrez-Medina, M. (2021): *Notícia Explicativa da Folha Geológica à escala 1:250.000 de Munhino Sul D-33/M.* Instituto Geológico de Angola. Ministério de Recursos Minerais e Petróleos. Luanda. 218 p.

Kröner, A. y Rojas-Agramonte, Y. (2017): Mesoproterozoic (Grenville-age) granitoids and supracrustal rocks in Kaokoland, northwestern Namibia. *Precambrian Research*, 298: 572-592.

Petrología, fábrica estructural y geocronología U-Pb TIMS en zircón de las suites de granitoides de la región de Namibe (suroeste de Angola): registro de la evolución tectonomagmática Eburneana en el Escudo del Congo Suroccidental.

Petrology, structural fabric and TIMS U-Pb zircon geochronology of the granitoid suites from the Namibe region (southwestern Angola): record of the Eburnean tectonomagmatic evolution in the Southwestern Congo Shield.

J. Escuder-Viruete[1*], P. Valverde-Vaquero[1], A. Beranoaguirre[2], P. Montero[3] y J. Manuel[4]

1 Instituto Geológico y Minero España (IGME), CSIC, C/ La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid, España. *j.escuder@igme.es
2 Institut für Geowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt, Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt am Main, Alemania.
3 Laboratorio de Microsonda Iónica-IBERSIMS. Centro de Instrumentación Científica. Universidad de Granada, Granada, España.
4 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Kilamba. Luanda, Angola.

Resumen: Durante el tránsito Orosírico a Estatérico intruyeron una gran variedad textural y composicional de granitoides en la región de Namibe del Escudo del Congo Suroccidental. Este magmatismo fue contemporáneo con un evento tectonometamórfico regional Eburneano, caracterizado por una deformación dúctil polifásica (D1 a D4), engrosamiento cortical, metamorfismo regional de alta-T/baja-P, fusión parcial y formación de granitos anatécticos. Los datos petrológicos y estructurales permiten distinguir tres suites granitoides (G1 a G3). Las fábricas magmáticas plano-lineares presentes en sills de granitos y leucogranitos de la suite G1 son paralelas al contacto intrusivo y a las fábricas S2-L2 en los gneises encajantes, estableciendo un emplazamiento sin- y tardi-D2. Los granitoides de las asociaciones de facies gabroico-diorítica y tonalítico-granodiorítica de la suite G2 ocupan el núcleo de las antiformas D3 y presentan fábricas magmáticas paralelas a las fábricas deformativas S3-L3 del encajante, estableciendo su intrusión de sin- a tardi-D3. Los granitos de la suite G3 forman macizos de contornos elípticos discordantes con la macroestructura de D3 y presentan una organización textural zonada concéntricamente. La orientación de la fábrica magmática planar y de los enclaves es subparalela a la esquistosidad S4 en el encajante, indicando su intrusión sin- a post-D4.

Palabras clave: *Escudo del Congo Suroccidental; Orogenia Eburneana; suites granitoides; Angola.*

Abstract: *During the Orosirian to Statherian transition, a great textural and compositional variety of granitoids intruded in the Namibe region of the Southwestern Congo Shield. This magmatism was contemporaneous with a regional Eburnean tectonometamorphic event, characterized by polyphase (D1 to D4) ductile deformation, crustal thickening, high-T/low-P regional metamorphism, partial melting and formation of anatectic granites. Petrological and structural data allow us to distinguish three granitoid suites (G1 to G3). The planar-linear magmatic fabrics present in the granite and leucogranite sills of the G1 suite are parallel to the intrusive contact and the S2-L2 deformation fabrics in the enclosing gneisses, establishing a syn- to tardi-D2 emplacement. The granitoids of the gabbroic-dioritic and tonalitic-granodioritic facies associations of the G2 suite intruded the core of the D3 antiforms and contain magmatic fabrics parallel to the S3-L3 deformation fabrics of the host-rocks, which establishes a syn- to late-D3 intrusion. The granites of the G3 suite form elliptical massifs that cut the D3 macrostructure and present a concentrically zoned textural organization. The orientation of the planar magmatic fabric and enclaves is subparallel to the S4 schistosity in the host, indicating their syn- to post-D4 intrusion.*

Key words: *Southwestern Congo Shield; Eburnean orogeny; granitoid suites; Angola.*

INTRODUCCIÓN

El territorio de Angola forma geológicamente parte del Escudo del Congo Suroccidental de África Central (Fig. 1; sensu de Wit y Linol, 2015). El Escudo del Congo incluye varios cratones Arcaicos, que fueron estabilizados a edades >2,5 Ga y que forman bloques corticales rodeados por cinturones orogénicos Eburneanos (ca. 2,3-1,8 Ga), Kibarianos (ca. 1,4-1,0 Ga) y Panafricanos (ca. 0,8-0,5 Ga). El Escudo del Congo Suroccidental constituye un dominio cortical sometido a los procesos tectono-magmáticos y tectono-metamórficos relacionados con la orogenia Eburneana (Jelsma et al., 2018). Dicho Escudo comprende los cratones arcaicos de Ntem, Cuango y Kasai, así como un amplio dominio cortical situado al suroeste en Angola y noroeste de Namibia, tradicionalmente denominado como "Escudo de Angola" (Fig. 1). Jelsma et al. (2018) individualizan en este dominio el denominado Cinturón Móvil de Angola Central, que originó la consolidación

del Escudo del Congo Suroccidental. El Cinturón consiste en una banda de dirección NO-SE y unos 200 km de anchura, caracterizada por una intensa deformación dúctil y un metamorfismo regional Eburneano, acompañado por un extenso magmatismo granítico, que ha reactivado a rocas Arcaicas. Sin embargo, los datos obtenidos en el marco del Proyecto PLANAGEO indican que el sector afectado por la orogenia Eburneana continúa cientos de kilómetros más al sur del Cinturón, por lo que sus límites estructurales aún no están bien definidos. La región de Namibe del suroeste de Angola forma parte de este poco conocido sector del Escudo del Congo Suroccidental.

En el presente trabajo se describen la petrología, las fábricas estructurales y la geocronología U-Pb TIMS en zircón y $^{40}Ar/^{39}Ar$ en separados minerales de los granitoides de la región de Namibe. Estos datos proceden de los trabajos de cartografía geológica a escala 1:250.000 realizados en la Hoja Sul D-33/S de Namibe en el Proyecto PLANAGEO (Escuder-Viruete et al., 2021). Estos datos permiten discutir: (1) la existencia de una secuencia tectonomagmática de granitoides compuesta por tres suites composicionales; (2) el tiempo de emplazamiento de cada suite respecto a la evolución tectónica regional; y (3) las relaciones temporales de cada suite con el pico térmico del metamorfismo Eburneano, los procesos de fusión parcial y la evolución retrógrada posterior.

PETROLOGÍA

En la región de Namibe es posible distinguir litológicamente el conjunto de orto- y paragneises del Complejo de Epupa (CE) de los metasedimentos supracorticales del Grupo Namibe (GN; Fig. 2). Ambos conjuntos experimentaron durante la orogenia Eburneana una deformación dúctil polifásica y un metamorfismo regional que alcanzó las condiciones de fusión parcial en amplios sectores. Las estructuras eburneanas pueden agruparse en dos eventos deformativos dúctiles principales, D1 y D2, junto con otros dos eventos tardíos menos penetrativos, D3 y D4. Durante el tránsito Orosírico a Estatérico tuvo lugar la intrusión de una gran variedad textural y composicional de granitoides tanto en los gneises del CE como en el GN. Los datos petrológicos y estructurales han permitido distinguir tres suites granitoides (Escuder-Viruete et al., 2021): G1, G2 y G3.

Los granitos foliados y deformados de la suite G1 constituyen un grupo texturalmente heterogéneo de granitoides inhomogéneos, leucogranitos de dos micas y leucogranitos con biotita, frecuentemente asociados a gneises metatexíticos, diatexíticos y nebulíticos del CE. Son granitos autóctonos a sub-alóctonos, emplazados concordantemente a la S2 del encajante en condiciones de la facies de las anfibolitas de alta-T. Estas características indican una estrecha relación entre el pico térmico del metamorfismo, los procesos de fusión parcial y la generación de magmas graníticos peralumínicos de tipo S (Chapell y White, 2001) en niveles mesocorticales.

Los granitoides de la suite G2 incluyen un amplio rango composicional, en el que los términos más básicos están representados por gabros, dioritas y cuarzo-dioritas con hornblenda, y los más ácidos por tonalitas, granodioritas y monzogranitos con hornblenda y biotita. Intruyen formando diques, sills y apófisis a los granitos de la suite G1, y se caracterizan por incluir al anfíbol cálcico como mineral ferromagnesiano formando incluso cumulados (hornblenditas), contener frecuentes enclaves máficos microgranudos y presentar composiciones metalumínicas son características típicas de los granitos de tipo I (Chappell y White, 2001), derivados de fuentes magmáticas que incluyen las subcorticales. Las relaciones de campo entre las asociaciones de facies gabroico-diorítica y tonalítico-granodiorítica, las texturas observadas en los enclaves máficos y la existencia de facies híbridas cuarzo-dioríticas son consistentes con la interacción (*mingling* y/o *mixing*) entre un magma básico y un magma ácido contemporáneos durante D3. Esta hibridación tuvo lugar en una zona de mezcla magmática, análoga a las descritas en otros granitoides calco-alcalinos.

Los granitos y granodioritas de la suite G3 se emplazaron en condiciones epizonales, formando macizos de contornos circulares o elípticos en la cartografía. Los magmas desarrollaron aureolas de metamorfismo de contacto en las rocas encajantes cuando existió un marcado contraste de T de metamorfismo. Las fábricas magmáticas subverticales indican un emplazamiento durante el acortamiento subhorizontal ONO-ESE de D4. Las fábricas magmáticas presentes hacia el borde externo y subparalelas al contacto intrusivo indican un emplazamiento de los magmas controlado principalmente por un proceso de inflamiento y subordinadamente por las fuerzas tectónicas regionales, cuando el complejo metamórfico se encontraba en un nivel cortical ya superficial. Las facies composicionales intermedio-básicas preservadas en forma de enclaves, pueden contener hornblenda y biotita como minerales ferromagnesianos, y su composición metalumínica y peralumínica indica que se trata de granitos de tipo I (Chappell y White, 2001).

ESTRUCTURAS Y FÁBRICAS MAGMÁTICAS

Las relaciones de campo y los datos estructurales establecen que las fábricas magmáticas plano-lineares presentes en los sills de granitos y leucogranitos de la suite G1 son paralelas al contacto intrusivo y a las fábricas deformativas S2-L2 en los gneises encajantes del CE. Por tanto, los granitos de la suite G1 intruyeron de forma sin- y tardi-cinemática respecto a D2. A favor de esta interpretación es la local superposición subparalela de fábricas subsólidus deformativas D2, acompañando el enfriamiento de los granitos. No obstante, se han observado pequeños volúmenes de granitos de la suite G1 que intruyen cortando a las estructuras D2, por lo que localmente también son magmas post-D2.

Los granitoides de las asociaciones de facies gabroico-diorítica y tonalítico-granodiorítica de la suite G2 se disponen cartográficamente ocupando las

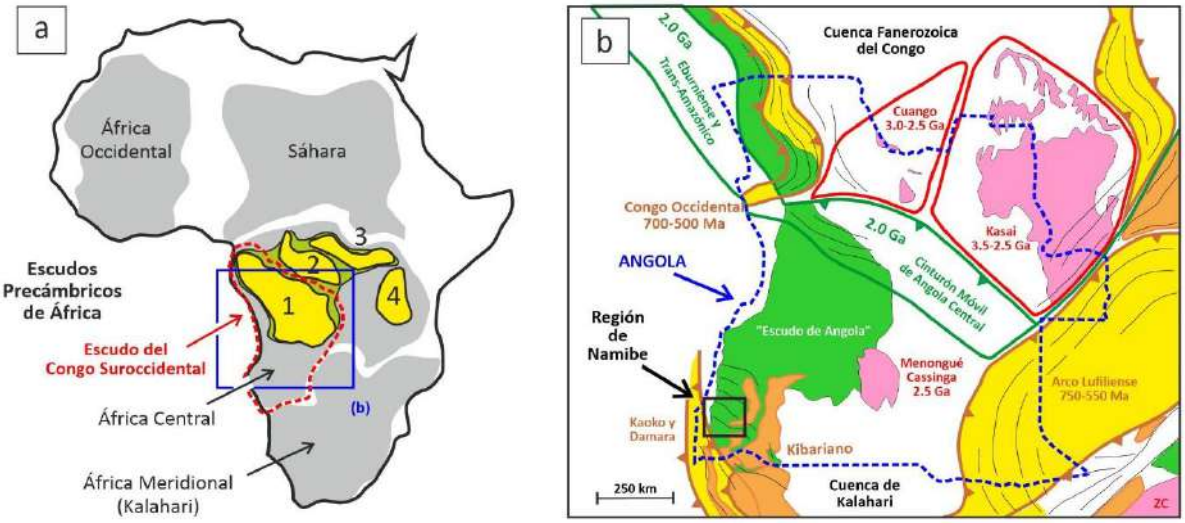


FIGURA 1. *(a) Mapa simplificado de los Escudos Precámbricos de África (mod. de Wit y Linol, 2015), mostrando los cratones (amarillo) que componen el Escudo de África Central (verde): (1) Cratón del Congo Suroccidental; (2) Cratón del Congo Central o Cuvette; (3) Cratón del Congo Nororiental o Mboumou-Uganda; y (4) Cratón de Tanzania. La línea roja discontinua marca el límite del Escudo del Congo Suroccidental que incluye los cratones arcaicos de Ntem, Cuango y Kasai. (b) Mapa esquemático del basamento Precámbrico que compone el territorio de Angola y áreas limítrofes (mod. de Wit y Linol, 2015). El mapa muestra los bloques cratónicos Arcaicos (rosa), cinturones orogénicos Eburneanos (verde) y Kibarianos (naranja), así como los frentes orogénicos de los Cinturones de pliegues y cabalgamientos Panafricanos (amarillo). El basamento está recubierto principalmente por la Cuenca Fanerozoica del Congo y de Kalahari. La línea azul discontinua define los límites administrativos de Angola. La línea negra marca la situación de la región de Namibe. ZC: Cratón de Zimbabwe.*

antiformas D3, formando macizos elongados paralelamente a las zonas de charnela D3 y en estrecha relación estructural con los gneises del CE y los granitos de la suite G1. A escala de afloramiento, estos granitoides han desarrollado una foliación magmática, generalmente mejor definida hacia la zona de contacto intrusivo, donde es subparalela a la foliación S3 del encajante. Hacia el contacto, la lineación magmática es subparalela también a la L3 del encajante. Presentan igualmente bandas de cizalla subverticales de dirección ONO a NO y movimiento senestro, donde se superpone una deformación sub-sólidus sin-D3 de alta-T. Estas relaciones indican que los granitos de la suite G2 se emplazaron en momentos de sin- a tardi-D3. La mayor penetratividad de las fábricas magmáticas hacia el contacto intrusivo indica que el emplazamiento de los magmas estuvo principalmente controlado por los esfuerzos tectónicos regionales y subordinadamente por los propios del magma relacionados con su intrusión.

Los granitos de la suite G3 se emplazaron cortando a las macroestructuras de D3 y desarrollaron aureolas de metamorfismo de contacto donde la recristalización estática y la blastesis se superpone a la foliación S3. Los datos estructurales indican que la orientación de la fábrica magmática plano-linear y la de los enclaves gneísicos y graníticos es subparalela a los planos de esquistosidad S4 en las rocas metamórficas encajantes. Sin embargo, existen también granitos en la suite G3 que no han desarrollado una fábrica magmática apreciable a escala de afloramiento. Estas relaciones indican que los granitos de la suite G3 intruyeron de sin- a post-D4.

GEOCRONOLOGÍA

Las edades U-Pb SHRIMP obtenidas en monozircones y bordes recrecidos de zircones zonados en gneises del CE gradúan entre 1830 y 1810 Ma (Fig. 2). Las edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ obtenidas en separados de moscovita en los paragneises son de 1822,9 ± 4,9 y 1798,1 ± 8,5 Ma. Estas edades se relacionan con la evolución tectonometamórfica de la región de Namibe durante un evento relativamente tardío de la orogenia Eburneana y permiten establecer que el pico térmico del metamorfismo sin-D2 en condiciones de la facies anfibolítica de alta-T, la cristalización de leucosomas migmatíticos paralelos a la S2 y la exhumación del CE a T < 350-400 °C, tuvieron lugar en un corto intervalo de tiempo (~25 Ma). Las edades U-Pb TIMS obtenidas en zircones de las suites granitoides gradúan entre 1810 y 1800 Ma (Fig. 2). En general, se observa una ordenación en el tiempo para las edades de cristalización de los magmas, desde las más antiguas de la suite G1 sin-a tardi-D2, que coinciden con las edades del pico metamórfico obtenidas en los gneises, a las edades de la suite G2 sin- a tardi-D3, y a las edades de la suite G3 sin- a post-D4. Por tanto, las edades U-Pb en zircones son consistentes con las relaciones entre el momento de emplazamiento de los granitos y la evolución estructural regional.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Proyecto PLANAGEO. Los autores agradecen al IGEO angolano el permiso para publicar los resultados y a la UTE IGME-LNEG-IMPULSO el apoyo recibido durante los trabajos de campo en la región de Namibe.

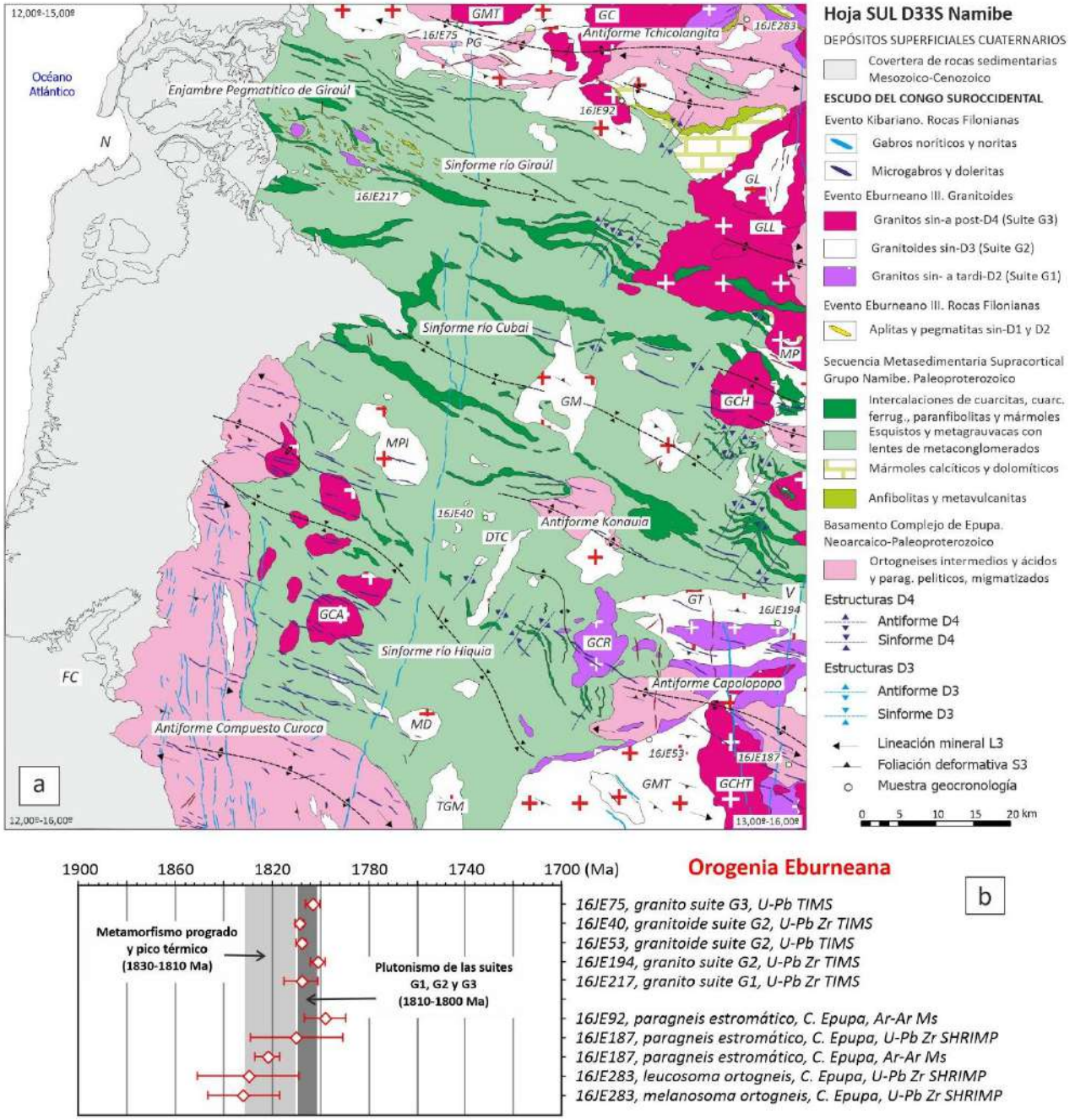


FIGURA 2. *(a) Mapa geológico esquemático de la región de Namibe (mod. Escuder-Viruete et al., 2021), mostrando las principales macroestructuras y la distribución de las suites de granitoides Eburneanos. PG; Dioritas y Monzogranitos de Piedra Grande, GL; Granodioritas y Monzogranitos de Laué, MP; Monzogranitos de Picona, GM; Granodioritas y Monzogranitos de Macala, MPI; Monzogranitos del Pico, DTC; Dioritas y Tonalitas de Chamacuala, GT; Granodioritas y Monzogranitos de Tulandjo, GMT; Granodioritas y Monzogranitos de Teteombe, TGM; Tonalitas y Granodioritas de Mupavia, MD; Monzogranitos de Dalundo, GMT; Granitos de Monte Tubirute, GC; granitos de Caraculo, GPG; granitos de Linda Linda, GCH; granitos de Chintangala, GCA, granitos de Caraué, GCHT; granitos de Chitundulu, GD; GCM; granitos de Camahaha. Poblaciones: FC; Façenda Curoca, N; Namibe, V; Virei. (b) Resumen de las edades U-Pb obtenidas por TIMS, SHRIMP II y Ar-Ar en la región de Namibe. Las edades en los gneises datan el metamorfismo progrado y el pico térmico; las edades en los granitoides datan su intrusión durante el pico térmico (suite G1) y durante la evolución retrógrada (suites G2 y G3).*

REFERENCIAS

Chappell, B.W. y White, A.J.R. (2001): Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489-499.

de Wit, M.J. y Linol, B. (2015): Precambrian Basement of the Congo Basin and its flanking terrains. En: *Geology and Resource Potential of the Congo Basin* (M.J. de Wit, ed.). Regional Geology Reviews. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 417 p.

Escuder-Viruete, J., Correia, J. y Quintana, L. (2021): *Notícia Explicativa da Carta Geológica à esc. 1:250 000 SUL D-33/S e SUL D-33/Z do Namibe*. Instituto Geológico de Angola. Ministério de Recursos Minerais e Petróleos. Luanda. 180 p.

Jelsma, H.A., McCourt, S., Perritt, S.H. y Armstrong, R.A. (2018): The Geology and Evolution of the Angolan Shield, Congo Craton. En: *Geology of Southwest Gondwana* (S. Siegesmund et al., eds.), Regional Geology Reviews, 217-239.

Serie cartográfica de Rocas y Minerales Industriales de Angola. Resultados del proyecto CARMINA.

Cartographic series of Industrial Rocks and Minerals of Angola. Results of the CARMINA project.

J. Fernández[1], J.V. Lisboa[2], M. Iglesias-Martínez[3,4], J.C. Gumiel[5], M.C. Feria[3,6], A. Francés[2], E. Merino-Martínez[5], J. Manuel[7] y J.L. García[5]

1 Departamento de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, 33005 Oviedo, España. j.fernandez@igme.es
2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Lisboa, Portugal.
3 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/Impulso), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
4 Mineral Resources, CSIRO, 26 Dick Perry Avenue, Kensington, Western Australia 6151.
5 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España.
6 Sistemas Avanzados de Tecnología, S.A (SATEC), Av. Europa, 34 A, 28023, Madrid, España.
7 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Resumen: El Gobierno de la República de Angola, consciente de la importancia del sector de las rocas y minerales industriales en el desarrollo socioeconómico de su territorio, evitando la dependencia de la minería metálica, energética y diamantífera, ha promovido la realización una nueva serie cartográfica en el ámbito del subprograma CARMINA, dentro del Proyecto PLANAGEO (Plan Nacional de Geología) para elaborar un total de 30 mapas geológico-mineros. Con una metodología moderna, y definiendo Áreas de Potencialidad Minera, esta serie cartográfica incluye unas memorias asociadas que recogen las investigaciones y resultados técnico-analíticos del área de estudio. Los trabajos han puesto de manifiesto el formidable potencial en el ámbito de las rocas y minerales industriales, recogido en esta nueva serie cartográfica que pretende profundizar en la situación actual del sector, realizando un exhaustivo repaso por todas las rocas y minerales explotadas en la actualidad o en el pasado, la tipología de los yacimientos donde se localizan dichas sustancias, una descripción de cómo se realiza la minería actual de los materiales, los usos principales a los que se destinan, etc., que permita mejorar el conocimiento y aprovechamiento minero de los mismos y tenga aplicación en la ordenación territorial.

Palabras clave: cartografía geológica, minería, rocas y minerales industriales, Angola.

Abstract: *The Government of the Republic of Angola, aware of the importance of the industrial rocks and minerals sector in the socioeconomic development of its territory, avoiding dependence on metal, energy, and diamond mining, has promoted the creation of a new cartographic series in the scope of the CARMINA subprogram, within the PLANAGEO Project (National Geological Plan of Angola) to prepare a total of 30 geological maps. This initiative aims to produce a total of 30 geological-mining maps, using modern technology as a fundamental contribution to the planning of mineral resource exploitation. The series defines Areas of Mineral Potential and includes accompanying reports that detail the research and technical-analytical results of the study area. The work has revealed the significant potential of industrial rocks and minerals, as documented in these new cartographic series. This project seeks to delve into the current state of the sector, conducting a thorough review of all rocks and minerals currently or historically exploited, the typology of the deposits hosting these substances, a description of contemporary mining practices for those materials, their primary uses, etc. This approach aims to enhance the knowledge and application of these resources within the mining sector with direct implementation in territorial planning.*

Key words: *geological mapping, mining exploration, industrial rocks and minerals, Angola.*

INTRODUCCIÓN

Se establecen los Mapas de Angola de Rocas y Minerales Industriales a escala 1:50.000 como un mapa geológico-minero en el que se sintetiza, para el ámbito territorial considerado, el estado actual del conocimiento de la minería de rocas y minerales industriales y su potencialidad, con los siguientes objetivos:

- Conocer la realidad actual de las rocas y minerales industriales.
- Relanzar y dinamizar el sector minero nacional.
- Mejorar el conocimiento geológico-minero y el potencial de los recursos de rocas y minerales industriales del territorio nacional.
- Garantizar el desarrollo sostenible del país a través, de entre otras acciones, del aumento de la contribución del sector de la minería de rocas y minerales industriales.

Con este trabajo se pretende, profundizar en la situación actual del sector, realizando un exhaustivo repaso por todas las rocas y minerales industriales explotadas en la actualidad o en el pasado, la tipología de los yacimientos donde se localizan dichas sustancias, una descripción de cómo se realiza la minería actual de los materiales, los usos principales a los que se destinan, etc., reflejando esta información en una moderna serie cartográfica (Baltuille *et al.*, 2006), que constituye el Mapa de Rocas y Minerales Industriales, que permita mejorar el conocimiento y aprovechamiento minero de los mismos y tenga aplicación en la ordenación territorial.

La variedad de rocas y minerales industriales ha sido amplia, destacando, en la zona de estudio asociada a las 30 hojas del programa CARMINA (Cartas de Rocas y Minerales Industriales de Angola) (Fig. 1), los depósitos existentes en las pegmatitas y las rocas ornamentales.

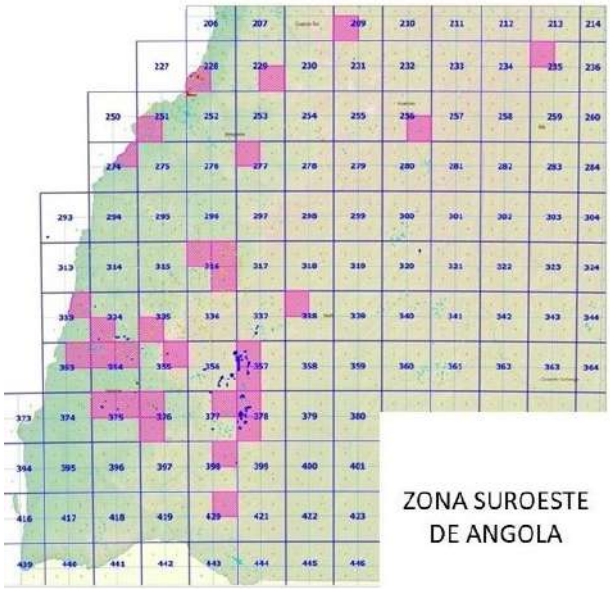


FIGURA 1. *Distribución de los mapas de la serie CARMINA a escala 1:50.000, en la zona Suroeste de Angola.*

Un trabajo de tal envergadura supone la aplicación de una metodología de trabajo que abarque todos los estadios del proyecto, desde el planteamiento de las propias rocas y minerales industriales hasta los productos finales. La experiencia desarrollada a lo largo de los años por los Servicios Geológicos de Portugal (LNEG) y España (CN IGME-CSIC) permitió el desarrollo de unas Especificaciones Técnicas encaminadas al conocimiento y caracterización de las rocas y minerales industriales. Tras los trabajos de campo realizados en las 30 hojas cartográficas del proyecto CARMINA, y su posterior procesado, se han conseguido elaborar tres productos destinados a la investigación y evaluación del potencial de las rocas y minerales industriales en Angola. Estos son la Base de Datos, las memorias y las cartografías geológico-mineras.

PRODUCTOS DISPONIBLES PARA LA INVESTIGACIÓN MINERA Y LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

La Base de Datos de Recursos Minerales, denominada “Arquivo de Rochas e Minerais Industriais de Angola” (ARMINA) integra la información geológico-minera sobre indicios y explotaciones de rocas y minerales de manera que toda la información esté disponible de manera fácil. La base de datos se distribuye en 11 pestañas de carga y acceso a la información en una sencilla interfaz de visualización (Fig. 2).



FIGURA 2. *Una de las pestañas de consulta del formulario de la base de datos ARMINA. Sirva como modelo de distribución y aspecto de una de las pestañas de la base de datos (BBDD).*

La organización de grandes volúmenes de información geológico-minera en una base de datos como ARMINA ha permitido, en primer lugar, disponer de toda la información sobre recursos de rocas y minerales industriales estructurada y en el formato conveniente. Así, se han podido emplear herramientas de procesado y representación, como visualización en tiempo real en entorno SIG, que han supuesto una optimización en el proceso de modelización, que redunda en una mejor compresión de la geología para uso en minería y un ahorro en tiempo a la hora del acceso a la información.

Con idea de ofrecer una visión actual y moderna de las rocas y minerales industriales explotadas en estas zonas de Angola, así como de los explotadores, los materiales y de sus usos, se han elaborado las memorias, donde se recoge un inventario pormenorizado de este sector minero y se realiza un análisis minero-industrial del mismo en el ámbito geográfico de cada una de ellas.

El contenido de las memorias está estructurado en una serie de capítulos, el primero de los cuales, *Introducción y antecedentes*, aborda cuestiones generales relativas a las rocas y minerales industriales, el encuadre físico de cada una de las mismas, unos detallados antecedentes de investigaciones anteriores relacionadas con la temática y la metodología empleada para alcanzar los objetivos propuestos.

En el capítulo segundo, *Encuadre geológico*, se sintetiza la información sobre los límites geológicos de cada una de las cartas, los dominios geológico-estructurales que la conforman y su litoestratigrafía.

En el capítulo tercero, *Descripción de las explotaciones e indicios de rocas y minerales industriales*, se hace un exhaustivo análisis de todas las sustancias explotadas en la zona de estudio, ya sea actualmente o en el pasado, y de las sustancias potencialmente explotables. Para ello se realiza una descripción pormenorizada de las unidades litológicas donde aparecen más frecuentemente y se enumeran, describen y caracterizan las explotaciones activas, las explotaciones abandonadas y los indicios de cada sustancia referenciada.

En el cuarto capítulo, *Valoración minero-industrial*, se analizan los principales sectores industriales a los que se destina la producción de las sustancias explotadas y se cuantifica sectorialmente dicha producción.

El capítulo quinto, *Conclusiones y recomendaciones*, se dedica a analizar cuidadosamente los resultados obtenidos en las investigaciones de campo y laboratorio, así como a establecer una serie de sugerencias a la hora enfocar las futuras investigaciones y las zonas de mayor potencial de yacimientos minerales.

En el sexto y último capítulo, *Bibliografía*, se listan las referencias bibliográficas citadas en el texto, así como páginas Web relacionadas. Se ha incluido, además, unos *Anexos*, que contienen el listado de explotaciones e indicios y los usos y sectores de consumo de cada una de las sustancias.

Como tercer pilar para la investigación minera de Angola, se han elaborado las cartografías de las 30 hojas a escala 1:50.000 (Fig. 3), que reflejan la distribución espacial de yacimientos y explotaciones de rocas y minerales industriales sobre una base geológica simplificada y adecuada a los objetivos del Mapa de Rocas y Minerales Industriales (MRMI). Los yacimientos y explotaciones se representan mediante una simbología que recoge la utilización del recurso, el estado del yacimiento y el tamaño del mismo. Las sustancias detectadas o explotadas se señalan mediante una abreviatura. Cada yacimiento y explotación tiene un número de identificación que permite la localización de la ficha de datos correspondiente. Las unidades cartográficas se diferencian por tramas de distintos patrones y colores.

Las Áreas de Potencialidad Minera (APM) indicadas en el MRMI son áreas con interés minero predecible y pueden proporcionar investigaciones más detalladas. La base para su demarcación fue la existencia en una determinada unidad o facies geológica, intrusión, dique, etc., de signos y/o actividad extractiva actual o pasada de potencial interés, incluidos trabajos de prospección, encaminados a la exploración de roca ornamental o minerales industriales. Corresponden por tanto a zonas que, por su geología y ubicación, pueden albergar zonas potencialmente interesantes para los materiales en cuestión.

Poner en valor este tipo de cuestiones para "maximizar la actividad económica y el empleo", en especial en zonas rurales, es fundamental para el desarrollo y la diversificación de la entrada de ingresos de un país (Calvo Pérez, 2000).

Estos mapas se constituyen como un inventario de las explotaciones, tanto activas como inactivas, y los indicios y afloramientos de rocas y minerales industriales, todos ellos determinados con su simbología, para así diferenciar los tipos de explotaciones existentes, el estado de la actividad y las sustancias y usos que tienen cada una de ellas.

Toda la información, además de servir para la evaluación de nuevos yacimientos, reevaluación de explotación de canteras abandonadas, también podrá utilizarse en la ordenación territorial, en concreto en espacios naturales o materias relacionadas con el urbanismo. La ordenación y planificación, en ocasiones, interfiere con intereses mineros y cuanto más y mejor se conozcan los depósitos minerales, mejor se podrá hacer la ordenación de todos los recursos naturales de rocas ornamentales y rocas y minerales industriales.

CONCLUSIONES

En el ámbito de las rocas y minerales industriales (subprograma CARMINA) se han elaborado un total de 30 mapas geológico-mineros, definiendo Áreas de Potencialidad Minera de mayor interés mineral, con unas memorias asociadas que recogen las investigaciones y resultados técnico-analíticos del área de estudio. Los trabajos han puesto de manifiesto el formidable potencial de las rocas y minerales industriales.

Con la puesta en marcha de este proyecto y la entrega de los primeros mapas, las distintas administraciones de Angola disponen de una minuciosa cartografía geológico-minera y unas detalladas memorias descriptivas que presentan los resultados de la investigación de manera homogénea. Toda la información servirá para facilitar el acceso a los resultados y promover futuros estudios mineros basados en información científica, y suministrar una herramienta útil para la explotación del conocimiento minero por parte de distintas instancias, tanto públicas como privadas, aplicándola a la investigación y planificación del aprovechamiento de los recursos mineros y a la ordenación del territorio, de cara a un mayor desarrollo sostenible del marco natural del territorio donde se desarrolla.

Un concepto moderno, como es la ordenación del territorio, se presenta aquí como una oportunidad para combinar el aprovechamiento de los recursos mineras junto con otras actividades históricas de la zona, como la agricultura y la ganadería, y futuras, como el turismo, el urbanismo y la industria. El mejor conocimiento y la previa caracterización de los recursos minerales,

protegerá el futuro desarrollo minero de una zona necesitada de estímulos económicos estables y de calidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado de las investigaciones realizadas en el marco del Proyecto PLANAGEO (Plan Nacional de Geología de Angola), promovido por el Gobierno de la República de Angola, ejecutado con juntamente con el Servicio Geológico de Angola (IGEO), bajo la supervisión del Ministerio de Recursos Minerales, Petróleo y Gas (MIREMPET).

Nuestro más grande agradecimiento a las autoridades, personal civil y empresas mineras del sur de Angola por las facilidades de acceso a la información de sus yacimientos y concesiones, y al personal de la empresa Impulso Industrial Alternativo en este proyecto.

REFERENCIAS

Baltuille Martín, J.M., Ferrero Martín, A., López López, M.T., Monteserín López, V., do Olmo Sanz, A., Fernández Suárez, J., Nuño Ortea, C. y Rubio Navas, J. (2006): *Protocolo de Realização do Mapa Nacional de Rochas e Minerais Industriais, à escala 1:200.000 (MANARMIN)*. IGME (informe inédito), Madrid, España, 87 p.

Calvo Pérez, B. (2000): As rochas e minerais industriais como elemento de desenvolvimento sustentável. En: *Rochas e Minerais Industriais de Iberoamérica* (B. Calvo Pérez, A. Gajardo Cubillos y M. Maya Sánchez, Eds.). ITGE, Madrid, España, pp. 17-32.

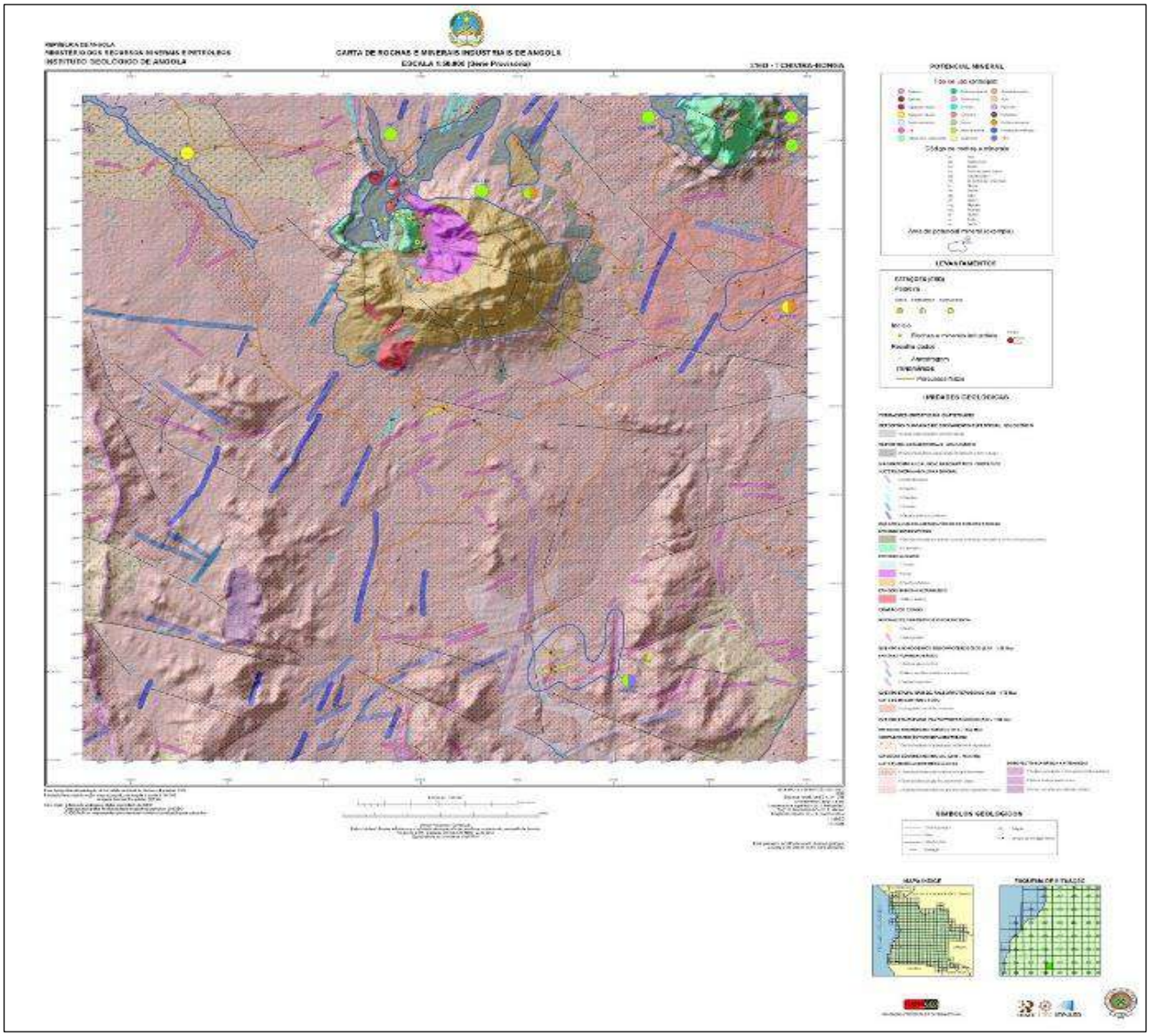


FIGURA 3. *Aspecto y distribución de la información de la nueva serie cartográfica de rocas y minerales industriales de Angola. Sirva como modelo para la visualización de la distribución y aspecto del mapa.*

Evolución cortical del suroeste del Escudo de Angola: perspectivas de isotopos de U-Pb y Lu-Hf en circones de secuencias mesoproterozoicas.

Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes in Mesoproterozoic strata: a window to the crustal evolution of the southwest Angolan Shield.

E. Ferreira[1,2*], J. Lehmann[3], J.F. Rodrigues[4], B. Hayes[5], E. Merino-Martínez[1], L. Milani[6], G. Bybee[5], T.M. Owen-Smith[3], J.L. García Lobón[1], C. Tassinari[7], H. Ueckermann[3], K. Sato[7], P.B. Silva[2], J. Correia[2], J. Labaredas[2], L. Duarte[2], M.A. Molekwa[3], J. Manuel[8] y A.M.L. Victorino[8]

1 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, 28760 Tres Cantos, Madrid, Spain. *Corresp. author: ej.ferreira@igme.es
2 UTE PLANAGEO-/LNEG/IIA), 2610-999 Amadora, Portugal.
3 University of Johannesburg, Auckland Park, 2006, África del Sur.
4 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), 4466-901 São Mamede de Infesta, Portugal.
5 University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2050, África del Sur.
6 University of Pretoria, Hatfield 0028, África del Sur.
7 Centro de Pesquisas Geocronológicas, Universidade de São Paulo, São Paulo 05422-970, Brasil.
8 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Luanda, Angola.

Palabras clave: Escudo de Angola, evolución crustal, Mesoproterozoico, U-Pb y Lu-Hf, circón detrítico.

Resumen

Las edades máximas de deposición de las secuencias metasedimentarias de Iona (<1,32 Ga), Cahama (<1,18 Ga) y Ompupa (<1,22 Ga) del SO de Angola, descartan su correlación con el cercano Grupo Chela (Paleoproterozoico: <1,78 Ga). Los datos de procedencia indican fuentes detríticas internas al Escudo de Angola (EA). Procesos de retrabajamiento de una corteza Paleo- a Mesoarcaica dominaron el magmatismo hasta el Orosírico inferior (>1,93 Ga), potencialmente en orógenos colisionales. Los circones del Orosírico superior al Estatérico inferior (1,87–1,73 Ga) registran un cambio geodinámico, con magmatismo originado en un retroarco extensional de un orógeno acrecional. El Calímico inferior (1,56–1,50 Ga) marca la reanudación magmática con la generación de magmas predominantemente juveniles. El magmatismo asociado al Complejo del Kunene (KC) (1,50–1,36 Ga) muestra composiciones de Hf en circón muy variables, sugiriendo mezcla entre fundidos corticales y magmas juveniles. El magmatismo post-KC (1,36–1,30 Ga) presenta un aumento de contribución juvenil, posiblemente vinculado a una nueva extensión del retroarco o al colapso de la corteza. Las composiciones de Hf en circones datados entre 1,29 y 1,18 Ga coinciden con la composición de la corteza juvenil de 1,56–1,50 Ga, sugiriendo magmatismo dominado por procesos de retrabajamiento crustal. El emplazamiento de diques/sills máficos de 1,13–1,10 Ga marca el fin del magmatismo Mesoproterozoico en el EA.

Abstract

Mesoproterozoic maximum depositional ages for the Iona (<1.32 Ga), Cahama (<1.18 Ga), and Ompupa (<1.22 Ga) metasediments dismiss proposed ties with the nearby Paleoproterozoic Chela Group (< 1.78 Ga) in SW Angola. Provenance data show that detrital sources were internal to the Angolan Shield (AS). Successive reworking of Paleo- to Mesoarchean crust dominated magmatism until the early Orosirian (>1.93 Ga), potentially in collisional orogens. Late Orosirian to early Statherian (1.87–1.73 Ga) zircons record a shift in geodynamic processes, with magmatism likely originating in an extensional accretionary orogen. Magmatism resumed in the Early Calymmian (1.56–1.50 Ga) with generation of predominantly juvenile magmas. Kunene Complex (KC) magmatism (1.50–1.36 Ga) displays variable Hf compositions, suggesting mixing between reworked crust and juvenile melts. Post-KC 1.36–1.30 Ga magmatism exhibits an increased juvenile contribution, possibly linked to slab retreat and back-arc extension, or extensional crustal collapse. Zircon Hf compositions at 1.29–1.18 Ga overlap with the Hf composition of the Early Calymmian juvenile crust suggesting prevalence of crustal reworking processes during magma generation. The emplacement of 1.13–1.10 Ga mafic dikes/sills concludes Mesoproterozoic magmatism in the AS.

El Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO).

The National Geological Plan of Angola (PLANAGEO).

J.L. García-Lobón[1*], E. Merino-Martínez[1], J.F. Rodrigues[2], J. Fernández[1], J. Escuder-Viruete[1], E. Pereira[2], J. Carvalho[2], M.J. Batista[2], J.V. Lisboa[2], R. Martín-Banda[1], A. Frances[2], E. Ramalho[2], E. Ferreira[1,3], I. Martín-Méndez[1], C. Rey-Moral[1], M.C. Feria[3], T. Mochales[1], I. Cuervo[3], A.M.L. Victorino[4] y J. Manuel[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. * jl.garcia@igme.es
2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. da Portela 999, Amadora, Portugal.
3 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
4 Instituto Geologico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Palabras clave: República de Angola, Cartografía geológica/geofísica/geoquímica, Recursos naturales.

Resumen

El Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO) ha sido uno de los proyectos geotemáticos internacionales más importantes de las últimas décadas. El proyecto fue lanzado por Gobierno de la República de Angola e implementado por el Instituto Geológico de Angola (IGEO), bajo la supervisión del Ministerio de Recursos Minerales, Petróleos y Gas (MIREMPET). Los principales objetivos de PLANAGEO fueron: a) profundizar en el conocimiento de los recursos geológicos; b) fomentar la diversificación de la economía; y, c) atraer inversión extranjera para promover el desarrollo socio-económico del país. Tras licitación internacional, el IGEO otorgó al consorcio UTE PLANAGEO, formado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el Laboratorio Nacional de Energía y Geología de Portugal (LNEG) y la empresa Impulso Industrial Alternativo (IIA) la ejecución del proyecto en la zona sur de Angola, en un área aproximada de 480.000 km^2. El contrato se firmó en octubre de 2013, por un importe de 115.312.500 USD, y los trabajos cartográficos fueron realizados entre 2014 y 2022. El proyecto incluyó el levantamiento aerogeofísico regional (mag/rad) y la cartografía geológica a escala 1:250.000 de todo el país, junto con otras cartografías de detalle a escala 1:100.000, y síntesis a escalas 1:500.000 y 1:1.000.000. Fueron realizadas campañas de prospección geoquímica a escala 1:250.000, y otros estudios específicos a escala 1:50.000, que incluyeron Mapas de Recursos Minerales Metálicos (CRMMA) y Mapas de Rocas y Minerales Industriales (CARMINA) en zonas de especial interés, así como estudios hidrogeológicos en la cuenca del Kalahari.

Abstract

The National Geological Plan of Angola (PLANAGEO) has been one of the most significant international geothematic projects of recent decades. The project was launched by the Government of the Republic of Angola and implemented by the Geological Survey of Angola (IGEO), under the supervision of the Angolan Ministry of Mineral Resources, Petroleum and Gas (MIREMPET). The main objectives of PLANAGEO were to deepen the knowledge of geological resources, foster the diversification of the economy, and attract foreign investment to promote the socio-economic development of the country. The UTE PLANAGEO consortium, consisting of the Geological Survey of Spain (IGME), the National Laboratory of Energy and Geology of Portugal (LNEG), and the company Impulso Industrial Alternativo (IIA), was awarded to execute the project in southern Angola, covering an area of ca. 480,000 km^2. The contract, worth USD 115,312,500, was signed in October 2013 following an international call for tenders by IGEO. The work was carried out between July 2014 and the end of 2022. The project involved a regional aerogeophysical survey (mag/rad) and geological mapping at a scale of 1:250,000, along with other detailed mapping at a scale of 1:100,000 and synthesis maps at scales of 1:500,000 and 1:1,000,000. Geochemical campaigns were conducted at a scale of 1:250,000, and other specific studies were made at a scale of 1:50,000, including Metallic Minerals Maps (CRMMA) and Rock and Industrial Minerals Maps (CARMINA) in areas of special interest, as well as hydrogeological studies in the Kalahari basin.

Teledetección aplicada a la cartografía litoestructural y de regolito del SO de Angola.

Remote sensing applied to litho-structural and regolith mapping of SW Angola.

J.C. Gumiel[1*], T. López-Bahut[1], R. Martín-Banda[1], L. Quental[2], I. Granado[2], J.F. Rodrigues[2], V. Figueiredo[2], A. Oliveira[2], J. Labaredas[3], J. Correia[3], L. Duarte[3] y A. Francés[2]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. * jc.gumiel@igme.es
2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. da Portela, 2610-999, Amadora, Portugal.
3 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.

Palabras clave: Teledetección, Landsat, OLI, Litoestructural, Regolito.

Resumen

El Instituto Geológico de Angola (IGEO) desarrolló el "Plan Nacional de Geología de Angola" (PLANAGEO), con el objeto de realizar un levantamiento geológico y geofísico sistemático del país. Debido a la escasez de infraestructuras y a la dificultad de acceso de la mayor parte del territorio, uno de los subprogramas básicos se centró en el uso de la teledetección. El mapa litestructural y de regolito, junto con la recopilación de la cartografía geológica precedente y su homogeneización en una leyenda única, fueron claves para la obtención de la cartografía geológica preliminar (Gumiel *et al*. 2015). Se utilizaron imágenes *Landsat 8* adquiridas por el sensor *Operational Land Imager* (OLI). Las escenas seleccionadas durante la estación seca y con el menor porcentaje de nubes, fueron corregidas atmosféricamente y procesadas con técnicas específicas de interpretación litoestructural y de regolito. En el mapa de interpretación litoestructural se diferenciaron los tipos de lineamientos y categorizaron las litologías a partir de la fotointerpretación de las imágenes *Landsat 8* y sus productos derivados. El mapa de interpretación de regolito proporcionó información sobre la naturaleza y distribución de los depósitos de regolito y las principales unidades geomorfológicas (Feio, 1981). El resultado fue una serie de mapas litoestructurales y de regolito distribuidos en hojas 1:250.000 para los diferentes bloques estudiados en el SO de Angola.

Abstract

The Geological Institute of Angola (IGEO) developed the "National Geological Plan of Angola" (PLANAGEO), with the aim of carrying out a systematic geological and geophysical survey of the country. Due to the scarcity of infrastructures and the difficulty of access to most of the territory, a sub-programme was focused on remote sensing. The litho-structural and regolith maps, together with the compilation of previous geological mapping and its harmonization to a common legend, were crucial for obtaining the preliminary geological maps (Gumiel *et al*., 2015). Landsat 8 images acquired by the Operational Land Imager (OLI) sensor was used. The scenes selected during the dry season with the least cloud cover were atmospherically corrected and processed with specific techniques for litho-structural and regolith interpretation. In the litho-structural interpretation map, different types of lineaments were distinguished and lithologies were categorized based on the photointerpretation of Landsat 8 images and their derived products. The Regolith Interpretation Map provided information on the nature and distribution of regolith deposits and major geomorphological units (Feio,1981). The result was a thematic series of litho-structural and regolith maps distributed in 1:250,000 scale sheets for the different blocks studied in SW Angola.

Referencias

Feio, M. (1981). O Relevo do Sudoeste de Angola – Estudo de Geomorfologia. *Memórias da Junta de Investigação Científica*, IICA do Ultramar, nº 67, 326, Lisboa.

Gumiel, J.C., López-Bahut, M.T., Martín-Banda, R., Quental, L., Granado, I., Pereira, E., Labaredas, J., Duarte, L., Correia, J., Oliveira, A. y Rodrigues, J. (2015). Teledeteção. En: *Levantamento Aerogeofísico Área UTE* (J.L. García Lobón y J.P.G. de Carvalho, coords.). IGEO. Luanda.

Construction aggregates potentiality in Humpata (Lubango region, Angola).

Potencial en áridos para la obra civil en Humpata (región de Lubango, Angola).

J. V. Lisboa[1*], A. Oliveira[1], J. Fernández[2], J. F. Rodrigues[1] y J. Manuel[3]

1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, 2610-999 Amadora, Portugal. *vitor.lisboa@lneg.pt; alvaro.oliveira@lneg.pt; jose.feliciano@lneg.pt.
2 Departamento de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, 33005 Oviedo, España. j.fernandez@igme.es
3 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Cidade de Kilamba, Luanda, Angola. jose.manuel@igeo.gov.ao

Palabras clave: Áridos; Arena; Granito; Caliza dolomítica.

Resumen

En la zona de Humpata (suroeste de Angola), afloran rocas ígneas, metamórficas, vulcano-sedimentarias y carbonatadas proterozoicas. Depósitos cenozoicos de arenas, limos arcillosos y corazas ferralíticas se superponen a estas litologías (Oliveira y Lisboa, 2021). Con el objetivo de identificar materias primas minerales para áridos de obra civil para abastecer la ciudad de Lubango, se proporciona una primera caracterización de su potencial.
En cuanto a la caracterización del potencial de arenas y gravas, se estudió la mineralogía y granulometría y curvas de distribución acumulativa de muestras de arena aluvial. Las arenas analizadas son áridos finos, gruesos y de grano fino a grueso, aptos para la obra civil en mezclas bituminosas para carreteras, morteros y hormigones.
Considerando la proximidad a Lubango y la accesibilidad a las materias primas, las litologías con mayor potencial para áridos de machaqueo son los granitos y las calizas dolomíticas. Se caracterizaron muestras de áridos mediante su curva granulométrica, forma de las partículas y ensayos físicos. Los resultados obtenidos son comparables a valores de áridos calizos y graníticos y muestran valores adecuados para su uso en las aplicaciones más frecuentes.

Abstract

In the Humpata area (southwest Angola), Proterozoic igneous, metamorphic, volcano-sedimentary, and carbonate rocks outcrop. Cenozoic deposits of sands, clayey silts, and gravels, and ferrallitic armours overlie these lithologies (Oliveira and Lisboa, 2021). Aiming to identify mineral raw materials for construction aggregates to supply the nearby Lubango, a first characterization of their potential is provided.
Regarding characterisation of sand and gravel potential, the mineralogy of selected alluvial sand samples, particle size classification and the respective cumulative distribution curves were studied. The analysed sands are fine, coarse, and fine to coarse-grained aggregates, suitable for civil construction in bituminous mixtures for roads, mortars, and concrete for civil construction.
Considering the proximity to Lubango and accessibility to the raw materials, the lithologies with the greatest potential for crushed aggregates are granites and dolomite limestones. Samples of aggregates were characterised through their granulometric curve, particle shape, and physical tests. The results obtained are comparable to values of limestone and granitic aggregates and show adequate values for use in the most frequent applications.

Referencias

Oliveira, A. y Lisboa, J.V. (2021). *CARMINA, 1:50.000, Folha 355-B (Humpata) e memoria*. UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, Impulso) - IGEO, Luanda (Angola), 96 p.

Posibles aplicaciones industriales de las arenas del Kalahari de Angola.

Possible industrial applications for Angolan Kalahari sands.

J.V. Lisboa[1*], A. Oliveira[1], J.F. Rodrigues[1], J. Fernández[2] y J. Manuel[3]

1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, 2610-999 Amadora, Portugal. *vitor.lisboa@lneg.pt; alvaro.oliveira@lneg.pt; jose.feliciano@lneg.pt
2 Departamento de Recursos Geológicos para la Transición Ecológica, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, 33005 Oviedo, España. j.fernandez@igme.es
3 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Cidade de Kilamba, Luanda, Angola. jose.manuel@igeo.gov.ao

Palabras clave: arena fina, cuarzo, cerámica, vidrio.

Resumen

Las arenas de color amarillo ocre con poca o ninguna matriz procedentes de la Formación Arenas Ocres (Mio-Plioceno) y las arenas lavadas de colores claros del Cuaternario (Oliveira y Sousa, 2021), presentes en la cuenca del Kalahari, se extienden sobre una vasta área en el SO de Angola, presentando una gran homogeneidad en todos los niveles a lo largo de esa cuenca. Sin embargo, muestran características morfológicas similares a las de las arenas del desierto y, como tales, no son adecuadas para usos más comunes en la obra civil, como el agregado de cemento.

Son arenas de tamaño de grano generalmente < 1 mm, con predominio de fracción fina (125-250 µm), subangulares a subredondeadas, de tendencia bimodal, bien calibradas, con un contenido de matriz generalmente ≤ 7%. Están formados por granos de cuarzo, escasos minerales máficos u otros, dando como resultado una composición química con SiO_2 > 98.5% y un reducido contenido en elementos penalizadores.

Considerando la granulometría y el análisis químico, estas arenas tienen posibles usos en sectores de la industria cerámica y del vidrio, dependiendo, para aplicaciones menos exigentes, de métodos de beneficio sencillos, en particular para reducir el contenido de alúmina y especialmente de óxidos de hierro concentrados en los recubrimientos que a menudo afectan parcialmente a los granos. Estos pueden reducirse mediante lavados y tratamientos simples de fricción.

Abstract

The ochre-yellow sands with little or no matrix from the Ochre Sands Formation (Mio-Pliocene) and the Quaternary light-toned washed sands (Oliveira and Sousa, 2021), occurring in the Kalahari basin, extend over a vast area in SW Angola, presenting great homogeneity at all levels throughout that basin. However, they show morphological characteristics similar to desert sand and as such are not suitable for more common uses in construction industry, such as cement aggregate.

These are sands with a grain size generally < 1 mm, with a predominance of fine fraction (125-250 µm), subangular to subrounded, with a bimodal tendency, well calibrated, with a matrix content generally ≤ 7%. They are made up of quartz grains, very scarce mafic minerals or others, resulting in a chemical composition with SiO_2 > 98.5% and a reduced content of penalizing elements.

Considering the grain size and chemical analysis, these sands have possible uses in sectors of the ceramic and glass industry, depending, for less demanding applications, on simple beneficiation methods, namely to reduce the content of alumina and especially iron oxides concentrated in coatings, which often partially affect the grains and can be reduced by washing and simple friction treatments.

Referencias

Oliveira, A. y Sousa, J.C. (2021). *Carta Geológica de Angola, 1:250.000, Folha Sul D-33/U - Chibemba e Memória Explicativa (2ª edição)*. UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, IIA) – IGEO. 206 p.

Preliminary study of quartz gravel and veins occurring in the Equimina region, Benguela (Angola): potential uses in industry.

Estudio preliminar de gravas y vetas de cuarzo existentes en la región de Equimina, Benguela (Angola): usos potenciales en la industria.

J.V. Lisboa[1*], L. F. Pereira[2], A. Osório[2], J. F. Rodrigues[1], J. Fernandez[3], A. Oliveira[1] and J. Manuel[4]

1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, 2610-999 Amadora, Portugal. *vitor.lisboa@lneg.pt; jose.feliciano@lneg.pt; alvaro.oliveira@lneg.pt.
2 UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, IIA), Parque Tecnológico de Asturias 13A. 33428, Llanera (Asturias), Spain. lfrfpereira@gmail.com; osorio.c.andre@gmail.com
3 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, 33005 Oviedo, Spain. j.fernandez@igme.es
4 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Cidade de Kilamba, Luanda, Angola. jose.manuel@igeo.gov.ao

Abstract: Vast occurrences of quartz in veins and extensive gravel beds in the coastal area of Equimina, approximately 100 km south of Benguela, constitute the object of this study, aiming for its industrial use. These occurrences are related to Paleoproterozoic gneisses and migmatites on which they outcrop. The veins are quite dismantled on the surface, and show a pronounced strike scattering, but the NE-SW orientation prevails. Some veins are pegmatitic (feldspar, quartz, and mica), others, if not the majority to the East in the study area, have a strong predominance of milky quartz with low content of other minerals. Except for a superficial and removable patina of iron oxides that often coats the quartz, it is free of visible impurities. Chemical analysis confirms high purity (SiO_2 > 99.5%) and very low content of penalizing oxides. Although the composition of quartz is suitable for use in the ceramic and glass industry, due to the ways it occurs, the main potential of this abundant resource in the studied area is for the refractory and metallurgy industry. Besides the chemical composition, the size of the gravel mostly meets the dimensional requirements for silicon metal production, needing minimal beneficiation.

Key words: quartz, gravel, vein, chemical composition, metallurgy.

Resumen: *Grandes yacimientos de vetas de cuarzo y extensos lechos de grava en el litoral de Equimina, aproximadamente a 100 kilómetros al sur de Benguela, constituyen el objeto de este estudio, con vistas a su uso industrial. Estos indicios afloran entre gneises y migmatitas paleoproterozoicos. Las vetas de cuarzo están bastante desmanteladas superficialmente y muestran una pronunciada dispersión del rumbo, pero prevalece la orientación NE-SW. Algunas vetas son pegmatíticas (feldespato, cuarzo y mica), otras, si no la mayoría hacia el Este del área estudiada, tienen un fuerte predominio de cuarzo lechoso con bajo contenido de otros minerales. Excepto por una pátina superficial y removible de óxidos de hierro que a menudo recubre el cuarzo, está libre de impurezas visibles. Los análisis químicos confirman una alta pureza (SiO_2 > 99,5%) y un contenido muy bajo de óxidos penalizadores. Si bien la composición del cuarzo es adecuada para su uso en la industria cerámica y del vidrio, por la forma en que se presenta, el principal potencial de este recurso es para la industria refractaria y metalúrgica. Además de la composición química, el tamaño de la grava cumple mayormente con los requisitos dimensionales para la producción de silicio metálico, necesitando un procesamiento mínimo.*

Palabras clave: *cuarzo, grava, veta, composición química, metalurgia*.

INTRODUCTION

Quartz is the main source of silicon, which has a high importance and application in different industrial sectors. Silica (SiO_2) in the stable phase under normal pressure and temperature conditions, called α-quartz or low-temperature quartz, is the most widely distributed quartz mineral group in rocks, constituting one of the most abundant minerals in the Earth's crust, around 12.6% (Götze, 2009). α-quartz is one of the crystalline forms of silica, and crystallizes with the trigonal system, trapezohedral class (3 2). Pure quartz is colourless and transparent. In general, the crystals are mostly transparent or opaque white due to internal inclusions and fissures (milky quartz); the presence of inclusions and impurities (e.g., iron, manganese, titanium) reduces transparency and gives quartz different shades (yellow, pink, violet, grey, or black).

In the area to the east and northeast of the Equimina settlement, about 40 km from Dombe Grande, an extensive and dense network of veins that were installed in the Paleoproterozoic migmatite and gneissic bedrock originated widespread gravel and quartz blocks beds. The preliminary recognition of these quartz occurrences indicates its potential for industrial use. The objective of

this work is to carry out a preliminary assessment of the possible uses for this industrial mineral. The proximity to the important city of Benguela (about 100 km) and the port of Lobito constitutes an added value for marketing this raw material. This study is part of the mapping and characterization work on industrial rocks and minerals carried out for the Geological Institute of Angola (IGEO), within the scope of the Map of Rocks and Industrial Minerals of Angola (CARMINA) subproject, of the PLANAGEO project, completed in 2022. The CARMINA sheet 274B-Equimina (Pereira et al., 2022) encompasses the study area.

GEOLOGICAL SETTING

The geology of the studied area is marked by a strong dichotomy: the eburnean units of the Angola Shield (Congo Craton) outcrop in the eastern part of the map; to the west, outcrops the Meso-Cenozoic sedimentary succession of the Benguela peri-Atlantic basin (Fig. 1). The regional eburnean basement is composed of two complexes of highly deformed rocks (Lopes et al., 2021): i) the intra-eburnean gneissic-migmatitic complex results from the large scale migmatization of a granitoid crust with intermediate and mafic terms (tonalites, quartz-diorites and diorites), whose gneissic fabrics result from a shearing deformation event of great intensity and regional extension. Two U-Pb (SHRIMP) ages were obtained (1975 ± 8 Ma and 1995 ± 8 Ma) and are interpreted as the crystallization ages of leucogranitic leucosomes; ii) the Meva-Binga Gneissic Complex corresponds to an eburnean porphyritic granite. A U-Pb (SHRIMP) age of 1948 ± 6 Ma is interpreted as the crystallization age of the granite. The gneissic fabric is due to intense shear deformation that generates mylonitic and ultramylonitic bands.

A dense network of doleritic gabbro veins (sub-ophitic gabbros and dolerites with and without olivine, undifferentiated) belonging to the Basic Dyke Supersuite of SW Angola, intersects the Gneissic Migmatite unit. These dykes with preferential orientation NW-SE to WNW-ESE (N45˚ to N70˚, sub-vertical) present, from a petrographic point of view, medium to coarse granularity and ophitic to intersertal texture, with essential mineralogy consisting of labradorite, pigeonitic augite and very scarce olivine. They have been attributed to an age of ca. 1200 Ma (Carvalho, 1983).

To the West, the Benguela peri-Atlantic basin occurs with notable prominence. Several detrital and carbonate sequences are defined with the intercalation of an important evaporitic unit. Such sequences are organized in relation to the stages of Atlantic rifting (syn-rift sequence, transitional sequence, post-rift sequence).

Geomorphologically, the area is located on the Atlantic Flexure Surface (Feio, 1964, 1981), a flat surface with a noticeable slope, and of variable width, whose western limit may be the coastal cliff line, in which case there is no coastal platform.

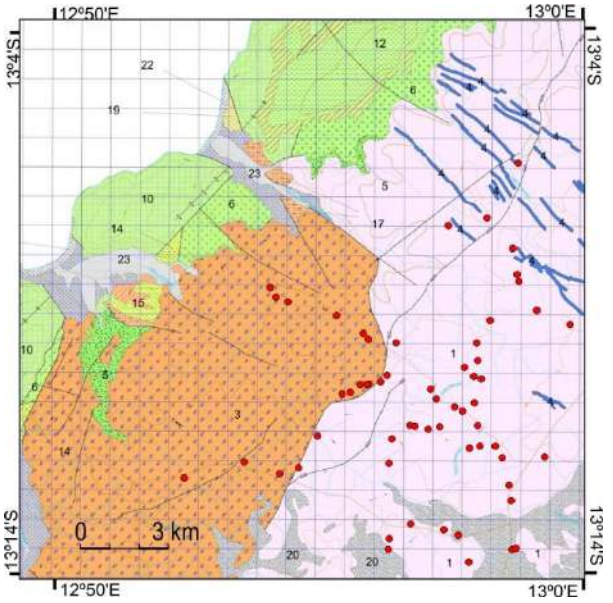


FIGURE 1. *Extract from sheet 274-B (CARMINA) geological map, according to the mapping of sheet D-33/G Equimina (1:250,000): Intra-Eburnean Gneissic-Migmatite Complex (1-Gneissic Migmatites); Meva-Binga Gneissic Complex (3- Ocellated Orthogneisses with lenses of more or less mylonitized leucogranites); Basic Dykes Supersuite of SW Angola (4- Sub-ophitic gabbros, and dolerites with and without olivine, undifferentiated); Meso-Cenozoic Benguela sedimentary basin (sin-rift sequence: 5, transitional sequence: 6, post-rift sequence: 10, 12, 14, 15, 16, 17, 19); Surface Deposits (20, 22; 23 - Quaternary detrital units). Red dots (GPS points): dispersion of quartz veins and gravel beds.*

QUARTZ INDUSTRIAL CLASSIFICATION

Quartz is processed according to its crystal size, visual transparency, and the definition of its external morphology, that is, the existence of natural crystal faces (Guzzo, 2008). For various industrial purposes, quartz extracted from pegmatite veins and masses can be classified according to visual transparency. According to that author, crushed fragments (so-called “lascas”) are classified into first to fifth grade class. Although subjective, this classification is associated with the content of fluid inclusions (milky portions) and fissures contained in the quartz *lasca*. In Portugal, in the industrial market, quartz appears, in terms of quality, with commercial designations (Fernandes, 2006): 1st grade quartz (Type I): crushed to different sizes or produced in different particle sizes, it has a white or pink colour, and low levels of alumina (<0.1%) and Fe oxides (<0.05%); 2nd grade quartz (Type II): white colour, sometimes greyish and may present some impregnations of Fe oxides (brownish colour).

Thus, depending on its compositional characteristics and primary processing (e.g., crushing, grinding, classification), quartz constitutes raw material for several industrial sectors, namely ceramics (construction, refractory, porcelain) metallurgy, glass, optics, electronics, chemistry, and pharmaceutical (in fillers and extenders), abrasives, fiberglass, and aggregates. Quartz without impurities, completely colourless or white, is essentially intended for the optical industry.

RESULTS AND DISCUSSION

In the study area located in the Atlantic Flexure Surface, primary and secondary quartz deposits (Campbell, 1946; Kuzvart, 1984) can be observed covering areas of the Paleoproterozoic bedrock. The primary deposits of economic importance (Fig. 2a) refer to the dense network of quartz veins and lenses installed in the Paleoproterozoic geological units. Two types of veins can be distinguished in the study area: (i) pure pegmatitic veins with coherent planes and dips cross-cutting the Paleoproterozoic bedrock; and (ii) erratic and essentially quartz lenses and veins, with poorly defined dips, sometimes sub-horizontal. These two types are probably connected, and the latter can be a result of the differentiation and enrichment process of the same fluids/melt. This type has more economic relevance than the pegmatitic veins due to the quartz enrichment. The field observations of these quartz-only veins, points out a structural control that somehow marks the sheared contact between the Meva-Binga unit and the Gneissic migmatites. The secondary deposits (Fig. 2b) correspond to the extensive beds of gravel and quartz blocks resulting from the dismantling and erosion of the veins. 75 registration points were made, corresponding mainly to primary quartz deposits (Pereira et al., 2022).



FIGURE 2. *a) Aspect of dismantled quartz vein (primary quartz deposits); holes can be seen in the quartz vein blocks, where micas were present; the Fe oxides patina can also be seen in fissures and in a few clasts. b) Extensive gravel superficial beds associated with the dismantling of quartz veins (secondary quartz deposits).*

As the veins are quite dismantled on the surface, their spatial continuity is generally poorly defined. The observed vein thicknesses range from 0.5 to 8 m, and their extents are also variable ranging from 4 to 40 m. The main vein azimuthal directions are: 85˚, 65˚, 45˚, and ranging 145˚ to 180˚; dips are mostly subvertical, otherwise dipping 74˚→270˚, 65˚→315˚. A pronounced strike scattering is noticeable, but the predominance of the NE-SW to E-W orientation is evident (Fig. 3). Most of the veins are pegmatitic, essentially made of quartz, with a predominance of milky quartz, but also hyaline; the presence of well-developed micas (biotite and muscovite) is scarce, but there are traces of their existence (holes with smooth faces, where the micas were present before their complete alteration. A superficial patina is frequently observed both on the veins and clasts surface, and along some small fractures filled with iron oxides. Within the quartz mass, almost no impurities can be found, when observed with the naked eye or using a handheld magnifying glass (10x).

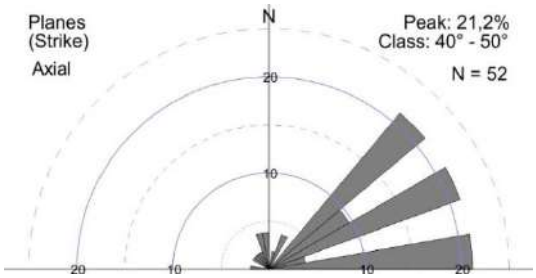


FIGURE 3. *Rose diagram representing the veins' strike in the 52 GPS points where measuring was possible.*

The chemical composition is one of the main factors for the characterization of industrial minerals, conditioning their use for various industrial purposes. The chemical analysis of quartz samples representative of the extensive gravel beds associated with vein occurrences reveals a composition that satisfies the conditions for various industrial sectors regarding oxide contents (Table I) as discussed below.

Fine ceramics: use high purity ground silica (99% SiO_2) as a refractory and stabilizing agent, preventing expansion flaws. According to Ferreira and Daitx (2000), the usual characteristics of quartz sand for the ceramic industry are: particle size between 30 and 140 mesh (0.60 to 0.105 mm); 93.5 to 99.8% SiO_2; 0.035 to 0.70% Al_2O_3 and 0.02 to 0.08% Fe_2O_3. In the study area quartz is not found as sand, but mainly in gravel-sized clasts, which also facilitates the required grinding process.

Glass: the use of quartz as a resource for glass is economically more profitable if it is in sand or as a by-product already transformed into small sizes, resulting from extraction for other purposes (e.g., aggregates), therefore, this will not be an economically viable use.

Refractories: Quartz is involved in the production of refractory ceramics, as it is used in the manufacture of silica bricks, furnace linings, as foundry sand, etc. The quartz used in the production of refractories is normally crushed to obtain sizes between 0.24 – 3.80 cm, and must have low levels of iron, alkali, and phosphorus (Fernandes, 2006). The quartz in the Equimina area, in

addition to its quality, has the advantage of being already partly crushed.

Metallurgy: the metallurgical industry uses 80-90% of Si in the forms of Si, Fe-Si, Al-Si, and Ca-Si (Fernandes, 2006). Industrial metallurgical quartz is used to manufacture silicon metal, silicon ferroalloys (ferrosilicon, silicon manganese), silica fume, and silicon carbide. In the production of silicon metal, the diameter of the *lascas* must be on average between 3 and 12 cm, and the rock must contain: at least 98.5% or 99% SiO_2, values of $Fe_2O_3 < 0.1\%$, $Al_2O_3 < 0.15\%$, $CaO < 0.2\%$, and $MgO < 0.2\%$ (Fernandes, 2006). For the ferrosilicon production, silica fine clasts cannot be present either, but slightly higher amounts of these oxides are permitted. Chemical analyses of the samples (Table I) correspond to 1st quality quartz ($SiO_2 > 99.5\%$) with very low content of penalizing oxides, which show lower values than the maximum acceptable, particularly to produce silicon metal and ferrosilicon. The analysed samples match, respectively, to a very slightly pink milky quartz and milky to translucent quartz. In terms of major oxides, the slightly higher Fe content may justify a slight hue observed in sample 1. The trace elements content is also very low, mostly below the detection limits; the elements which content is above those limits, such as Cr and Ba, Sr, may be related respectively, to iron oxides and disseminated feldspar.

Potential areas for quartz exploitation have access via trails or paths, and are distributed over a vast area, in which quartz veins and gravel beds occur. This raw material potentially meets the requirements for metallurgical use, as the dimensions of the clasts mostly fulfil the dimensional requirements, thus needing minimal beneficiation. In addition to the veins, these gravel beds constitute a large resource, naturally "enhanced", easy to exploit. The total resources are significant, as demonstrated by the survey of vein quartz occurrences carried out (Fig. 1).

CONCLUSION

In the Equimina area, close to the main interprovincial road with access to the city of Benguela (about 100 km away), important quartz resources occur over a vast area. These occurrences in the form of gravel and vein deposits relate to two geological units of the Pre-Cambrian bedrock: Ocellated Orthogneisses and Gneissic Migmatites, with a greater concentration in the latter and in the contact between units. Quartz is predominantly milky and hyaline, with no visible contamination, except sometimes a superficial and easily removable patina of iron oxides. The chemical analysis confirms high purity. Considering the type of occurrence and size of quartz clasts, their most suitable application is in the refractory industry and especially in metallurgy.

REFERENCES

Campbell, D.F. (1946): Quartz crystal deposits in the state of Goyaz, Brazil. *Economic Geology*, 41 (8): 773-799.

Carvalho, H. (1983): Notice Explicative Préliminaire sur la Géologie de L'Angola Sep. *Garcia de Orta*, Sér. Geol., Lisboa, 6 (1-2): 15-30.

Feio, M. (1964): A evolução da escadaria de aplanação do Sudoeste de Angola. *Garcia de Orta*, Rev. Junta Miss. Geogr. Invest. Ultram., 12 (2): 323-354.

Feio, M. (1981): O Relevo do Sudoeste de Angola – Estudo de Geomorfologia. *Mem. Junta Inv. Cient.* Ultramar, Lisboa, 67, 326 p.

Fernandes, J.A.P. (2006): *Potencialidades dos depósitos pegmatíticos de quartzo e de feldspato em Portugal*. PhD thesis, Aveiro University, Portugal, 365 p.

Ferreira, G.C. and Daitx, E.C. (2000): Características e especificações da areia industrial. *Geociências*, UNESP, São Paulo, 19 (2): 235-242

Götze, J. (2009): Chemistry, textures and physical properties of quartz - Geological interpretation and technical application. *Mineralogical Magazine*, 73: 645-671.

Guzzo, P.L. (2008): Quartzo. In: *Rochas e minerais industriais: usos e especificações* (A.B. Luz and F.F. Lins, eds): CETEM, Rio de Janeiro, 681-721.

Kuzvart, M. (1984): *Industrial Minerals and Rocks*. Develop. Econ. Geol., 18, Elsevier, Netherlands, 454 p.

Lopes, R., Pereira, L.F., Caessa, P. and Correia, J. (2021): *Carta Geológica de Angola à escala 1:250.000, Folha Sul D-33/G (Equimina) e memória explicativa*. UTE (IGME, LNEG, IIA) - IGEO, Luanda, 296 p.

Pereira, L.F., Osório, A. and Lisboa, J.V. (2021): *CARMINA, escala 1: 50.000, folha 274-B (Equimina) e memória explicativa*. UTE (IGME, LNEG, IIA) - IGEO, Luanda, 109 p.

(%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	P.R.
Sp1	99.71	<0.35	0.07	<0.02	<0.04	<0.20	<0.20	<0.05	<0.04	<0.04	0.06
Sp2	99.59	<0.35	0.04	<0.02	<0.04	<0.20	<0.20	<0.05	<0.04	<0.04	0.11
(ppm)	**Rb**	**Sr**	**Y**	**Zr**	**Nb**	**Ba**	**Ta**	**Sn**	**W**	**Th**	**Hf**
Sp1	<3	8	<3	<3	<3	44	<6	<9	<9	<5	<5
Sp2	<3	<3	<3	<3	<3	<15	<6	<9	<9	<5	<5
(ppm)	**U**	**Ni**	**Zn**	**Pb**	**Sc**	**V**	**Cr**	**Co**	**Ga**	**As**	**Sb**
Sp1	<6	<7	<6	<6	<7	<5	17	<5	<5	<6	<8
Sp2	<6	<7	<6	<6	<7	<5	9	<5	<5	<6	<8

TABLE I. *Results of chemical analysis of major and minor elements carried out on 2 quartz samples.*

Cartografía de la cuenca del Kalahari en el sur de Angola mediante métodos geofísicos aerotransportados y teledetección.

Mapping of the Kalahari basin in southern Angola using airborne geophysics and remote sensing methods.

R. Martín-Banda[1*], J.C. Gumiel[1], M.C. Feria[2], C. Rey-Moral[1], M.T. López-Bahut[1] y A. Victorino[3]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España. *r.martin@igme.es; jc.gumiel@igme.es; c.rey@igme.es; mt.lopez@igme.es
2 SATEC –Sistemas Avanzados de Tecnología S.A., Av. de Europa, 34, A, 28023 Madrid, España. maria.feria@satec.es
3 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Rua 311, Centralidade do Kilamba, Luanda, Angola. amevictorino@yahoo.com.br

Palabras clave: Cuenca del Kalahari, cuenca de Cuvelai-Etosha, teledetección, radiometría.

Resumen

El Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO) ha supuesto un importante reto cartográfico: reconocer y muestrear un vasto territorio de difícil acceso en tiempo limitado, con la posibilidad de interceptar minas antipersona y antitanque dispersas por el campo, entre otros riesgos. Estas vicisitudes se tornan más significativas cuanto más remota es la región, como es el caso de la cuenca de Owambo, localizada en el sector sur de Angola. La también conocida como cuenca de Cuvelai-Etosha es uno de los principales depocentros de la cuenca del Kalahari, rellena por los sedimentos cenozoicos de tres grandes sistemas fluvio-deltaicos: Cunene, Cubango y Cuvelai. La inactividad de los dos primeros sistemas, la falta de afloramientos y escasa continuidad lateral de facies han dificultado más aún la definición litoestratigráfica y la cartografía geológica en el terreno. Durante las primeras fases de proyecto se realizó el mapa de regolito basado en la metodología de CRC LEME (Papp, 2002), a partir del análisis de imágenes satelitales multiespectrales. El uso del algoritmo de Análisis de Componentes Principales Dirigido para procesar las escenas Landsat 8 que propone esta metodología, en combinación con imágenes radiométricas adquiridas a partir de los vuelos aerogeofísicos regionales realizados en PLANAGEO, resultó una técnica esencial para la realización de la cartografía de los grandes sistemas deltaicos de la cuenca de Owambo y la diferenciación de unidades geológicas dentro de estos sistemas.

Abstract

The National Geological Plan of Angola (PLANAGEO) has involved an important cartographic challenge: to recognise and sample a vast territory that is difficult to access in limited time, with the possibility of intercepting anti-personnel and anti-tank mines scattered in the field, among other risks. These vicissitudes become more significant the more remote the region, as is the case in the Owambo basin, located in the southern of Angola. The also named Cuvelai-Etosha basin is one of the main depocenters of the Kalahari Basin, filled by the Cenozoic sediments of three major fluvio-deltaic systems: Cunene, Cubango and Cuvelai. The inactivity of the first two systems, the lack of outcrops and poor lateral continuity of facies have made lithostratigraphic definition and geological mapping even more difficult. During the first phases of the project, regolith mapping was carried out using the CRC LEME methodology (Papp, 2002), based on the analysis of multispectral satellite imagery. The use of the Directed Principal Component Analysis algorithm to process the Landsat 8 scenes proposed by this methodology, in combination with radiometric images acquired from the regional aerogeophysical flights conducted in PLANAGEO, proved to be an essential technique for the mapping of the large deltaic systems of the Owambo basin and the differentiation of geological units within these systems.

Referencias

Papp, E. (Ed.) (2002). *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*. CRC LEME, CSIRO Division of Exploration and Mining, Australia, 230 p.

Exploración de recursos minerales en el Proyecto PLANAGEO (Angola).

Mineral resources exploration in the PLANAGEO Project (Angola).

I. Martín-Méndez[1*], E. Merino-Martínez[1], M.J. Batista[2], D. de Oliveira[2], C. Prazeres[2], M.C. Feria[3], J.L. García-Lobón[1] y J. Manuel[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. * i.martin@igme.es.
2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. da Portela 999, Amadora, Portugal.
3 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
4 Instituto Geologico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Palabras clave: Recursos minerales, Angola, Planageo, geoquímica, potencial mineral.

Resumen

Una importante actividad desarrollada por el consorcio UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/Impulso) en el Proyecto PLANAGEO (2014-2022) fue el desarrollo de un programa específico de exploración geológico-minera en detalle, denominado *Cartas de Recursos Minerais Metálicos de Angola* (CRMMA), con el objetivo de definir áreas potenciales de exploración en recursos naturales en la región sur de Angola. Se seleccionaron 3 *clusters* que comprendían 39 cartas a escala 1:50.000 y que tenían interés para diferentes recursos minerales: i) Cluster 1: Au-Fe - Regiones de Cuíma-Samboto, Chipindo, Jamba y M´Popo-Tchamutete; ii) Cluster 2: ETR - Regiones de Catanda, Serra da Neve y Tchivira-Bonga; iii) Cluster 3: Cr-Ni-(EGP), Cu y Nb-Ta-Be - Regiones de Giraúl, Humpata y Chibia-Hamutenha.

La metodología de trabajo se basó en el análisis geoquímico *in situ* mediante equipos portátiles de fluorescencia de rayos X (FRXp) y análisis químicos en laboratorio de muestras de rocas, sedimentos de corriente y suelos, además del estudio al microscopio de muestras de zonas mineralizadas. Finalmente, se realizaron estudios gravimétricos de detalle en diversos cuerpos máficos a ultramáficos, presumiblemente portadores de metales base, que complementaron los datos generados en la exploración aerogeofísica magnética/radiométrica regional realizada en el proyecto. La combinación de todas estas técnicas (geoquímica multielemental de FRXp y de laboratorio junto con la información geofísica y geológica) a partir del análisis factorial multidisciplinar permitió proponer zonas de potencial interés para la prospección mineral.

Abstract

An important activity developed by the UTE-PLANAGEO consortium (IGME/LNEG/Impulso) in the PLANAGEO Project (2014-2022) was the development of a specific and detailed geological-mining exploration program, termed *Cartas de Recursos Minerais Metálicos de Angola* (CRMMA), with the objective of defining potential mineral resources exploration areas in SW Angola. Three clusters, comprising 39 different 1:50,000 scale geological sheets, were defined in order to explore different mineral resources: i) Cluster 1: Au-Fe - Cuíma-Samboto, Chipindo, Jamba and M'Popo-Tchamutete regions; ii) Cluster 2: REE - Catanda, Serra da Neve and Tchivira-Bonga regions; iii) Cluster 3: Cr-Ni-(PGE), Cu and Nb-Ta-Be - Giraúl, Humpata and Chibia-Hamutenha regions.

The work methodology was based on the in situ geochemical analysis using portable X-ray fluorescence equipment (pXRF) and laboratory chemical analysis of rock, stream sediment and soil samples, in addition to petrographic study of samples from mineralised zones. Finally, detailed gravimetric studies were carried out on several mafic to ultramafic bodies, potentially host to base metals, complementing the data generated by the regional magnetic/radiometric aerogeophysical surveys carried out during the project. The combination of all these techniques (multi-elemental pXRF and laboratory geochemistry together with the geophysical and geological information) from the multidisciplinary factor analysis made it possible to propose areas of potential interest for mineral prospecting.

Exploración regional con analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X (FRXp) de la región de Giraúl (Namibe, SW Angola).

Regional Exploration using portable X-Ray Fluorescence analysers (pXRF) in the Giraúl region (Namibe, SW Angola).

I. Martín-Méndez[1*], E. Merino-Martínez[1], M.J. Batista[2], M.C. Feria[3,4], C. Prazeres[2], J.C. Gumiel[1], M. Iglesias-Martinez[4], J. Fernández[1], D. Chinchilla-Benavides[4], M. Gutiérrez-Medina[4], J. Buzzi-Marcos[4] y J. Manuel[5]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. Corr. author: i.martin@igme.es
2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. Da Portela 999, Amadora, Portugal.
3 Sistemas Avanzados de Tecnología, S.A (SATEC), Av. Europa, 34 A, 28023, Madrid, España.
4 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
5 Instituto Geologico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Palabras clave Exploración de elementos críticos, geoquímica, pegmatitas, Angola, FRXp.

Resumen

Durante el Proyecto PLANAGEO se llevó a cabo una importante campaña de exploración geoquímica en la región de Giraúl. Los trabajos geoquímicos regionales han consistido en el análisis *in situ* de muestras de rocas, suelos y sedimentos de corriente mediante analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X (FRXp), centrándose en la zona del Campo Pegmatítico de Giraúl, uno de los campos pegmatíticos más extensos del mundo, y también en zonas cercanas con posible interés en minerales críticos. Estos trabajos han permitido definir tres zonas de especial interés: a) el Campo Pegmatítico de Giraúl, donde se han registrado importantes concentraciones de Nb-Ta y donde se están realizando campañas de exploración de Li-Be; b) las formaciones máficas de los metasedimentos del Grupo Namibe y otras intrusiones básicas Paleoproterozoicas, que presentan un potencial interés para metales base (Cr-Ni-Co)-Cu; y c) las formaciones volcánicas cretácicas de la Cuenca de Namibe, que presentan potencial interés para Fe-Ti (V) (Martín-Méndez *et al.* 2022a, b).

Abstract

A major geochemical exploration campaign was carried out in the Giraúl region during the PLANAGEO project. The regional geochemical works consisted of *in situ* analysis of rock, soil and stream sediment samples using portable X-ray fluorescence (pXRF) analysers, focusing on the area of the Giraúl Pegmatitic Field, a world significant Li deposit, as well as in adjacent areas with potential for critical element mineralisation. This work has enabled us to define three areas of special interest: (a) the Giraúl Pegmatitic Field, where significant anomalous concentrations of Nb-Ta have been registered, and is currently undergoing detailed Li-Be exploration campaigns; (b) the mafic formations of the Namibe Group metasediments and other basic Palaeoproterozoic intrusions, which show potential interest for base metal (Cr-Ni-Co)-Cu exploration; and (c) the Cretaceous volcanic formations of the Namibe Basin, which hold potential interest for Fe-Ti (V) (Martín-Méndez *et al.* 2022a, b).

Referencias

Martín-Méndez, I., Merino-Martínez, E., Feria, M.C., Buzzi J. y Rey-Moral, M.C. (2022a). *Notícia Explicativa da Carta de Recursos Minerais Metálicos. Escala 1:50 000. Cluster (Cr-Ni-EGP)-Cu. Subcluster de Giraúl. Carta 353B*. IGEO. Luanda (Angola), 176 p.

Martín-Méndez, I., Merino-Martínez, E., Feria, M.C., Buzzi J. y Rey-Moral, M.C. (2022b). *Notícia Explicativa da Carta de Recursos Minerais Metálicos. Escala 1:50 000. Cluster (Cr-Ni-EGP)-Cu. Subcluster de Giraúl. Carta 354A*. IGEO. Luanda (Angola), 177 p.

El Mapa Metalogenético preliminar del Sur de Angola a escala 1:1.000.000.

The Metallogenetic Map of Southern Angola at 1:1.000.000 scale, a preliminary approach.

E. Merino-Martínez[1*], M.J. Batista[2], I. Martín-Méndez[1], D. de Oliveira[2], M.C. Feria[3], C. Fortes[2], C. Prazeres[2], J. Buzzi-Marcos[3], D. Chinchilla-Benavides[1], J.L. García-Lobón[1] y J. Manuel[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. * e.merino@igme.es
2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. da Portela 999, Amadora, Portugal.
3 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/Impulso), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
4 Instituto Geologico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Resumen: La República de Angola dispone de un amplio e interesante catálogo de mineralizaciones, según sus diversos entornos geológicos y geotectónicos, que cubren edades desde el arcaico superior hasta épocas más recientes. Esto hace de Angola una región de gran interés por su potencial en yacimientos minerales. Prueba de ello es el fruto de la exploración e importante actividad minera desarrollada a lo largo de las últimas décadas, que ha permitido el descubrimiento de importantes yacimientos de elementos de interés económico (p.ej., Fe, Au, Li, ETR, diamantes, etc.), algunos de los cuales se encuentran actualmente activos, abriendo nuevas expectativas mineras en la región. El presente Mapa Metalogenético del Sur de Angola a escala 1:1.000.000 fue elaborado como parte del programa de Cartografía Geológica del Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO, 2014-2022). Este mapa reagrupa y destaca la distribución de las concentraciones minerales, definiendo por primera vez las provincias metalogenéticas del sur de Angola, que son función directa de la relación entre la mineralización y las características geológicas de la región, y servirá de base para futuras investigaciones de exploración minera.

Palabras clave: Metalogenia, Recursos minerales, Provincias metalogenéticas, Angola, PLANAGEO.

Abstract: *The Republic of Angola has a very diverse and interesting catalogue of mineralisations, determined by their geological and/or geotectonic environments, spanning from the upper Archaean to more recent times. This makes Angola significant for potential mineral deposits. The exploration and mining activities over recent decades have led to the discovery of economically valuable deposits of various elements, such as Fe, Au, Li, REE, and diamonds, some of which are currently active. As a result, new mining opportunities have been created in the region. The Metallogenetic Map of Southern Angola at 1:1.000.000 scale was part of the Geological Mapping programme of the National Geology Plan of Angola (PLANAGEO, 2014-2022). This map highlights the distribution of mineral concentrations and defines for the first time the metallogenic provinces of southern Angola, that are directly linked to the geological features of the region. This information will serve as a basis for future mineral exploration research.*

Key words: *Metallogeny, Mineral resources, Metallogenetic provinces, Angola, PLANAGEO.*

INTRODUCCIÓN

Las numerosas mineralizaciones que ocurren en la República de Angola le confieren un indudable interés en cuanto a su potencial metalogenético. Las diferentes ocurrencias definen a menudo una distribución espacial, formando un conjunto de indicios o asociaciones minerales relacionadas con áreas y ambientes geológicos específicos. Sin embargo, la creciente demanda de recursos minerales en el mercado mundial hace necesario conocer el potencial minero regional del país, tanto para la planificación territorial como para la futura exploración e investigación de sus recursos.

Es por ello que el Gobierno de la República de Angola, a través del Ministerio de Recursos Naturales, Petróleo y Gas (MIREMPET) y el Instituto Geológico de Angola (IGEO), ejecutó un ambicioso programa de investigación geológico-minera, denominado el Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO, 2014-2022), con el objetivo de mejorar el conocimiento geológico de su territorio y contribuir al desarrollo económico del país, con una inversión próxima a los 400 M$. Entre una diversidad de trabajos geológicos, geofísicos y geoquímicos, uno de los principales resultados del proyecto fue el Mapa Metalogenético del Sur de Angola a escala 1:1.000.000, elaborado por el consorcio UTE-PLANAGEO (IGME-LNEG-Impulso).

Este mapa sintetiza, de una manera sistemática, los recursos minerales del país en relación con su contexto geológico, y se proponen por primera vez las provincias metalogenéticas de la región sur de Angola. El mapa metalogenético tiene, por tanto, el objetivo fundamental de proporcionar el conocimiento básico para la planificación de futuras investigaciones mineras y promover el desarrollo socioeconómico del país a partir del aprovechamiento sostenible de sus recursos naturales.

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DEL MAPA METALOGENÉTICO

El mapa metalogenético responde a la necesidad de crear una base informatizada de información geológica y metalogenética, organizado según los recursos minerales y su potencial interés. Para ello, se armonizó la información siguiendo los siguientes criterios:

Base Geológica

La base geológica de soporte a la información metalogenética incluye el mapa geológico del sur de Angola a escala 1:1.000.000 (Merino-Martínez *et al*., 2022b), elaborado a partir de la cartografía realizada en el marco del proyecto PLANAGEO. Se utilizaron técnicas de generalización cartográfica, entendidas como la selección y representación simplificada de elementos geológicos y geométricos con un nivel de detalle adecuado a la escala y con una pérdida mínima de información geológica. La síntesis geológica se centra en las unidades aflorantes pertenecientes a diferentes dominios geológicos, abarcando un rango temporal que abarca desde el Arcaico hasta la actualidad.

Base de datos de recursos minerales

La principal fuente de información se obtuvo de las memorias geológicas a escala 1:100.000 del IGEO, de los indicios y yacimientos mostrados en la Carta de Recursos Minerales de Angola de Araújo *et al*. (1998, 2001), así como de otros trabajos bibliográficos históricos y más recientes. Esta información fue complementada con las observaciones realizadas durante el trabajo de campo en el marco de PLANAGEO, así como con la información obtenida de los estudios específicos de Rocas y Minerales Industriales (CARMINA) y de Recursos Minerales Metálicos (CRMMA), lo que permitió verificar los indicios y añadir nuevos lugares de potencial interés. El archivo final de datos recoge toda la información existente para cada indicio mineral, agrupada en función del tipo de elemento y/o grupo de recurso mineral (Fig. 1), así como otros parámetros y atributos internos (p.ej., morfología, estructura, mineralogía) y externos (p.ej., litología, estratigrafía, alteración, relación con el entorno geológico), deducidos del reconocimiento sobre el terreno y recogidos en la bibliografía.

Simbología

Los diferentes recursos minerales se agruparon según su tipo e interés (Fig. 1), definiéndose las siguientes agrupaciones: metales ferrosos, metales no ferrosos, metales nobles, metales raros y elementos de tierras raras, minerales radiactivos y minerales energéticos. Los minerales no metálicos, relacionados estrechamente con la presencia de minerales metálicos o de interés económico, fueron divididos en tres grupos principales: sales, piedras preciosas y semipreciosas, y otros recursos minerales no metálicos. Por último, pero de gran importancia para el país, fueron representados de manera independiente los recursos hidrominerales, para ubicar las fuentes termales (aguas minerales) de la región.

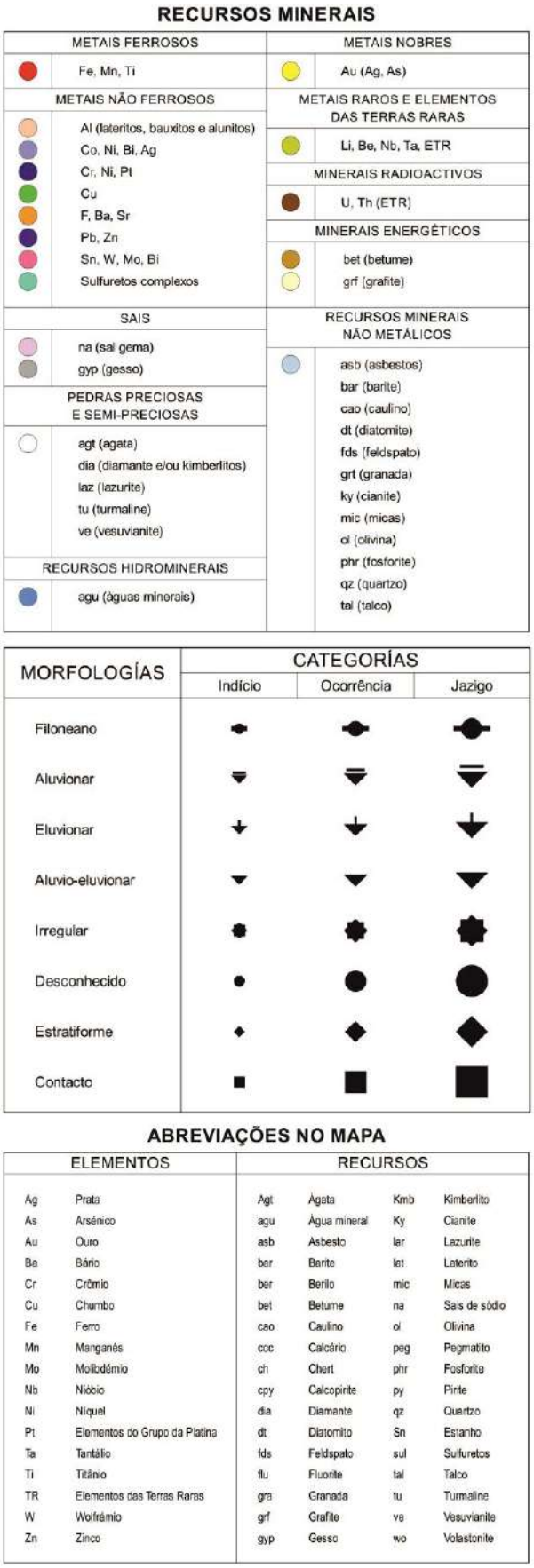


FIGURA 1. *Simbología de los recursos minerales y agrupaciones representadas en el Mapa Metalogenético del Sur de Angola (Merino-Martínez et al., 2022a), en función del tipo de recurso, categoría, morfología y codificación de elementos y/o recursos mostrados.*

Los principales recursos de interés se representaron mediante un color específico, facilitando la distinción del elemento y/o la asociación de los elementos más representativos dentro del conjunto. Los símbolos químicos de los principales elementos y las abreviaturas o descripciones de los recursos se encuentran junto a la leyenda de colores para ayudar a su distinción. Además, la carta metalogenética incluye el elemento o mineral que actúa como principal recurso de interés (mena), así como su asociación con otros minerales o cuerpos rocosos específicos, junto con el símbolo correspondiente. Esta información es útil para discernir determinadas características de los recursos representados en el mapa. La clasificación de la importancia relativa de los recursos minerales se realizó mediante un método de representación visual para distinguir fácilmente su potencial económico (Fig. 1). Esta caracterización se combinó con la morfología de cada uno de los indicios, añadiendo valiosa información sobre la geometría del yacimiento. La categoría de cada recurso fue proyectada por un símbolo de tamaño variable siendo representados, de menor a mayor, indicios, ocurrencias y yacimientos.

PROVINCIAS METALOGENÉTICAS DEL SUR DE ANGOLA

Las provincias metalogenéticas representadas en el mapa corresponden con regiones en las que los recursos minerales de potencial interés están claramente definidos y asociados a un contexto geológico, pudiendo o no estar relacionados genéticamente. Estas provincias se definen sobre la base de la geoquímica, la paragénesis mineral, la morfología y la génesis, y son representadas en el mapa en forma de polígonos irregulares, cuyo color define la principal zona de interés (Figs. 2 y 3). La mayoría de las provincias metalogenéticas no son continuas y están separadas en distritos distintos. En este sentido, el término "distrito" se utiliza estrictamente para las unidades geográficas, independientemente de su relación genética o de edad. Estas zonas, representadas en el mapa con una numeración específica, indican la presencia coincidente de un elemento o elementos de interés, que se registran en regiones separadas geográficamente, independientemente de su relación genética o de edad.

La región sur de Angola está constituida por 6 grandes provincias metalogénicas (Merino-Martínez *et al*., 2022a), cuyas eras metalogénicas abarcan desde el Neoarcaico hasta el Cretácico, y una vasta área de interés en la exploración diamantífera, generada desde el Cretácico hasta la era actual/subactual. Las provincias metalogenéticas definidas en el Mapa Metalogenético del Sur de Angola a escala 1:1.000.000 (Fig. 3), consisten en:

Las provincias metalogenéticas de Au y Fe, asociadas a mineralizaciones que tuvieron lugar desde el Neoarcaico al Paleoproterozoico, fundamentalmente relacionadas con los yacimientos de tipo BIF (*Banded Iron Formation*) de la región de Cassinga (Grupo Jamba), a la deposición y/o remoción hidrotermal y mineralización en rocas metasedimentarias neoarcaicas a sidéricas (Grupo Chipindo), y a escasas mineralizaciones descritas en rocas ígneas eburneanas hidrotermalizadas.

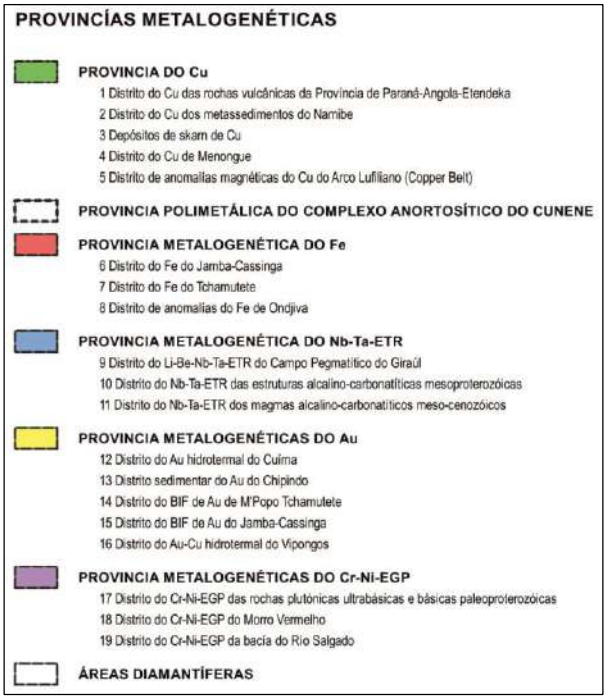


FIGURA 2. *Provincias Metalogenéticas definidas en la región sur de Angola a raíz de los trabajos realizados en el proyecto PLANAGEO.*

La provincia metalogenética de Cr-Ni-EGP se relaciona con la mineralización primaria asociada a la cristalización de cuerpos máficos a ultramáficos paleo- a mesoproterozoicos, y a las intrusiones ultramáficas deformadas encontradas en el Cinturón Pan-Africano del Kaoko, así como a sus productos de denudación.

La provincia polimetálica del Complejo Anortosítico del Cunene (CAC), se asocia a los procesos de cristalización, inmiscibilidad e hidrotermalismo acontecidos durante la instalación de los diversos pulsos magmáticos que componen el CAC. Se encuentran numerosas mineralizaciones de Fe y Ti (±V), producto de segregación magmática, así como depósitos asociados a la erosión del CAC, compuestos por arenas pesadas ricas en ilmenita, titano-magnetita y magnetita, considerados económicos y de gran tonelaje (Lorena Santos, 1969). Cabe destacar también la importancia de las rocas anortosíticas, comúnmente explotadas para fines ornamentales, así como otras mineralizaciones filonianas de amazonita y sodalita asociadas al complejo.

La provincia metalogenética de Cu incluye diferentes episodios de mineralización hidrotermal ocurridos en las rocas ígneas eburneanas de la región de Menongue; procesos hidrotermales y metasomáticos que afectan a rocas metasedimentarias paleoproterozoicas del Grupo Namibe; mineralizaciones asociadas al *Copper Belt* del Arco Lufiliano; y distintos pulsos hidrotermales que afectaron a las rocas cretácicas en la región litoral.

La provincia metalogenética de Nb-Ta-ETR se encuentra ampliamente representada por las estructuras alcalino-carbonatíticas cretácicas, desarrolladas a lo largo del llamado Cinturón Volcánico de Angola (Machado, 1959), y a los escasos cuerpos alcalinos y carbonatíticos instalados durante el Mesoproterozoico en

el extremo sur de la región. Esta provincia también se asocia a pegmatitas graníticas paleoproterozoicas ricas en Li-Be-Nb-Ta de la región de Namibe.

Por último, las áreas diamantíferas identificadas se refieren a posibles yacimientos primarios de kimberlitas cretácicas, interpretados mediante métodos geofísicos (Reis, 1972), así como a yacimientos sedimentarios y de tipo *placer* relacionados con la erosión de los macizos kimberlíticos encontrados en el noreste del país, que se depositan en las terrazas fluviales y sedimentos aluviales de las cuencas intracontinentales del sur de Angola.

CONCLUSIONES

El presente trabajo registra el potencial metalogenético de la región meridional de la República de Angola, relacionando los distintos yacimientos y/o indicios en un contexto geológico regional. Aunque este trabajo se centra en aquellos recursos minerales que implican un proceso natural de concentración y/o cuyos yacimientos representan una anomalía en la corteza, definiendo de esta forma las provincias metalogenéticas, cabe señalar que este estudio también incluye el potencial interés en la explotación de rocas y minerales industriales y rocas ornamentales, lo que favorecerá claramente las relaciones comerciales intra- e intercomunitarias y tendrá un beneficio directo en el desarrollo económico del país.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del Plan Geológico Nacional de Angola (PLANAGEO). Nos gustaría expresar nuestra gratitud por la inestimable ayuda prestada por el personal local durante los trabajos, y la valiosa contribución de Impulso Industrial Alternativo a este proyecto.

REFERENCIAS

Araújo A.J, Perevalov, O.V., Guimarães, F.R., Kondratiev, A.I, Tselikovski, A.F., Khodriev, V.L, Polskoi, F.R., Agueev, Y.I, Voinovski, A.S., Sunda, P. y Joaquim, A. (1998): *Carta de Recursos Minerais de Angola.* IGEO, MGM, Angola.

Araújo, A.G., Perevalov, O.V., Guimarães, F., Kondratiev, A.I., Tselikovski, A.F., Khódriev, V.L., Polskoi, F.R., Agueev, Y.I., Voinovski, A.S., Sunda, P. y Joaquim, A. (2001): *Catálogo de Recursos Minerais de Angola.* IGEO, Angola.

Lorena Santos, A.P. (1969): *Ocorrências de ilmenites no sul de Angola*. Boletim nº 20, Serviços de Geologia e Minas, Província de Angola.

Machado, F.S. (1959): The volcanic belt of Angola and its carbonatites. En: *Leopoldville Meetings, C.C.T.A. / A.S.G.A*, 44, 307-317.

Merino-Martínez, E., Buzzi, J., Chinchilla, D., Potti, J., Batista, M.J. y Rodrigues, J.F. (2022a): *Mapa e Notícia Explicativa do Mapa Metalogenético de Angola, escala 1:1.000.000. Zona UTE (Região Sul de Angola).* UTE PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), IGEO, MIREMPET, Luanda (Angola), 136 p.

Merino-Martínez, E., Rodrigues, J.F., Ferreira, E., Chamizo, M., Potti, J., Labaredas, J., Francés, A., Morais, A., Oliveira, A. y Pereira, E. (2022b): *Notícia Explicativa do Mapa Geológico de Angola, escala 1:1.000.000. Zona UTE (Região Sul de Angola).* UTE PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), IGEO, MIREMPET, Luanda (Angola), 111 p.

Reis, B. (1972): Preliminary notes on the distribution and tectonic controls of kimberlites in Angola. En: *24th International Geological Congress*. Montreal (Canadá), 276–281.

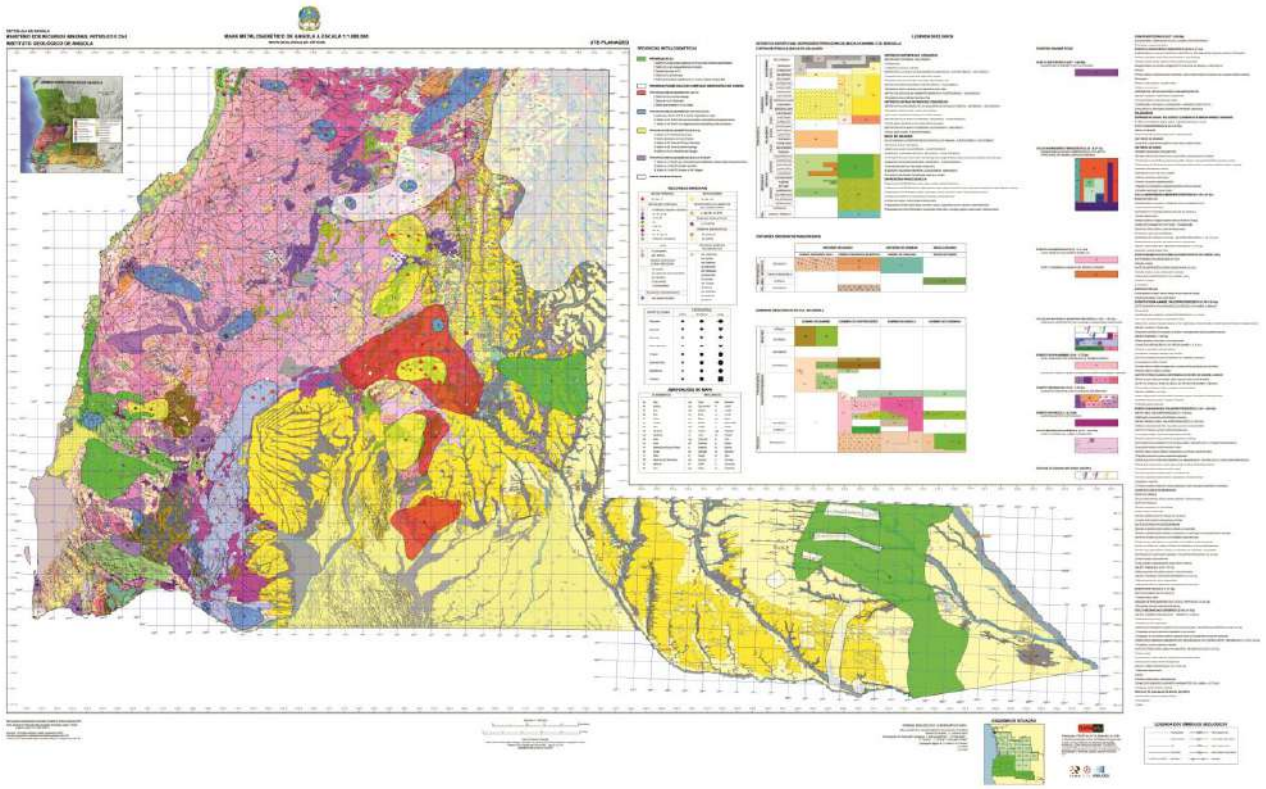


FIGURA 3. *Mapa Metalogenético del Sur de Angola (Merino-Martínez et al., 2022a).*

Edades U-Pb en el sur del Escudo de Angola e implicaciones en la evolución del Complejo de Cunene durante el Mesoproterozoico.

U-Pb ages in the southern Angolan Shield and implications for the evolution of the Kunene Complex during the Mesoproterozoic.

E. Merino-Martínez[1*], E. Ferreira[1, 2], P. Valverde-Vaquero[1], J.F. Rodrigues[3], J. Escuder-Viruete[1], J.L. García-Lobón[1], A. Beranoaguirre[2], M.C. Feria[2], C. Rey-Moral[1], P.B. Silva[2], P. González-Cuadra[2], J.C. Sousa[2], J. Potti[2], J. Máximo[2], M. Gutiérrez-Medina[2], J.C. Gumiel[1], G. Galán[2†], T. Mochales[1], J. Manuel[4], D. Cordeiro[4], C. Tassinari[5], P. Montero[6], K. Sato[5], J.M. Fuenlabrada[7] y C. Galindo[7†]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. * e.merino@igme.es
2 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
3 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. da Portela 999, Amadora, Portugal.
4 Instituto Geologico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.
5 High Resolution Geochronological Laboratory, Geosciences Institute, Univ. of São Paulo, Rua do Lago, 562, São Paulo, Brasil.
6 SHRIMP Ion-Microprobe Laboratory - IBERSIMS. Centro de Instrum. Científica. Univ. Granada, 18002, Granada, España.
7 Unidad de Geocronología. CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría. UCM, c/ José Antonio Novais 2, 28040, Madrid, España.

Palabras clave: Geocronología U-Pb, Complejo de Cunene, Mesoproterozoico, Escudo de Angola.

Resumen

La contrastada naturaleza y estructura de la corteza arcaica a paleoproterozoica (2621-1744 Ma) del sur del Escudo de Angola desempeñó un papel importante en el emplazamiento episódico del Complejo Anortosítico de Cunene (CAC) durante el Mesoproterozoico (1500-1344 Ma). Los datos geocronológicos apuntan a un rejuvenecimiento hacia la parte más occidental de este gran complejo gabro-anortosítico y granítico (ca. 45.000 km^2; Rey-Moral *et al*., 2022), que se instaló progresivamente asociado a grandes sistemas de cizallamiento en un escenario compresional regional. Los diversos límites litosféricos actuaron como zonas de compensación de esfuerzos, probablemente activos desde 1550 hasta 1320 Ma, que condicionaron el ascenso y estructuración de los fundidos del CAC. Las etapas finales del Mesoproterozoico se caracterizaron por una importante relajación y extensión cortical, que promovió la deposición de secuencias sedimentarias sobre el KC y el ascenso de fundidos mantélicos profundos.

Abstract

The contrasting nature and structure of the Archaean to Palaeoproterozoic (2621-1744 Ma) crust of the southern Angolan Shield played an important role during the episodic emplacement of the long-lived Mesoproterozoic (1500-1344 Ma) Kunene Complex (KC). The U-Pb geochronological data indicate that this large gabbro-anorthosite and granite complex (ca. 45,000 km^2; Rey-Moral *et al*., 2022), underwent a westward rejuvenation. The complex was progressively emplaced in association with large strip-slip shear systems in a regional compressional setting. The lithospheric boundaries acted as stress compensation zones, probably active from 1550 to 1320 Ma, which conditioned the uplift and structuring of the KC melts. During the late Mesoproterozoic, there was a significant period of crustal relaxation and extension, which led to the deposition of sedimentary sequences over the KC and the uplift of deep mantle melts.

Referencias

Rey-Moral, C., Mochales, T., Merino-Martínez, E., García-Lobón, J.L., López-Bahut, M.T., Martín-Banda, R., Feria, M.C., Ballesteros, D., Machadinho, A. y Alves, D. (2022). Recording the largest gabbro-anorthositic complex worldwide: The Kunene Complex (KC), SW Angola. *Precambrian Research* 379, 106790, doi: 10.1016/j.precamres.2022.106790

Cartografía Geológica del Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO).

Geological Mapping of the National Geological Plan of Angola (PLANAGEO).

E. Merino-Martínez[1*], J.F. Rodrigues[2], J. Escuder-Viruete[1], R. Martín-Banda[1], A. Frances[2], M.C. Feria[3], M.T. López-Bahut[1], E. Ferreira[1,3], J.L. García-Lobón[1], J.C. Gumiel[1], I. Cuervo[3], A.M.L. Victorino[4] y J. Manuel[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. * e.merino@igme.es
2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. da Portela 999, Amadora, Portugal.
3 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/Impulso), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
4 Instituto Geologico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Resumen: La cartografía geológica fue la actividad central en la que se basó el Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO). Los trabajos de cartografía geológica realizados por el consorcio UTE PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA) en el sur de Angola (476.512 km^2), desarrollados entre 2016 y 2020, comprendieron 44 cartas a escala 1:250.000, 15 cartas a escala 100.000, 8 mapas de síntesis a escala 1:500.000 y 4 mapas geotemáticos a escala 1:1.000.000. A partir de estos trabajos, fueron distinguidos diversos dominios geológicos en el sur del Escudo de Angola, delimitados por macroestructuras bien definidas en los modelos geofísicos. Los mapas y sus memorias asociadas reúnen todo el conocimiento generado durante PLANAGEO, siendo un manual de referencia geológica y un modelo para futuros estudios geológico-mineros. Los mapas geológicos realizados constituyen la base de una infraestructura regional de conocimiento geológico de la región sur de Angola, y proporcionan información básica para el aprovechamiento óptimo del territorio y desarrollar el potencial de los recursos naturales del país.

Palabras clave: Cartografía Geológica, PLANAGEO, Escudo de Angola, Cratón del Congo, Angola.

Abstract: *Geological mapping was the core activity on which the National Geological Plan of Angola (PLANAGEO) was based. The UTE PLANAGEO consortium (IGME/LNEG/IIA) conducted geological mapping works in southern Angola (476,512 km^2) between 2016 and 2020. The works included 44 maps at a scale of 1:250,000, 15 maps at a scale of 100,000, 8 synthesis maps at a scale of 1:500,000, and 4 geothematic maps at a scale of 1:1,000,000. Several geological domains were identified in the southern Angolan Shield through this work, delimited by well-defined geophysical macrostructures. The maps and associated data consolidate all PLANAGEO knowledge, making it a geological reference manual and a model for future geological and mining studies. The geological maps produced constitute the basis of a regional infrastructure of geological knowledge for the southern region of Angola. They provide basic information for the optimal use of the territory and the development of the country's natural resources.*

Keywords: *Geological mapping, PLANAGEO, Angolan Shield, Congo Craton, Angola.*

INTRODUCCIÓN

El Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO) fue un proyecto de investigación geológica promovido por el Gobierno de la República de Angola en el año 2009, y desarrollado por el Instituto Geológico de Angola (IGEO) bajo la supervisión del Ministerio de Recursos Naturales, Petróleo y Gas (MIREMPET). Su principal objetivo fue el de crear unas bases sólidas de conocimientos geológicos para la investigación de sus recursos naturales y promover el desarrollo socioeconómico del país. El consorcio UTE PLANAGEO, formado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el Laboratorio Nacional de Energía y Geología (LNEG) de Portugal y la empresa Impulso Industrial Alternativo (IIA), fue el responsable de la ejecución de los trabajos de cartografía geológica, geofísica y geoquímica de la región sur del país (Bloque UTE), que cubría una superficie aproximada de 480.000 km^2 (Fig. 1).

Entre julio de 2014 y finales de 2022, los integrantes de UTE PLANAGEO realizaron una diversidad de estudios multidisciplinares que resultaron en una colección integral de mapas, informes y documentos científico-técnicos. Uno de los principales objetivos de PLANAGEO fue el de crear una base geológica actualizada y de detalle, que permitiese una interpretación adecuada de las anomalías geofísicas y geoquímicas detectadas, así como de los procesos geológicos responsables de las mineralizaciones reconocidas. Estos trabajos dieron lugar a diversas series de la denominada Carta Geológica de Angola.

ANTECEDENTES

Los estudios geológicos realizados durante los siglos XIX y XX en la República de Angola dieron lugar a avances muy importantes en la geología de la región, con la producción de varios mapas geológicos a escalas 1:100.000 y 1:250.000, elaborados por los Servicios

Geológicos coloniales (*Direção Geral de Geologia e Minas*, DGGM) y algunos mapas geológicos de síntesis a menor escala, como el Mapa Geológico del Planalto Meridional de Angola a escala 1:500.000 (Pascal, 2006) o las diversas cartas del Mapa Geológico de Angola a escala 1:1.000.000 (Carvalho, 1982; Araújo et al., 1988). Una revisión histórica exhaustiva de los trabajos geológicos desarrollados en el SW de Angola hasta 1975 puede encontrarse en Figueiredo Nunes (1991). Tras la independencia de Angola (ca. 1975), los trabajos de reconocimiento geológico en la región sur de Angola continuaron con el trabajo de geólogos portugueses, soviéticos, brasileños, franceses y sudafricanos, a pesar de que el trabajo de campo fue casi imposible durante la guerra civil. Desde esta época hasta la actualidad, se han llevado a cabo numerosos estudios de caracterización petrológica, geocronológica y geoquímica que, junto con los trabajos realizados en PLANAGEO, han permitido conocer en mayor profundidad la geología del Escudo de Angola, en el contexto geológico del Cratón del Congo (p.ej., Carvalho et al., 2000, Jelsma et al., 2018).

CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DEL SUR DE ANGOLA

La actividad central del proyecto PLANAGEO, tras la adquisición e interpretación de los datos aerogeofísicos (magnéticos y radiométricos a escala regional) obtenidos entre 2014 y 2015, fue el Levantamiento Geológico Regional y elaboración de la Carta Geológica de Angola a escala 1:250.000, aunque fueron elaborados otros productos a distintas escalas a raíz de estos trabajos. La distribución de las cartas geológicas a escala 1.250.000 fue proporcionada por el IGEO siguiendo la división del Instituto Geográfico y Catastral de Angola (Fig. 1).

Los trabajos de cartografía geológica realizados por la UTE PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA), con hasta una veintena de equipos IGME-LNEG desplegados de manera simultánea en distintas zonas de Angola, acompañados de personal local contratado, fueron desarrollados en el periodo entre 2016 y 2020. Comprendieron 44 cartas a escala 1:250.000 (área aproximada de 12.000 km^2 por carta), que cubrieron toda la superficie de la Zona UTE, y 15 cartas a escala 1:100.000 (ca. 3.500 km^2 por carta) en regiones específicas de interés geológico-minero (Fig. 1). Los levantamientos geológicos realizados en las diversas hojas de la Carta Geológica de Angola a escalas 1:100.000 y 1:250.000 sirvieron de base para los mapas geológicos e hidrogeológicos a escala 1:500.000 de los 8 bloques de la Zona UTE (Fig. 1), así como para los 4 mapas geotemáticos (geológico, tectónico, hidrogeológico y metalogenético) del sur de Angola a escala 1:1.000.000, los cuales fueron finalizados entre los años 2021 y 2022 y sintetizan el conocimiento adquirido durante PLANAGEO en la región meridional del país.

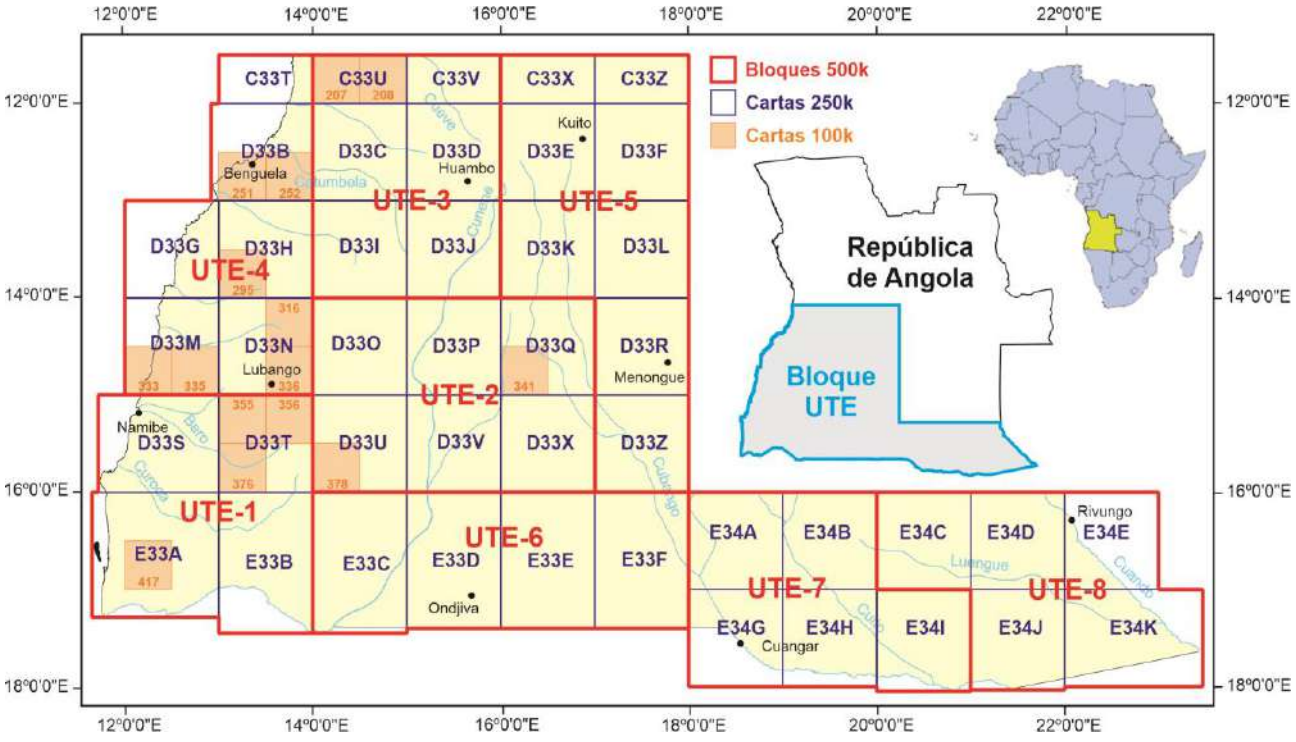


FIGURA 1. *Cartograma a escala 1:1.000.000 de la superficie trabajada por el consorcio UTE-PLANAGEO en el sur de Angola durante PLANAGEO, mostrando la distribución de las cartas geológicas a escalas 1:250.000 (azul) y 1:100.000. (naranja), dentro de los bloques a escala 1:500.000 (rojo).*

La metodología utilizada para elaborar los mapas geológicos se basó en las siguientes etapas (Fig. 2):

i) Recopilación y análisis de la información disponible, a partir de la información bibliográfica y los mapas geológicos y geotemáticos existentes, que permitió establecer el grado de conocimiento geocientífico previo mediante un esquema de leyenda única presentado al IGEO en agosto de 2014 y una primera edición de mapas geológicos preliminares (CGP1) a escala 1:250.000.

ii) Interpretación de imágenes satelitales multiespectrales (Landsat 8 y Sentinel 2) y de los datos aerogeofísicos (mag/rad) obtenidos en las etapas iniciales del proyecto, e integración con la información geológica disponible. Esta fase dio lugar a generación de la segunda edición de los Mapas Geológicos preliminares (CGP2) y facilitó el planteamiento logístico de los trabajos.

iii) Cartografía geológica de campo, con recogida de datos litoestratigráficos, estructurales, petrológicos y paleontológicos en más de 22.400 Estaciones de Recogida de Datos (ERDs), unificadas en formato digital en la *Cuaderneta Digital de Campo* (CDC). Fueron recogidas durante estos trabajos más de 10.000 muestras geológicas georreferenciadas, que fueron depositadas en los laboratorios de IGEO en Congenge (Huíla, Angola). La armonización de toda esta información dio lugar a los Mapas Geológicos Intermedios.

iv) Análisis petrográficos, litogeoquímicos, geocronológicos (U-Pb, Ar-Ar), isotópicos (Sr-Nd) y biocronoestratigráficos de muestras seleccionadas e interpretación de la información complementaria disponible para producir los mapas que componen la Carta Geológica de Angola a diversas escalas y las memorias geológicas asociadas, siguiendo las "Especificaciones técnicas para la cartografía geológica a escala 1:250.000", aportadas por el IGEO.

Durante el proyecto PLANAGEO se obtuvieron alrededor de 225 dataciones U-Pb en circón utilizando métodos geocronológicos actuales de alta sensibilidad (SHRIMP, TIMS o LA-ICP-MS), que se complementaron con dataciones isotópicas Ar-Ar (n=30) en roca total o en separados minerales (feldespato potásico, plagioclasa, biotita, flogopita o anfíbol), y con geoquímica isotópica (Sr-Nd) en roca total (n=111) en aquellas unidades ígneas o metamórficas del basamento cristalino y unidades volcánicas más recientes. El fin de estos trabajos no sólo fue obtener una mayor precisión geocronológica de los diferentes eventos tectono-termales registrados en el basamento, sino también conocer la evolución geológica seguida por las diferentes unidades litoestratigráficas y litodémicas que componen el registro geológico del territorio angoleño y, en consecuencia, un mayor conocimiento de su historia geológica. Para la definición de los depósitos meso- y cenozoicos, se utilizaron criterios litoestratigráficos junto con los datos cronoestratigráficos disponibles. La designación de los grandes ciclos tectono-metamórficos y magmáticos se basó en la compilación de los datos estructurales y geocronológicos publicados y de los obtenidos durante el Proyecto PLANAGEO, correspondientes a intervalos restringidos del tiempo geológico, que cubren una historia geológica compleja desde el Arcaico hasta la actualidad.

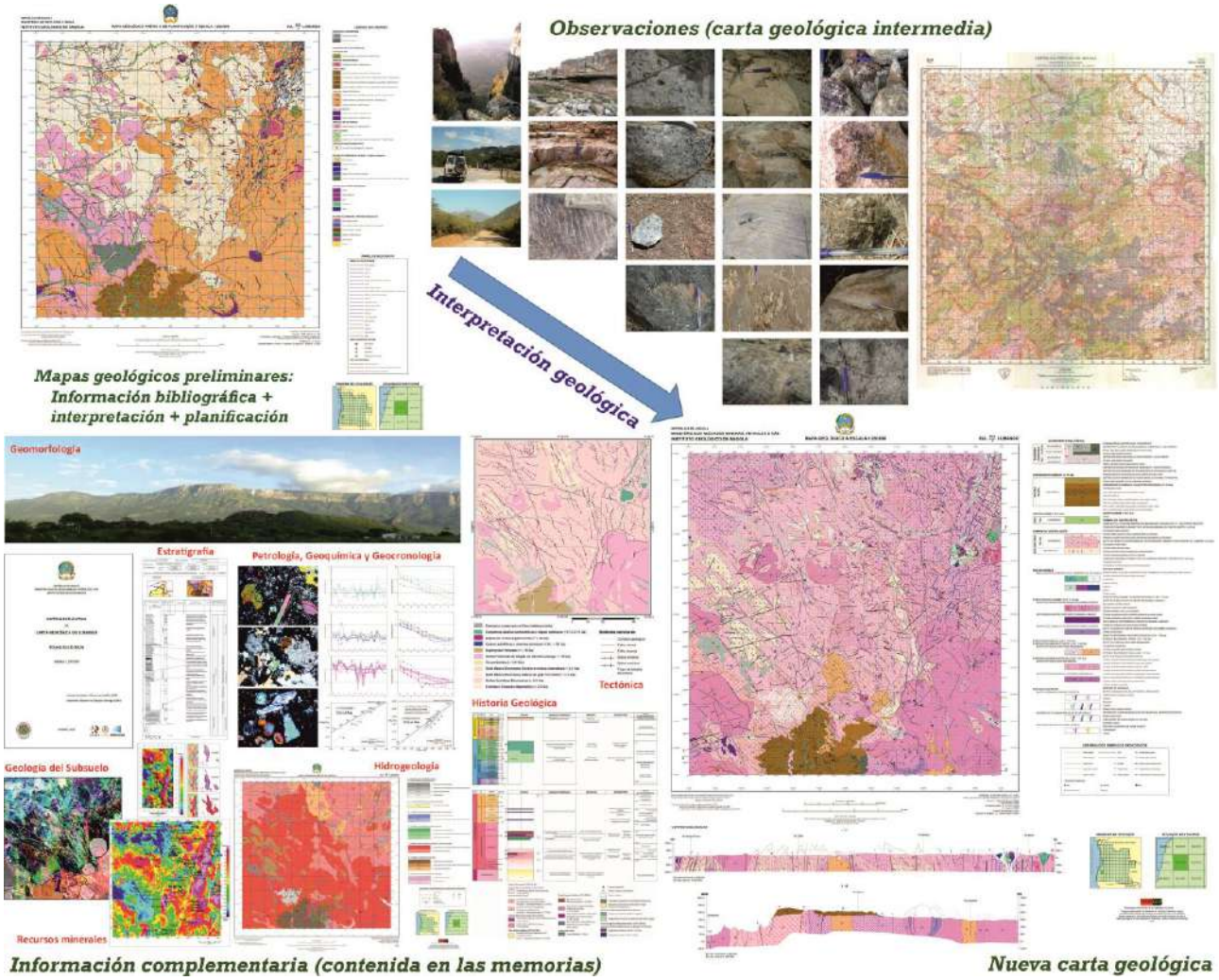


FIGURA 2. *Metodología seguida en los trabajos de cartografía geológica del sur de Angola. Se muestra también la información contenida en las memorias geológicas y un ejemplo de mapa geológico a escala 1:250.000 (Carta SUL D33/N de Lubango; Merino-Martínez y Goicoechea, 2021).*

Cada Mapa Geológico, independientemente de la escala, es acompañado de una Memoria Geológica ("Notícia Explicativa") en la que se detallan todos los elementos representados en el mapa, los datos y los resultados obtenidos en los estudios multidisciplinares realizados, los recursos geológicos identificados, incluyendo Lugares de Interés Geológico (LIGs), además de explicar la evolución geológica de la zona de estudio y los procesos geológicos que tuvieron lugar en ella (Fig. 2). Los términos geológicos y cronoestratigráficos utilizados en los mapas e informes corresponden a los empleados por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) y a otros códigos de nomenclatura internacional (p.ej., *North American International Stratigraphic Code*, NASC; *International Stratigraphic Commission*, ISC). De este modo, fue realizado un esfuerzo especial por homogeneizar la nomenclatura de las unidades geológicas, teniendo en cuenta la estructura general de la leyenda única.

Por tanto, los mapas y memorias que acompañan a cada carta reúnen todo el conocimiento generado durante PLANAGEO, siendo un manual de referencia geológica para futuros estudios geológico-mineros en la región. De hecho, los datos geológicos, geocronológicos y geoquímicos, complementados por la interpretación aerogeofísica e imágenes satelitales, permitieron profundizar en el conocimiento de los límites y la extensión de los dominios geológicos definidos en el sustrato precámbrico del SW de Angola (p.ej., Rodrigues et al., 2021; Fig. 3). Estos dominios geológicos son representados por un conjunto de unidades litodémicas características y delimitados por macroestructuras bien definidas en los modelos geofísicos. Estos dominios representan bloques de corteza que tuvieron una evolución geológica independiente durante su historia, hasta ser amalgamados en eventos orogénicos específicos. La división de estos dominios fue esencial para establecer los episodios magmáticos y tectono-metamórficos registrados, la historia geológica y el potencial de los recursos geológicos del sur de Angola.



FIGURA 3. *Mapa simplificado de los dominios geológicos/geotectónicos de la región sur de Angola, a partir de los trabajos geotemáticos realizados por el consorcio UTE PLANAGEO.*

CONCLUSIONES

Los trabajos desarrollados durante el Proyecto PLANAGEO en Angola han sido fundamentales para crear una infraestructura de conocimiento detallada y adaptada a las nuevas tecnologías digitales. Los mapas geológicos realizados en los últimos años en los diferentes bloques de trabajo de la región sur de Angola por el consorcio UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA) han mejorado sustancialmente el conocimiento geológico de la región sur del Escudo de Angola, cuya historia geológica abarca desde tiempos arcaicos hasta épocas recientes. Toda la información obtenida a partir de los trabajos de cartografía geológica, junto con la interpretación de los datos adquiridos por otros métodos complementarios (*i.e.*, teledetección, geofísica, geoquímica, geocronología), ha sido crucial para mejorar el entendimiento geológico-estructural de la mitad sur del país, dando lugar a la definición de diversos dominios geológicos de escala cortical. Todo este conocimiento queda reflejado en decenas de mapas, informes y memorias, así como en un elevado muestreo geológico a disposición del IGEO, que promoverán nuevas aportaciones a la comunidad científica y facilitarán futuras investigaciones geológicas en el territorio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO). Agradecemos la inestimable ayuda prestada por el personal local, que facilitó las difíciles condiciones durante nuestro trabajo de campo. Este trabajo es también dedicado a todo el personal UTE PLANAGEO que colaboró en el proyecto.

REFERENCIAS

Araújo, A.G., Perevalov, O.V. y Jukov, R.A. (1988): *Carta Geológica de Angola, Escala: 1:1 000 000*. Instituto Nacional de Geologia, Angola.

Carvalho, H. (coord.) (1982): *Carta Geológica de Angola à escala 1: 1 000 000.* PIICT, Investig. Ultramar, 26.

Carvalho, H., Tassinari, C., Alves, P.H., Guimarães, F.E. y Simões, M.C. (2000): Geochronological review of the Precambrian in western Angola: links with Brazil. *Journal of African Earth Sciences*, 31(2): 383-402.

Figuereiro Nunes, A. (1991): *A investigação geológico-mineira em Angola*. Instituto para a Cooperação Económica, Portugal, 387 p.

Jelsma, H.A., McCourt, S., Perritt, S.H. y Armstrong, R.A. (2018): The Geology and Evolution of the Angolan Shield, Congo Craton. En: *Geology of Southwest Gondwana. Regional Geology Reviews* (S. Siegesmund et al., eds). Springer, 217-239.

Merino-Martínez, E. y Goicoechea, P. (2021): *Mapa e Notícia Explicativa da Carta Geológica de Lubango, Folha SUL D-33/N, escala 1: 250.000.* IGEO, 242 p.

Pascal, M. (coord.) (2006): *Carta Geológica do Planalto Meridional de Angola à escala 1:500.000*. IGEO.

Rodrigues, J.F., Merino Martínez, E., y Ferreira, E. (coords.) (2021): *Mapa Tectónico de Angola à escala 1:1.100.000, e Notícia Explicativa.* IGEO, MIREMPET, Luanda (Angola), 101 p.

Modelización magnética del Complejo de Cunene (SW Angola).

Magnetic modelling of the Kunene Complex (SW Angola).

T. Mochales[1*], E. Merino-Martínez[2], C. Rey-Moral[2], A. Machadinho[3,4], J. Carvalho[3], P. Represas[3], J.L. García-Lobón[2], M.C. Feria[5], R. Martín-Banda[2], M.T. López-Bahut[2], D. Alves[3], E.C. Ramalho[3], J. Manuel[6] y D. Cordeiro[6]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, Av. de Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España. *t.mochales@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, c/ de la Calera, 23. 28760 Tres Cantos-Madrid, España.
3 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. da Portela 999, Amadora, Portugal.
4 CGEO - University of Coimbra, Rua Sílvio Lima, Pólo II, 3030-790 Coimbra, Portugal.
5 Sistemas Avanzados de Tecnología, S.A (SATEC), Av. Europa, 34 A, 28023, Madrid, España.
6 Instituto Geologico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda, Angola.

Palabras clave: Complejo Anortosítico del Cunene, modelización magnética, inversión, Angola**.**

Resumen

El Complejo de Cunene (CC) representa un extenso macizo ígneo mesoproterozoico compuesto por rocas anortosíticas, gabroicas y ácidas contemporáneas, que aflora 18.000 km^2 en dirección NNE-SSW desde el SW de Angola al NW de Namibia. Se han interpretado y modelizado en 2,5/3D los datos aerogeofísicos obtenidos en el proyecto PLANAGEO para investigar los límites no expuestos del CC, reconstruyendo la estructura de la corteza superficial bajo la cobertera del Kalahari. Gracias a la modelización se descifra una geometría lobular cuya extensión es casi tres veces la superficie aflorante y superior a la estimada mediante gravimetría (45.000 km^2; Rey-Moral *et al*., 2022). Las anomalías magnéticas identificadas definen cuerpos individuales que conforman diversos pulsos magmáticos coalescentes durante el Mesoproterozoico. Las lineaciones magnéticas indican grandes sistemas de cizallamiento desarrollados en varias fases intrusivas en un contexto colisional de arco. Los lineamientos magnéticos al E sugieren un emplazamiento asociado a etapas transtensivas. Al W, con los pulsos más jóvenes, se detectan lineamientos en un régimen contraccional complejo. Estructuras tardías NNW-SSE extensionales, involucran magmas mantélicos y cuencas mesoproterozoicas tardías (<1,33 Ga).

Abstract

The Kunene Complex (KC) is an extensive Mesoproterozoic igneous massif composed of anorthositic, gabbroic and contemporaneous acid rocks. Its outcrops extend over 18,000 km^2 in a NNE-SSW direction from SW Angola to NW Namibia. Aerogeophysical data obtained within the PLANAGEO project have been interpreted and modelled in 2.5D and 3D to investigate the concealed boundaries of the KC and to reconstruct the structure of the surface crust beneath the Kalahari cover. The modelling reveals a lobular geometry with an extension of almost three times the outcropping area, even larger than estimated by gravimetry (45,000 km^2; Rey-Moral *et al*., 2022). The magnetic anomalies identified define individual bodies that formed several coalescent magmatic pulses during the Mesoproterozoic. Magnetic lineaments indicate large shear systems developed in various intrusive phases in a collisional arc context. Magnetic lineaments to the east suggest an emplacement associated with transtensive stages. To the W, with the most recent pulses, lineaments in a complex contractional regime are detected. Late NNW-SSE extensional structures involve mantle magmas and late-Mesoproterozoic basins (<1.33 Ga).

Referencias

Rey-Moral, C., Mochales, T., Merino-Martínez, E., García-Lobón, J.L., López-Bahut, M.T., Martín-Banda, R., Feria, M.C., Ballesteros, D., Machadinho, A. y Alves, D. (2022). Recording the largest gabbro-anorthositic complex worldwide: The Kunene Complex (KC), SW Angola. *Precambrian Research* 379, 106790, doi: 10.1016/j.precamres.2022.106790

El Complejo Calco-Alcalino de la Serra da Neve (SW Angola) – trabajos en curso.

Serra da Neve Calc-Alkaline Complex (SW Angola) - ongoing studies.

C. Prazeres[1], M.J. Batista[1], R. Lopes[2], B. Barros[2], P. Ferreira da Costa[3], J. Labaredas[2], F. Guimarães[1], J.F. Rodrigues[1] y D. Cordeiro[4]

1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, 2610-999 Amadora, Portugal. catia.prazeres@lneg.pt
2 UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/Impulso), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España.
3 Faculdade de Ciências da Universidade e Lisboa (FCUL) Campo Grande, 1749-016, Lisboa, Portugal.
4 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Luanda, Angola.

Palabras clave: Serra da Neve; ETR (Nb-Ta); levantamientos de campo; mineralogía.

Resumen

El Complejo Calco-Alcalino de la Serra da Neve (CACSN) constituye un conjunto de estructuras alcalinas volcánicas, subvolcánicas y plutónicas emplazadas en una tendencia general ONO-ESE a NO-SE (Pereira y Moreira, 1978; Lopes y Caessa, 2021). Fue remapeado a escala 1:100.000 para la cartografía geológica del proyecto PLANAGEO y posteriormente fue una de las áreas seleccionadas para realizar exploración mineral para ETR-Nb-Ta a escala regional. Las campañas de campo incluyeron levantamientos con FRX portátil y SRG portátil, cuyos resultados mostraron patrones preliminares de distribución de ETR en las litologías del CACSN (Prazeres *et al*., en revisión). Los muestreos realizados durante el trabajo de campo permitieron estudios petrográficos y análisis con microsonda electrónica, que son la base para comprender la mineralogía de los ETR. Hasta ahora se ha demostrado que algunos carbonatos (bastnasita), fosfatos (apatito y xenotima), minerales de Zr (eudialita) y esfena incorporan cantidades apreciables de ETR, especialmente ETR ligeros.

Abstract

The Serra da Neve Calc-Alkaline Complex (SNCAC) constitutes a set of volcanic, subvolcanic and plutonic alkaline structures emplaced in an overall WNW-ESE to NW-SE trend (Pereira and Moreira, 1978; Lopes and Caessa, 2021). It was remapped at the 1:100,000 scale for the geological mapping in the PLANAGEO project and subsequently it was one of the areas selected to undergo mineral exploration for REE-Nb-Ta at a regional scale. Field campaigns included portable XRF and portable GRS surveys, which have showed preliminary distribution patterns of REE in the SNCAC lithologies (Prazeres *et al*., under review). Sampling performed during field work allowed for petrographic studies and electron microprobe analysis, which are the basis for understanding the REE-bearing mineralogy. So far, carbonates (bastnasite), phosphates (apatite and xenotime), Zr minerals (eudyalite) and sphene have been shown to incorporate significant amounts of REE, especially light REE.

Referencias

Lopes, R. y Caessa, P. (2021). *Mapa Geológico de Angola a escala 1:100 000, Folha 295, Capira, e Notícia Explicativa (1ª edição*). UTE PLANAGEO (IGME/LNEG/IIA) – IGEO, Luanda, 194 p.

Pereira, E. y Moreira, A. (1978). Sobre o complexo de estruturas anelares da Serra da Neve (Angola). En: *II Centenário Academia das Ciências, Lisboa. Estudos de Geologia, Paleontologia e Micologia, 97-120.*

Prazeres, C., Batista, M.J., Lopes, R., Barros, B., Labaredas, J., Rodrigues, J.F. y Cordeiro, D. (en revisión). Portable X-Ray Fluorescence and Gamma Ray Spectrometry exploration in the Serra da Neve Calc-Alkaline Complex, SW Angola. En: *Boletín Geológico y Minero, Número Monográfico Especial "El Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO)".*

Investigación hidrogeológica en la provincia de Cunene en el contexto del proyecto PLANAGEO.

Hydrogeological investigation in the Cunene province within the framework of the PLANAGEO project.

E.C. Ramalho[1], A. Francés[1], R. Martín-Banda[2], J.M. Llorente[2], T. Mateus[3], F. Monteiro Santos[4], I. Cuervo[5], J.L. García Lobón[2], V. Dala[6], M. Ditutala[6], A. Famorosa[6] y A.M.L. Victorino[6]

1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, Apartado 7586, Alfragide, 2610-999 Amadora, Portugal. elsa.ramalho@lneg.pt
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, C/ La Calera, 1, 28760 Tres Cantos – Madrid, España.
3 União Temporária de Empresas (UTE), Instituto Superior Politécnico da Huila (ISPH) da Universidade Mandume Ya Ndemufayo (UMN), Governo da Província do Cunene, Angola.
4 Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – Instituto D. Luiz, Campo Grande C8, Lisboa, 1749-016 Portugal.
5 Impulso Angola, Rua Ndunduma 85, Miramar, Luanda, Angola.
6 Instituto Geológico de Angola (IGEO), Rua 311, Centralidade do Kilamba, Belas, Luanda, Angola.

Palabras clave: Cunene, hidrogeología, geofísica, sondeos, registros geofísicos.

Resumen

En el marco del Proyecto PLANAGEO, el reprocesamiento de datos de resistividad eléctrica de sondeos eléctricos verticales realizados en el periodo anterior a la independencia de Angola, ha permitido la construcción de un modelo geoeléctrico cuasi-3D de la cuenca de Cuvelai-Etosha, al norte de la frontera Angola-Namibia (Ramalho *et al.*, 2023). Destacan las propriedades geoeléctricas del basamento rocoso del modelo, que fue validado con información hidrogeológica y geofísica adicional, *i.e.* de prospección electromagnética en dominio tiempo, realizados durante el proyecto, que permitieron la identificación de diferentes capas con características geoeléctricas propias y la caracterización de los dominios hidrogeológicos de la cuenca (Francés *et al.*, aceptado). El modelo obtenido se utilizó para definir el emplazamiento de 5 pozos de perforación profundos, cuyo estudio comprendió el análisis de los registros geofísicos, estimación de parámetros acuíferos, datos hidroquímicos de elementos mayores y menores, análisis isotópico y muestras de ripios.

Abstract

Within the framework of the PLANAGEO project, the reprocessing of electrical resistivity data from vertical electrical soundings surveys carried out in the pre-independence period of Angola allowed the construction of a quasi-3D geoelectrical model of the Cuvelai-Etosha basin in the northern part of the Angolan-Namibian border (Ramalho *et al.*, 2023). The geoelectrical properties of the bedrock of the model stand out, which were validated with additional hydrogeological and geophysical information, *i.e.* time-domain electromagnetic surveys, carried out during the project (Francés *et al.*, accepted), allowing the identification of layers with different geoelectric features and the characterisation of the hydrogeological domains of the basin. The model obtained was used to define the location of 5 deep boreholes, which comprised the analysis of geophysical logging, aquifer parameters estimation, hydrochemical data of major and minor elements, isotopic analysis, and drilling cuttings.

Referencias

Francés, A.P., Ramalho, E.C., Monteiro-Santos, F., Llorente, J.M., Mateus, T., Martín-Banda, R., Cuervo, I., García-Lobón, J.L., Dala, V., Ditutala, M., Famorosa, A. y Victorino, A.M. (aceptado). Contribution of the time domain electromagnetic method to the study of the Kalahari transboundary multilayered aquifer systems in Southern Angola. *Hydrogeology Journal.*

Ramalho, E.C., Francés, A.P., Santos, F.M. y da Mata Victorino, A. (2023). 3D electrical structure definition of aquifer systems in the Kalahari basin in Southern Angola based on legacy data reprocessing. *Journal of Applied Geophysics*, 211. doi: 10.1016/j.jappgeo.2023.104968.

Geoquímica isotópica (Sm-Nd) de pizarras devónicas de Menorca. Implicaciones para el magmatismo de la evolución del Paleo-Tethys

Isotopic geochemistry (Sm-Nd) of Devonian slates from Menorca Island. Magmatic implications of the Paleo-Tethys evolution

R. Arenas[1], J.M. Fuenlabrada[2], C. Timoner[3], E. Rojo-Pérez[1]

1- Dpto. de Mineralogía y Petrología and Inst. Geocienc. (UCM, CSIC), Univ. Complutense, 28040 Madrid, Spain. rarenas@ucm.es; e.rojo@ucm.es
2- Unidad de Geocronología (CAI de Cienc. de la Tierra y Arqueom.), Univ. Complutense, 28040 Madrid, Spain. jmfuenla@ucm.es
3- Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, 95447 Bayreuth, Germany. ctimoner@uni-bayreuth.de

Palabras clave: Menorca Island, Devonian series, Sm-Nd isotopic geochemistry, Paleo-Tethys evolution

Resumen

La secuencia pre-orogénica devónica del norte de Menorca tiene una potencia de c. 1000 m y contiene un registro estratigráfico bastante completo. Algunos sills delgados de gabros alcalinos con Ti-augita intruyen a la unidad devónica, para la cual se sugiere una correlación con unidades similares del sur de la Zona Centroibérica. La relación $^{143}Nd/^{144}Nd$ muestra una evolución desde valores más bajos en la base de la columna (valores de 0,511941), hasta valores más altas a techo (valores de 0,512131). Las edades modelo de Nd varían en el rango 1754 - 1496 Ma (Paleoproterozoico Superior–Mesoproterozoico Inferior), siendo consistentemente más jóvenes hacia techo. Estos datos descartan una procedencia a partir de la erosión del Cratón del Oeste de África, siendo más compatibles con una procedencia a partir de regiones situadas en el Orógeno Trans–Sahariano o en el Metacratón del Sahara. Las características de la secuencia devónica de Menorca son compatibles con su sedimentación en una cuenca peri-Gondwánica estrecha y profunda generada en un contexto transtensional, al sur de la cuña orogénica activa varisca. La variación sistemática en la composición isotópica del Nd indica la denudación progresiva y continua de regiones situadas progresivamente más hacia el este del margen del norte de África, en un contexto colisional entre Laurussia y Gondwana con un marcado componente dextral. Esta evolución no resulta compatible con la existencia de un océano Paleo-Tethys devónico inmediatamente más al sur o el este del Macizo Ibérico, ni por consiguiente con arcos volcánicos relacionados con el mismo. Este océano debió tener por tanto una extensión limitada a regiones más orientales del margen de Gondwana.

Abstract

The c. 1000 m thick preorogenic Devonian sequence of North Menorca Island shows a fairly complete stratigraphic succession. Some thin sills of Ti-augite-bearing alkaline gabbros occur within the Devonian unit. Correlation with similar units located in the southern sectors of the Central Iberian Zone is suggested. A marked trend is observed in initial $^{143}Nd/^{144}Nd$ ratios, from lower values at the base of the column (minimum of 0.511941) to higher isotope ratios at the top (maximum of 0.512131). Nd model ages range between 1754 and 1496 Ma (Late Paleoproterozoic-Early Mesoproterozoic), being consistently younger up-column. These data allow to rule out a provenance from erosion of the West Africa Craton, being more compatible with provenance from regions located in the Trans-Saharan Belt or in the Sahara Metacraton. The characteristics of the Menorcan Devonian sequence are compatible with its deposition in a narrow and deep peri-Gondwanan transtensional basin, generated to the South of an advancing Variscan orogenic wedge. Systematic variations in Nd isotopic composition indicate progressive and continuous denudation of increasingly easternmore North African sectors, in a collisional context between Laurussia and Gondwana with a marked dextral component. This evolution is not compatible with the existence of a large Devonian Paleo-Tethys ocean immediately to the South or East of the Iberian Massif, consequently neither with the existence of volcanic arcs related to the same. This ocean must therefore have limited its extension to easternmore regions of the Gondwana margin.

Estudio experimental de la estabilidad de circón supersolidus en sistemas máficos

Experimental study of the stability of zircon in mafic systems at supersolidus conditions.

A. Cambeses[1*], S. Chakraborty[2], F, Bea[1], C. Beyer[2], P. Montero[1], N. Pujol-Solá[1], I. Novo-Fernández[1], M.M. Repczyńska[1], L. Barcos[1], A. Garcia-Casco[1], J.F., Molina[1].

1- Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. * aitorc@ugr.es; fbea@ugr.es; pmontero@ugr.es; npujolsola@ugr.es; inovo@ugr.es; maria.repczynska@ugr.es; leticia_barcos@ugr.es; agcasco@ugr.es; jfmolina@ugr.es
2- Institut für Geologie, Mineralogie & Geophysik, Ruhr-Universität Bochum, Univertsitätsstrasse 150, Bochum, 44801, Germany; Sumit.Chakraborty@ruhr-uni-bochum.de; christopher.c.beyer@rub.de

Palabras clave: Zircon, mafic melts, HT condition, supersolidus

Resumen

La baja concentración de Zr en líquidos máficos, unida a la alta solubilidad del circón, cuestionan los procesos que permiten su precipitación y preservación en estos sistemas. En este estudio, presentamos resultados experimentales preliminares para desentrañar los mecanismos de precipitación del circón en magmas máficos. Se llevaron a cabo experimentos desde condiciones superliquidus, 1250 ºC, hasta condiciones de bajo grado de cristalización, 1150 ºC, considerando una rampa de enfriamiento 10 ºC/h a distintas presiones para evaluar dos escenarios: i) alta concentración de Zr que provendría de un circón heredado, y ii) sistema con contenido estandadar de Zr de magmas basálticos. Para simular los efectos del circón heredado en un magma máfico durante el enfriamiento, se suspendió un cubo de circón de tamaño 1x1x1 mm en un vidrio basáltico MORB en condiciones anhidras a 1 atm. El circón muestra evidentes texturas de disolución y crecimiento en el borde del cristal, mientras que el circón y otras fases de Zr cristalizaron lejos del borde en la matriz. Por otro lado, en el vidrío basáltico con c. 150 ppm de Zr el circón cristalizó en el fundido intersticial junto con clinopiroxeno a 15 kbar. Estos resultados demuestran que la saturación local de circón se alcanza en fundidos de composición máfica con una concentración inicial de Zr muy baja cuando se aísla un bajo volumen de fundido. Este mecanismo de cristalización del circón explica el amplio rango de temperaturas de cristalización mostrado por el circón en rocas máficas, incluyendo condiciones de alta temperatura.

Abstract

The low concentration of Zr in mafic liquids, coupled with the high solubility of zircon, question the processes that allow its precipitation and preservation in mafic magmas. In this study, we present preliminary experimental results to unravel the mechanisms of zircon precipitation in mafic magmas. We conducted experiments considering a cooling ramp from super liquidus conditions, 1250 ºC, to low crystallisation degree conditions, 1150 ºC, at 10 ºC/h rate at varied pressures. Two scenarios are evaluated: i) excess Zr is available stored in inherited/xenocrystic zircon grains, and ii) Zr contents are similar to those in average basaltic rocks. To simulate the effects of inherited zircon in a mafic magma during cooling, a zircon cube 1x1x1 mm in size was suspended in a dry-MORB basaltic glass at 1 atm. Zircon shows evident dissolution and growth textures in the crystal rim, whereas zircon and other Zr-bearing phases crystallised far from the rim in the matrix. On the other hand, we dopped a dry-MORB basaltic glass with c. 150 ppm of Zr, typical of basalt. Zircon crystallised in the interstitial melt along with newly formed clinopyroxene at 15 kbar. These results demonstrate that local zircon saturation is reached in melts of mafic composition with initially very low Zr concentration when a low volume of melt is isolated. This mechanism of zircon crystallisation explains the wide range of crystallisation temperatures displayed by zircon in mafic rocks, including high-temperature conditions.

Identificación de diversos protolitos de granitoides de la Zona Centro Ibérica meridional a partir de nuevos datos geoquímicos

Identifying diverse protoliths of granitoids from the southern Central Iberian Zone from new geochemical data

J. Errandonea-Martin[1], F. Sarrionandia[2], E. Roda-Robles[1], S. García de Madinabeitia[1], I. Garate-Olave[1], A. Alonso-Olazabal[1], L.A. Ortega[1], M. Carracedo-Sánchez[1] y J.I. Gil Ibarguchi[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco 48094 Leioa, Bizkaia. jon.errandonea@ehu.eus; encar.roda@ehu.eus; sonia.gdm@ehu.eus; idoia.garate@ehu.eus; ainhoa.alonso@ehu.eus; luis.ortega@ehu.eus; manuel.carracedo@ehu.eus; josei.gil@ehu.eus
2 Dpto. Geología, Facultad de Farmacia, Universidad del País Vasco 01006 Vitoria-Gasteiz, Álava. fernando.sarrionandia@ehu.eus

Palabras clave: Granito, Peralumínico, Corteza, Los Pedroches, Orogenia Varisca.

Resumen

La alineación magmática de Nisa–Alburquerque–Los Pedroches se localiza en la Zona Centro Ibérica meridional, y está formada, en términos generales, por dos tipos de granitoides tardi-Variscos: 1) granodioritas metalumínicas de tipo I, y 2) granitos peralumínicos de tipo S. El origen de los magmas parentales de los granitos peralumínicos de la parte central y oriental de la alineación ha sido, y es, tema de debate, sobre todo por sus composiciones isotópicas (Sr_{310} = 0.704–0.708; εNd_{310} = de -2 a -5) que son relativamente similares tanto a las granodioritas como a los posibles protolitos metaígneos/metasedimentarios. Nuevos datos isotópicos (Sr-Nd) reafirman dicha similitud entre los granitos ligeramente peralumínicos y granodioritas, mientras que los datos geoquímicos elementales apuntan a la existencia de distintas asociaciones a escala regional. A diferencia de las granodioritas de tipo I, los granitos de tipo S parecen haber derivado de la fusión de distintos protolitos corticales. A escala regional, los granitos (SiO_2 > 66 % en peso) se pueden dividir en a) una asociación con bajos-moderados índices de peraluminosidad (A/CNK = 1.00–1.15), bajos contenidos en fósforo (P_2O_5 < 0.25 % en peso) y altos en CaO (1–3 % en peso); y b) una asociación de carácter moderadamente a fuertemente peralumínico (A/CNK 1.10–1.35), con altos contenidos en P_2O_5 de hasta 0.6 (% en peso) y bajos en CaO (CaO < 1 % en peso). La primera asociación podría proceder principalmente de la fusión de protolitos metasedimentarios (psamíticos) o metaígneos félsicos-intermedios, mientras que los segundos de protolitos metasedimentarios más pelíticos.

Abstract

The Nisa–Alburquerque–Los Pedroches magmatic alignment is located in the southern Central Iberian Zone, and is broadly formed by two late-Variscan granitoid types: 1) metaluminous I-type granodiorites, and 2) peraluminous S-type granites. The origin of parental magmas that resulted in the peraluminous granites from the central and eastern areas of the alignment has been, and still is, a matter of debate, mainly due to the isotopic compositions (Sr_{310} = 0.704–0.708; εNd_{310} = -2 to -5) that are fairly similar to the granodiorites and possible metaigneous/metasedimentary protoliths. New isotopic data (Sr-Nd) reinforces such similarity between the low-peraluminous granites and granodiorites, whereas geochemical elemental data point to the existence of different associations at regional scale. In contrast to the I-type granodiorites, the S-type granites seem to have been derived from melting of different crustal protoliths. At regional scale, granites (SiO_2 > 66 wt. %) could be divided into a) a low- to moderately-peraluminous (A/CNK = 1.00–1.15), P-poor (P_2O_5 < 0.25 wt. %) and Ca-rich (CaO 1–3 wt. %) association; and b) a moderately- to strongly-peraluminous (A/CNK 1.10–1.35), P-rich (P_2O_5 up to 0.6 wt. %) and Ca-poor (CaO < 1 wt. %) association. The former could originate mainly from melting of metasedimentary (psammitic) or felsic-intermediate metaigneous protoliths, whereas the latter from more pelitic metasedimentary protoliths.

Estudio teórico y experimental de la estabilidad subsólida de circón en sistemas ultramáficos.

A theoretical and experimental study of the subsolidus stability of zircon in ultramafic systems.

A. Garcia-Casco[1,2], N. Pujol-Solá[1], I. Novo-Fernández[1], A. Cambeses[1], J.F., Molina[1], M.M. Repczyńska[1], L. Barcos[1], P. Montero[1], F, Bea[1].

1- Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. agcasco@ugr.es, inovo@ugr.es, npujolsola@ugr.es, aitorc@ugr.es, jfmolina@ugr.es, ; maria.repczynska@ugr.es, leticia_barcos@ugr.es, pmontero@ugr.es, fbea@ugr.es
2- Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), 18100 Armilla, Granada, Spain

Palabras clave: Zircon, mantle, peridotite, pyroxenite, subsolidus.

Resumen

Un estudio teórico y experimental de la estabilidad subsolidus de circón en sistemas ultramáficos muestra que la estabilidad máxima de este mineral en asociaciones con olivino viene dada por la reacción simplificada olivino + circón = ortopiroxeno + baddeleyita. La pendiente de esta reacción en el espacio P-T es muy alta, representado en la práctica una isoterma crítica para explicar la presencia de circón en peridotitas. La temperatura de la reacción ha sido establecida experimentalmente a >1300 ºC a 15 kbar usando mezclas de minerales de xenolitos peridotíticos de San Carlos, lo que es consistente con cálculos teóricos. Estos resultados sugieren que el circón es estable en peridotitas hasta las profundidades del límite litosfera-astenosfera continental cratónica y oceánica madura (fría), así como en gradientes térmicos a lo largo de la MOHO subducida. Las relaciones de fases teóricas indican que la estabilidad subsólida del circón se expande en rocas piroxeníticas si el olivino está ausente, particularmente a alta presión en piroxenitas con granate. Sin embargo, el circón se consume tanto en peridotitas como en piroxenitas durante la fusión progresiva por descompresión del manto litosférico y astenosférico bajo crestas medio-oceánicas y en ambientes de ante- y retro-arco. Estos resultados ilustran que el circón sobrevive de forma general en el manto litosférico subsólidus y en condiciones subsólidas y supersólidas en subsistemas sin olivino, por ejemplo, blindado en otros minerales como piroxeno o granate.

Abstract

A theoretical and experimental study of the subsolidus stability of zircon in ultramafic systems shows that the maximum stability limit of zircon in olivine-bearing mineral assemblages is given by the simplified reaction olivine + zircon = orthopyroxene + baddeleyite. The calculated slope of this reaction in P-T space is rather steep, representing in practice an isotherm critical for explaining the presence of zircon in peridotites. The temperature of the reaction has been bracketed experimentally above 1300 ºC at 15 kbar using mixtures of phases from San Carlos peridotite xenoliths, consistent with theoretical expectations. These results suggest that, under geothermal gradients of continental (shield) lithosphere and old thick (mature) oceanic lithosphere and along thermal gradients of subducted oceanic MOHO, zircon in peridotite is stable down to the continental/oceanic lithosphere-asthenosphere boundary. The theoretical phase relations indicate that the subsolidus stability of zircon is expanded in pyroxenitic rocks if olivine is absent, particularly at high pressure in garnet pyroxenites. However, zircon is consumed both in peridotites and pyroxenites during progressive melting upon decompression in mid-ocean ridge and fore- and back-arc environments. These results illustrate that zircon survives in the lithospheric mantle and under subsolidus and supersolidus conditions in olivine-free subsystems, for example, shielded within another mineral like pyroxene or garnet.

Identificación del origen del magmatismo post-colisional a través de enclaves microgranulares máficos y experimentos.

Tracing the origin of post-collisional magmatism through mafic microgranular enclaves and experiments.

D. Gómez-Frutos[1], A. Castro[1]

1 Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), C. José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, Spain. daniel.gomez@csic.es, antonio.castro@csic.es

Palabras clave: Magmatism, enclaves, granite petrogenesis, sanukitoid.

Resumen

El magmatismo post-colisional aparece asociado a orógenos colisionales como grandes intrusiones silíceas que incluyen composiciones desde máfico-intermedias (sanukitoides) hasta graníticas. Dentro de las intrusiones graníticas, los enclaves microgranulares máficos (MME) son comunes, considerados como representantes de un *endmember* máfico con afinidad mantélica en la petrogénesis de granitos. Por lo tanto, constituyen un trazador ideal del rol del manto en lo que son procesos de potencial crecimiento cortical. Sin embargo, su relación con los granitos que los incluyen y el rol de dicho manto sigue siendo desconocido. A este respecto, la inferencia combinada de MME del batolito de Los Pedroches (Macizo Ibérico) y de experimentos petrológicos proporciona limitaciones valiosas a este problema. Aquí proporcionamos un estudio comparativo entre MME y la suite sanukitoide de los batolitos post-colisionales, revelando una coincidencia geoquímica precisa. Se pone así en evidencia una signatura geoquímica común consistente en alto MgO y K_2O y bajo CaO, sugiriendo un potencial vínculo genético entre MME y la suite sanukitoide en una fuente mantélica modificada. La información proporcionada por líquidos experimentales de comportamiento cotéctico y por la petrografía señalan a la diferenciación cotéctica y a procesos de auto-contaminación con ortopiroxeno como los responsables de esta particular geoquímica. Las implicaciones sobre el origen de los batolitos post-colisionales sugieren un origen común mantélico si bien heterogéneo para todo el magmatismo post-colisional, que está en última instancia relacionado por un proceso de diferenciación.

Abstract

Post-collisional magmatism appears associated to collisional orogens as large silicic intrusions which include compositions ranging from mafic-intermediate (sanukitoid) to granitic. Among the granitic intrusions, mafic microgranular enclaves (MME) are commonly found, considered to represent a mafic endmember with mantle affinity related to granite petrogenesis. Hence, they constitute an ideal tracer for the role of the mantle in potential crustal-growth processes. However, their exact relationship with the host granites and the role of the mantle remains unclear. In this regard, combined evidence from MME in Los Pedroches batholith (Iberian Massif) and petrological experiments can provide valuable constrains to this problem. Herein we provide a comparative study between MME and the mafic-intermediate (sanukitoid) suite of post-collisional batholiths, revealing an accurate overlap between the two groups. A common geochemical signature consisting of high MgO and K_2O and low CaO is evidenced, pointing to a potential genetic link between MME and the sanukitoid suite in a modified mantle source. Further information provided by cotectic experimental liquids and petrographical evidence point to cotectic differentiation and orthopyroxene restite self-contamination as the main responsible mechanisms for the particular geochemistry of the series. Implications for post-collisional batholith petrogenesis is subsequently addressed, suggesting a heterogeneous yet common mantle origin for all post-collisional magmatism, ultimately related by a differentiation process.

Isótopos de Hf–Sr–Nd en granitoides variscos postectónicos (Galicia, Noroeste de España).

Hf–Sr–Nd isotopes in postectonic variscan granitoids (Galicia, NW Spain).

L. González-Menéndez[1], G. Gallastegui[2], A. Cuesta[3], P. Montero[4], F. Bea[4]

1 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Unidad de León, 24006 León, España. l.gonzalez@igme.es
2 Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), Unidad de Oviedo, 33005 Oviedo, España. g.gallastegui@igme.es
3 Departamento de Geología, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo, 33005 Oviedo, España. acuesta@uniovi.es
4 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva 18002, Granada, España. pmontero@ugr.es, fbea@ugr.es

Resumen: Los granitoides postectónicos variscos del noroeste de España (Galicia occidental) forman plutones de considerable extensión y tienen edades comprendidas entre los 290 y 294 Ma. Su composición mineralógica y química ha permitido clasificarlos mayormente como granitos con tipologías I, o intermedias entre I y S, que incluyen escasos cuerpos tonalíticos. En ente trabajo se presentan nuevos datos isotópicos de Hf–Lu en circones junto con isótopos de Sr y Nd obtenidos en roca total. Los valores de EpHf vs. Sri y EpNd muestran una considerable variabilidad indicativa de heterogeneidad composicional en las zonas fuente de estos granitos. Protolitos metaígneos y/o metasedimentarios con diferentes grados de reciclaje cortical sustentan la clasificación I/S para estos granitos. También aparecen componentes máficos y juveniles algunos de los cuales podrían ser aportes mantélicos directos. La presión de formación de estos magmas, estimada mediante las relaciones isotópicas de Lu/Hf en circones, muestra profundidades de corteza superior ± media que pueden corresponder a una corteza adelgazada en el final de la Orogenia Varisca.

Palabras clave: isótopos, Hf–Sr–Nd, granitoides postectónicos, varisco, Macizo Ibérico.

Abstract: The variscan post-tectonic granitoids of the NW Spain (western Galicia) form plutons of considerable extension and have ages between 290 and 294 Ma. Their mineralogical and chemical composition has allowed to classify them mostly as granites with typologies I, or intermediate between I and S, which include few tonalitic bodies. In this work we present new Hf–Lu isotopic data in zircons together with Sr and Nd isotopes obtained in whole-rock. The values of EpHf vs. Sri and EpNd show considerable variability indicative of compositional heterogeneity in the source zones of these granites. Metaigneous and/or metasedimentary protoliths with different degrees of cortical recycling support the I/S classification for these granites. Mafic and juvenile components also appear, some of which could be direct mantle inputs. The formation pressure of these magmas, estimated by Lu/Hf isotope ratios in zircons, shows upper ± middle crustal depths that may correspond to a thinned crust at the end of the Variscan Orogeny.

Key words: *isotopes, Hf–Sr–Nd, postectonic granitoids, variscan, Iberian Massif,*

INTRODUCCIÓN

Los granitoides variscos postectónicos del noroeste de la península ibérica, emplazados hace 290–294 Ma, constituyen un importante volumen de rocas mayoritariamente graníticas (Cuesta y Gallastegui, 2004; González-Menéndez et al., 2017). Entender el origen y la profundidad de generación de estos magmas es importante para evaluar el grado de reciclaje cortical vs. aportación mantélica y su relación con la fase final de la orogenia Varisca. Para ello, el estudio isotópico de Hf y Lu (en circones) combinado con isotopos de Sr–Nd (en roca total) constituye una herramienta de gran utilidad (Kemp et al., 2007; Dahlquist et al., 2020; Moreira et al., 2023). Dado que los estudios isotópicos son escasos e incompletos en estos granitos, en este trabajo presentamos datos isotópicos inéditos de Hf y Lu en circones, combinados con datos previos de los autores de Sr y Nd en roca total, para evaluar el origen y evolución de los granitos postectónicos variscos en este sector del Macizo Ibérico.

En el noroeste peninsular (Galicia occidental), correspondiente a la Zona de Galicia–Trás–os–Montes del Macizo Ibérico (ZGTM; Fig. 1), algunos de los granitos variscos postectónicos más representativos son el plutón de Porriño (González-Menéndez et al., 2017) y el plutón de Caldas de Reis (Cuesta, 1991) (Fig. 1). Se trata de plutones formados por diferentes facies graníticas con escasos cuerpos tonalíticos. Las litologías graníticas están formadas por Qz (cuarzo) + Pl (plagioclasa) + Kfs (feldespato potásico) + Bt (biotita) ± Amp (anfíbol) ± Ttn (titanita) ± Grt (granate) ± Ms (moscovita) y asociaciones de minerales accesorios

constituidas por Ap (apatito) + Zrn (circón) + Aln (allanita) ± Mnz (monacita). Su geoquímica es levemente peraluminosa (A/CNK = 1.04 ± 0.04) con contenidos ligeramente elevados en CaO (1.25 ± 0.65%) y bajos contenidos en P_2O_5 (0.090 ± 0.060%). Sus relaciones de FeOt/FeOt+MgO son relativamente elevadas (0.88 ± 0.058). A nivel de elementos traza su contenido en Zr y Sr es variable (≈ 179 ± 86 ppm y ≈ 77 ± 59 ppm) y sus tierras raras muestran patrones normalizados con fraccionamiento moderado y fuertes anomalías negativas en Eu (González-Menéndez et al., 2017).

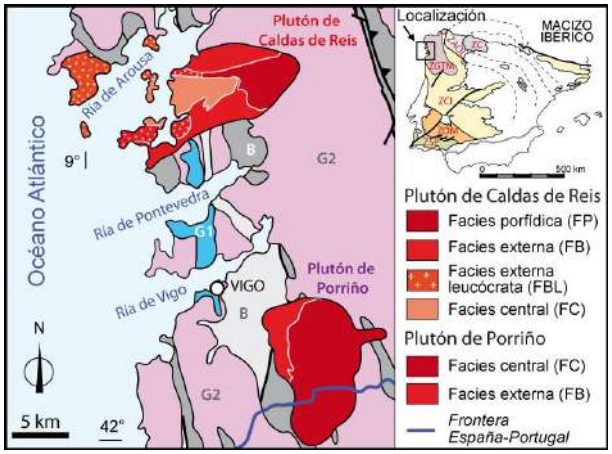


FIGURA 1. *Cartografía geológica simplificada de los plutones de Caldas de Reis (Cuesta, 1991) y Porriño, (González-Menéndez et al., 2017). G1 y G2: Granitoides variscos sintectónicos. B: Basamento ígneo-metamórfico. Se incluye la localización de los plutones estudiados y las. Zonas del Macizo Ibérico: Cantábrica (ZC), Asturoccidental-Leonesa (ZAOL), Galicia-Trás-os-Montes (ZGTM), Centroibérica (ZCI), Ossa-Morena (ZOM), Sudportuguesa (ZSP).*

METODOLOGÍA.

Los análisis isotópicos de Hf se han realizado en el Servicio de Geocronología y Geoquímica Isotópica-SGIker de la Universidad del País Vasco/EHU en circones con edades U–Pb determinadas mediante SHRIMP en el laboratorio IBERSIMS de la Universidad de Granada. Para el análisis de Hf se ha utilizado un espectrómetro de masas con multicolección (MC-ICP-MS) modelo Neptune de Thermo-Fisher Scientific acoplado a un sistema de ablación láser New Wave UP-213 con celda SuperCell. Se ha efectuado la ablación en modo estático con un diámetro de spot de 40 µm y un tiempo de integración de 50 s. Para la corrección de interferencias isobáricas entre Lu e Yb en la masa 176 se miden simultáneamente los isótopos ^{171}Yb, ^{173}Yb and ^{175}Lu. Los valores de ^{176}Yb y ^{176}Lu se calcularon utilizando las relaciones de ^{176}Yb/^{173}Yb 0.7964 (Amelin y Davis, 2005) y de ^{176}Lu/^{175}Lu 0.02656 (Patchett y Tatsumoto, 1980), teniendo en cuenta el fraccionamiento de masas instrumental para cada análisis individual. Las relaciones isotópicas de Yb se normalizaron a ^{173}Yb/^{171}Yb 1.13255 (Amelin y Davis, 2005) y las de Hf a ^{179}Hf/^{177}Hf 0.7325 utilizando una función exponencial para la corrección del fraccionamiento de masas (mass bias). Se ha asumido que el fraccionamiento del Lu es similar a la del Yb. Para el tratamiento de los datos con resolución temporal se ha utilizado el software Iolite 2.5 (Paton et al., 2011).

ISÓTOPOS DE Hf–Sr–Nd

Los valores de epsilon de Hf (EpHf) calculados para los circones de los plutones de Porriño y Caldas de Reis (Tabla I) han sido comparados con las relaciones isotópicas iniciales de ^{87}Sr/^{86}Sr (Sri) y con los valores de epsilon de Nd (EpNd) obtenidos en roca total (Fig. 2).

Plutón	Facies	Nº	EpHf	^{167}Lu/^{177}Hf	Sri	EpNd	GPa
Porriño	FC	18	1.985	0.001465	0.7051	-0.49	0.111
Porriño	FB	24	-0.75	0.001127	0.7102	-1.05	0.297
Caldas R.	FP	11	3.837	0.001480	0.7066	-1.76	0.106
Caldas R.	Ton	14	0.339	0.002265	0.7056	n.d.	0.011
Caldas R.	FB	11	0.249	0.000836	0.7087	-1.65	0.695
Caldas R.	FC	14	2.624	0.001197	0.7090	-3.86	0.243
Caldas R.	FBL	9	1.482	0.001337	0.7084	-1.32	0.161

TABLA I. *Valores (medianas) de epsilon de Hf (EpHf) y ^{167}Lu/^{177}Hf en circones; Sri (^{87}Sr/^{86}Sr inicial) y EpNd (epsilon de Nd) en roca total y presión (valores de mediana) en Gigapascales (GPa).*

En el plutón de Porriño (Fig. 1), la facies central (FC), constituida por un monzogranito metaluminoso–peraluminoso con Bt + Amp + Ttn, y que incluye cuerpos tonalíticos de diferente entidad, muestra valores medios positivos de EpHf (+1.99), valores bajos de Sri (0.7051) y elevados de EpNd (–0.49). En contraste, su facies externa (FB), formada por un granito biotítico + Aln y peraluminoso, presenta valores más negativos de EpHf (–0.75), relaciones de Sri elevadas (0.7102) y EpNd también relativamente elevado (–1.05) (Tabla I; Fig. 2).

El plutón de Caldas de Reis presenta varias facies (Fig. 1) de las cuales, las tonalitas (Ton) con Bt + Amp + Cpx (clinopiroxeno) + Aln + Ttn, y la facies porfídica (FP) que las engloba constituida por una granodiorita/monzogranito con Bt + Amp + Aln + Ttn, muestran valores mayoritariamente positivos de EpHf (+0.34; +3.84), valores bajos de Sri (0.7056; 0.7066) y moderadamente bajos de EpNd (–1.76; sin datos para las tonalitas). La facies central (FC), correspondiente a la subfacies de granodiorita/monzogranito biotítico + Ms ± Amp + Aln, presenta valores de EpHf mayormente positivos (+2.62), Sri moderado/alto (0.7089) y valores bajos de EpNd (–3.86). Las dos facies externas, monzogranito con Bt + Amp + Aln + Ttn (FB) y monzogranito/sienogranito con Bt + Ms + Aln ± Grt (FBL), tienen valores positivos de EpHf (+1.48; +0.25), Sri con valores moderados (0.7084; 0.7087) y valores de EpNd entre moderados y elevados (–1.65; –1.32) (Tabla I; Fig. 2).

Estos datos reflejan una amplia variedad de materiales fuente asociados a la formación de este tipo de magmas variscos con tipologías I o intermedias entre I y S (Hammerli et al., 2018). En los casos que combinan valores positivos de EpHf con valores bastante negativos de EpNd (≤ –1.5, –2) y

moderados/altos de Sri (≥ 0.708), la signatura mantélica inferida por los datos de EpHf se podría haber generado por transferencia isotópica directa, disolución–precipitación, desde circones heredados, con EpHf positivos, a magmáticos (Dahlquist et al., 2020), partiendo de protolitos corticales máfico–intermedios.

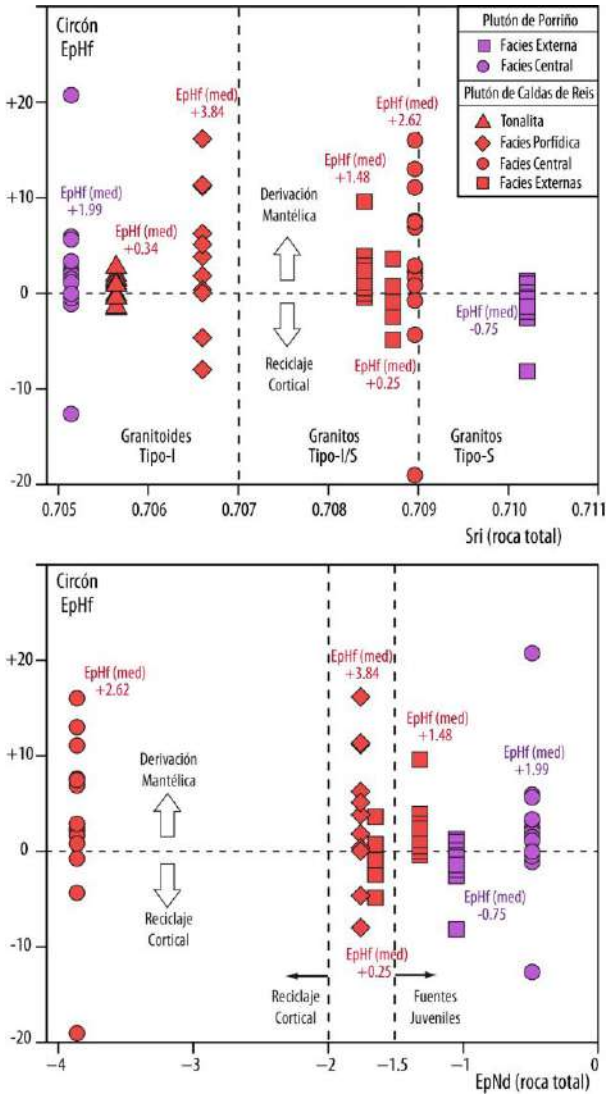


FIGURA 2. *Epsilon de Hf (EpHf) en circones frente al valor de Sri ($^{87}Sr/^{86}Sr$ inicial) y de epsilon de Nd (EpNd) en roca total. EpHf (med): valores de mediana.*

En el plutón de Porriño se pueden inferir dos rocas fuente, ambas relativamente juveniles aunque una de carácter más máfico y con posibles componentes mantélicos (Sri: 0.7051) y otra más metasedimentaria (Sri: 0.7102) aunque con características residuales (González-Menéndez et al., 2017). En el caso del plutón de Caldas de Reis, las rocas fuente pueden ser máficas, relativamente juveniles y con componentes mantélicos (tonalita y facies porfídica huésped) y mixtas entre máficas–metasedimentarias y relativamente recicladas en la corteza (facies central biotítica) o más juveniles (facies externas).

Esta variedad composicional de los protolitos ha sido también inferida en el plutón de Caldas de Reis (Cuesta, 1991) en base a isótopos de oxígeno ($^{18}O/^{16}O$), isótopos Rb–Sr, clinopiroxeno de alta T^{a} en algunas facies, que apoyan una fusión cortical dominante de materiales fuente metasedimentarios y metaígneos y una participación reducida de componentes mantélicos en la formación de estos magmas.

ESTIMACIÓN DE PRESIÓN: Lu/Hf EN CIRCONES

Las relaciones $^{167}Lu/^{177}Hf$ en circones dependen de, i) la cristalización contemporánea de granate, más frecuente en los dominios de formación de los magmas y condiciones de corteza engrosada (captación preferente de Lu) y, ii) de la saturación y fraccionamiento de circón (captación preferente de Hf) que puede darse a lo largo de toda la evolución de los magmas en la corteza, desde su zona de formación, ascenso y emplazamiento (Moreira et al., 2023).

La aplicación de la ecuación empírica entre los datos de $^{167}Lu/^{177}Hf$ en circones y la presión (Moreira et al., 2023) para los circones de diferentes facies de los granitos postectónicos variscos de Porriño y Caldas de Reis, muestran presiones relativamente bajas, entre 1.9 y 6.9 kbar (Fig. 3). Algunos outliers se sitúan entre los ≈ 7.5–15 kbar para las rocas graníticas y entre los ≈ 20–25 kbar para las rocas tonalíticas.

Estas presiones indican que el principal proceso que afectó a la química de los circones y en concreto a su relación $^{167}Lu/^{177}Hf$ fue su saturación y fraccionamiento a lo largo del ascenso y emplazamiento de los magmas, aumentando esta relación isotópica lo que se transcribe en menores valores de presión calculados. La cristalización de granate en profundidad fue probablemente muy escasa, lo cual evidencia unas condiciones de formación de magma en una corteza relativamente adelgazada. Los outliers de $^{167}Lu/^{177}Hf$, con valores calculados de presión en torno a 7.5–15 kbar (Fig. 3), podrían reflejar en parte esas condiciones.

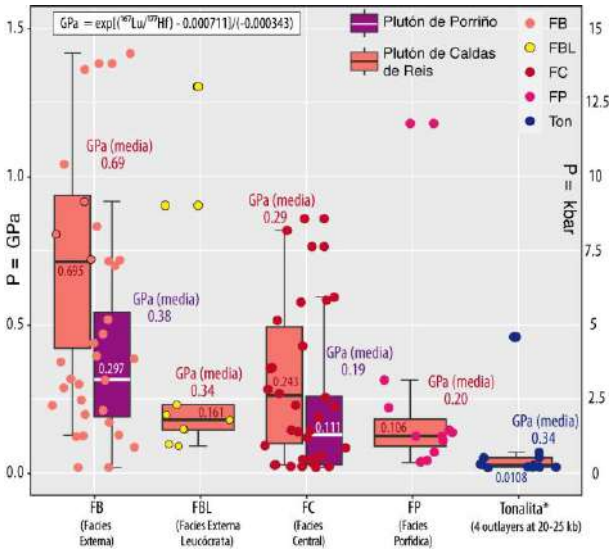


FIGURA 3. *Presiones calculadas a partir de la relación $^{167}Lu/^{177}Hf$ en circones. Se indican los valores medios de presión en cada facies y dentro de los recuadros los valores de las medianas en Gigapascales (GPa).*

Las presiones relativamente bajas de 1.9 y 6.9 kbar obtenidas en los granitos postectónicos de Porriño y Caldas de Reis en base a la relación $^{167}Lu/^{177}Hf$ en circones, son coherentes con las presiones proporcionadas por la composición de los anfíboles de 4.7–5 kbar, para las condiciones magmáticas iniciales, y en torno a 2 kbar para el final de la etapa magmática en el plutón de Caldas de Reis (Cuesta, 1991).

CONCLUSIONES

Los granitos variscos postectónicos del noroeste peninsular, representados por los plutones de Porriño y Caldas de Reis, muestran una composición isotópica de Hf–Sr–Nd indicativa de una considerable variabilidad composicional en sus protolitos: mixtos metaígneos (entre máficos e intermedios) – metasedimentarios y con variables grados de reciclaje cortical. Las contribuciones mantélicas más directas (más juveniles) se consideran menores aunque pueden representar un componente dentro de algunas facies de estos granitos.

La profundidad de formación estimada de estos magmas, inferida a partir de las relaciones Lu/Hf en circones, es relativamente somera (corteza media-superior) lo que estaría de acuerdo con un adelgazamiento cortical y exhumación avanzada del orógeno varisco en este periodo geológico.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Proyecto GEO-TEC (FC-GRUPIN-IDI/2018/000216 y AYUD/2021/51293) del Gobierno de Asturias y fondos FEDER. Agradecemos el apoyo técnico prestado por el laboratorio SGIker de la UPV/EHU. Este trabajo es la publicación Nº 108 de IBERSIMS.

REFERENCIAS

Amelin, Y. y Davis, W.J. (2005): Geochemical test for branching decay of ^{176}Lu. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69 (2): 465-473.

Cuesta, A. (1991): *Petrología granítica del plutón de Caldas de Reis (Pontevedra, España). Estructura, mineralogía, geoquímica y petrogénesis*. Laboratorio Xeoloxico de Laxe, Serie Nova Terra, 5, 363 p.

Cuesta, A. y Gallastegui, G. (2004): Magmatismo de la Zona Centroibérica: Galicia occidental. En: *Geología de España* (J.A. Vera, ed.). SGE-IGME. Madrid, 96-100.

Dahlquist, J.A., Galindo, C., Morales Cámera, M.M., Moreno, J.A., Alasino, P.H., Basei, M.A.S. y Macchioli Grande, M. (2020): A combined Hf and whole-rock Nd and Sr isotopes study of Carboniferous A-type granites, Sierras Pampeanas of Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 100, 102545.

González-Menéndez, L., Gallastegui, G., Cuesta, A., Montero, P., Rubio-Ordóñez, A., Molina, J.F. y Bea, F. (2017): Petrology of the Porriño late-Variscan pluton from NW Iberia. A model for post-tectonic plutons in collisional settings. *Geologica Acta*, 15 (4): 283-304.

Hammerli, J., Kemp, A.I.S., Shimura, T., Vervoort, J.D., Daniel, EIMF y Dunkley, D.J. (2018): Generation of I-type granitic rocks by melting of heterogenous lower crust. *Geology*, 46 (10): 907-910.

Kemp, I.A.S, Hawkesworth, C.J., Foster, G.L., Paterson B.A., Woodhead, J.D., Hergt, J.M., Gray, C.M. y Whitehouse, M.J. (2007): Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. *Science*, 315: 980-983.

Moreira, H., Buzenchi, A., Hawksworth,C.J. y Dhuime, B. (2023): Plumbing the depths of magma crystallization using $^{176}Lu/^{177}Hf$ in zircon as a pressure proxy. *Geology*, 51: 233-237.

Patchett, P.J. y Tatsumoto, M. (1980): A routine high-precision method for Lu-Hf isotope geochemistry and chronology. *Contributions to Mineralogy and Petrolology*, 75: 263-267.

Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J. y Hergt, J. (2011): Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26 (12): 2508-2518.

Modelización geoquímica de procesos de fusión/refertilización en condiciones hidratadas y anhidras en rocas ultramáficas de la Ofiolita de Careón (NW del Macizo Ibérico)

Geochemical models for hydrous and anhydrous melting/refertilization in ultramafic rocks of the Careón Ophiolite (NW Iberian Massif)

G. Iglesias[1], A. García-Casco[2], R. Arenas[1], I. Novo-Fernández[1,2] and S. Sánchez Martinez[1]

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología e Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. gabigles@ucm.es, rarenas@ucm.es, s.sanchez@geo.ucm.es, inovo@ucm.es.
2 Dpto. de Mineralogía y Petrología and Inst. And. Ciencias Tierra (UGR, CSIC), Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain.agcasco@ugr.es, inovo@ugr.es.

Palabras clave: Modelo de fusión/refertilización, peridotitas, ofiolitas, NW del Macizo Ibérico.

Resumen

Los modelos geoquímicos que simulan las concentraciones de elementos traza en roca total en rocas ultramáficas han sido ampliamente desarrollados en las últimas décadas para explicar los procesos de fusión/refertilización experimentados por el manto litosférico. Hemos desarrollado una variedad de modelos para poder explicar las concentraciones medidas de REE en roca total, en una de las ofiolitas mejor preservadas del Macizo Ibérico (la Ofiolita de Careón). Nuestros modelos se basan en procesos de fusión fraccionada no modal y consideran la naturaleza geoquímica y mineralógica de la fuente, las condiciones P-T y la eventual presencia de un fluido acuoso durante la fusión. La refertilización fue simulada por medio de un balance de masas de la reacción de mezcla entre residuos con distintos grados de fusión y fundidos derivados de bajos grados de fusión (F=1%). Nuestros resultados explican satisfactoriamente las pendientes positivas en MREE-HREE de las muestras por medio un proceso de fusión en dos etapas que involucra varias fuentes en facies de la espinela. La primera etapa de fusión esta definida por bajos grados de fusión parcial bajo condiciones anhidras, mientras que la segunda etapa es consistente con altos grados de fusión parcial bajo condiciones hidratadas. El patrón de refertilización en LREE de todas las muestras no puede ser completamente explicado por nuestros resultados, lo cual sugiere que algunos elementos pudieron ser afectados por procesos posteriores (serpentinización o metamorfismo progrado) o que el proceso de refertilización es más complejo de lo que asumimos en el modelo.

Abstract

The geochemical models that simulate whole-rock trace-element concentrations in ultramafic rocks have been thoroughly developed in the last decades to explain melting/refertilization processes undergone by the lithospheric mantle. We have developed a variety of models to explain measured whole-rock REE concentrations in one of the best-preserved ophiolites of the Iberian Massif (Careón Ophiolite). Our models are based in non-modal factional melting and consider the geochemical and mineralogical nature of the source, the P-T conditions and the eventual presence of hydrous fluid during melting. Refertilization was simulated by a mass-balance mixing reaction between residues partially melted to variable extent and melts derived from low degrees of melting (F=1%). Our results satisfactorily explain the positive MREE-HREE slopes of the samples by a two-step melting process of several sources under the spinel facies conditions. The first step is defined by low rates of partial melting under anhydrous conditions, while the second step is consistent with higher degrees of partial melting under hydrous conditions. Refertilized LREE-patterns of all samples cannot be fully explained by our model results, suggesting that some elements were probably affected by post high-temperature processes (serpentinization or prograde metamorphism) or that refertilization is more complex than assumed in the model.

Interacción fluido-fundido-roca en la corteza profunda: evidencia textural y mineralógica

Fluid-melt-rock interaction in the deep crust: textural and mineralogical evidence

J. F. Molina[1], P. Montero[1], F. Bea[1], F. Haissen[2], A. Cambeses[1], M. M. Repczynska[1], K. Itano[1], L. Barcos[1], I. Novo-Fernández[1], N. Pujol-Solá[1] y A. García-Casco[1,3]

1: Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Spain. jfmolina@ugr.es, pmontero@ugr.es, fbea@ugr.es, aitorc@ugr.es, maria.repczynska@ugr.es, itano@correos.ugr.es, leticia_barcos@ugr.es, inovo@ugr.es, npujolsola@ugr.es, agcasco@ugr.es
2: Département de Géologie, Université Hassan II de Casablanca, Morocco. faouziya.haissen@gmail.com
3: Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), Spain

Palabras clave: interacción fluido-fundido-roca, reemplazamiento por disolución-precipitación

Resumen

Las rocas máficas granulitizadas del Complejo Metamáfico de Adrar-Suttuf (Macizo de Oulad Dlim, Sáhara Occidental) representan cuerpos magmáticos intruidos en la base de la corteza durante un rifting Ediacárico (Bea et al., 2020). Sus texturas registran la transición de la etapa magmática a metamórfica de UHT, caracterizada por la generación de agregados granoblásticos con ángulos interfaciales tendentes a la configuración de equilibrio (Molina et al., 2024). A éstas se le superpusieron otras texturas generadas por la interacción de las rocas con fluidos. Tanto fluidos como fundidos pueden desencadenar reacciones de reemplazamiento mediante procesos acoplados de disolución-precipitación, creándose microporos rellenos con la fase móvil reactiva correspondiente (e.g., Punis, 2009). Las granulitas máficas y charnockitas del complejo muestran evidencias de reacciones de descomposición de, respectivamente, *Ti-pargasita* (Ti-Prg => Cpx + Opx + Pl) y *Ti-biotita* (Ti-Bio => Opx + Kfs) que requieren una fase móvil que facilite la dispersión del Ti y otros componentes de los sitios de reacción. La aparición de microporos en la plagioclasa en estos sitios de reacción sugiere la participación de fluidos, en vez de fundidos.

Abstract

The granulitised mafic rocks from the Adrar-Suttuf Metamafic Complex (Oulad Dlim Massif, Western Sahara) represent magmatic bodies intruded at the base of the crust during an Ediacaran rifting (Bea et al., 2020). Their textures record a magmatic to UHT-metamorphic transition characterised by the appearance of granoblastic aggregates with interfacial angles tending towards the equilibrium configuration. These textures were overprinted by other ones produced by fluid-rock interaction processes. Both fluids and melts can trigger replacement reactions by coupled dissolution-precipitation processes, thus creating micropores filled with the respective reactive mobile phase (e.g., Putnis, 2009). The mafic granulites and charnockites from the complex show evidence for breakdown reactions of, respectively, *Ti-pargasite* (Ti-Prg => Cpx + Opx + Pl) and *Ti-biotite* (Ti-Bio => Opx + Kfs) that require a mobile phase to promote the dispersion of Ti and other components from the reaction sites. Appearance of micropores in plagioclase at these reaction sites witnesses the involvement of fluids, instead of melts.

Referencias

Molina, J. F., Bea, F., Montero, P., Haissen, F., Barcos, L., Cambesesa, A., Morales, I., Repczynska, M.M, Othman, S., García-Casco, A. (2024). UHT-granulite- and amphibolite-facies metamorphism in the Ediacaran Adrar-Suttuf Metamafic Complex, NW Margin of the West African Craton (Southern Morocco). Journal of Petrology (acpetado).

Bea, F., Montero, P., Haissen, F., Molina, J. F., Lodeiro, G., F., Mouttaqi, A., Kuiper, Y. D. & Chaib, M. (2020). The Archean to Late-Paleozoic Architecture of the Oulad Dlim massif, the main Gondwanan indenter during the collision with Laurentia. *Earth-Science Reviews* 208, 103273.

Putnis, A. (2009). Mineral replacement reactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 70, 87-124.

Desmezcla de restitas y asimilación de metasedimentos biotíticos en el monzogranito de Navahonda, Batolito de la Sierra Norte de Sevilla

Restite unmixing and assimilation of biotite rich metasediments in the Navahonda monzogranite, Batolito de la Sierra Norte de Sevilla

J.A. Moreno[1,2], K. Domínguez[1], A. Castro[3], J.D. de la Rosa[1,2],

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071 Huelva.
juanantonio.moreno@dct.uhu.es; kayla.dominguez348@alu.uhu.es; jesus@uhu.es
2 Centro de Investigación en Química Sostenible (CIQSO), Universidad de Huelva, 21071 Huelva.
3 Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 28006 Madrid.
antonio.castro@csic.es

Palabras clave: desmezcla de restitas, asimilación, monzogranito con granate, enclave, corneana**.**

Resumen

El monzogranito de Navahonda forma parte del Batolito de la Sierra Norte de Sevilla (BSNS) y constituye un macizo alargado de dirección E-W de 3 km de longitud, que intruye en metasedimentos de la fm Ronquillo originando metamorfismo de contacto en facies cordierita y andalucita. Está formado principalmente por un monzogranito leucocrático con granate que puede presentar enclaves de fayalita-grunerita-annita (± magnetita y granate), y en menor medida por una granodiorita biotítica (sin granate) con enclaves microgranulares tonalíticos y xenolitos biotíticos de corneanas que pueden presentar un borde de biotita de tamaño de grano medio-grueso. Se trata de granitoides peraluminosos, calcoalcalinos de alto K.

Los enclaves de Fa-Gru-Ann se interpretan como restitas de granulitas del área fuente (9-30 km), ya que esta asociación mineral se atribuye a metamorfismo de alto grado en formaciones ricas en Fe, tipo Iron-Formations, las cuales no han sido descritas en la Zona SudPortuguesa (ZSP).

Cálculos termobarométricos indican un aumento de temperatura de núcleo a borde de los xenolitos de corneanas, alcanzando el equilibrio térmico con el monzogranito (ca. 700 ºC). Esto provocó la saturación en Fe-Mg procedente de la difusión química de dichos componentes desde los enclaves de corneanas al magma, favoreciendo la formación de filosilicatos. Las altas tasas de cristalización de biotita produjeron un enriquecimiento en el granito biotítico de la razón Ce_N/La_N (leucogranito: 3.4; facies biotítica: 6.36), y mayores valores de ciertos elementos (e.g., Ni, Cs, Rb, Th Zr, Hf, Nb, HREE).

Abstract

The Navahonda monzogranite is part of the BSNS and constitutes an E-W elongated massif of 3 km long that intrudes metasediments of the Ronquillo Fm, generating contact metamorphism under cordierite and andalusite facies (Simancas, 1983). It is mainly formed of a garnet monzogranite with occasional fayalite-grunerite-annite (± magnetite and garnet) enclaves, and a less abundant biotite granodiorite (no garnet) with tonalitic microgranular enclaves and biotite rich hornfels xenoliths that can show a rim of medium to coarse-grained biotite. They are peraluminous, calc-alkaline high K granitoids.

The Fa-Gru-Ann enclaves are interpreted as granulite restites from the source region (9-30 km), since this mineral assemblage is associated to high grade metamorphism of Fe-rich formations, such as the banded iron-formations, unknown in the ZSP.

Thermobarometry shows an increase in T from the core to the edge of the xenoliths, reaching thermal equilibrium with the monzogranite (ca. 700 ºC). This caused Fe-Mg saturation from the chemical diffusion of those components from the xenoliths to the magma, favoring the formation of phyllosilicates. The high rates of biotite crystallization produced an enrichment in Ce_N/La_N (leucogranite: 3.4; biotite granite: 6.36) and higher contents in other elements (e.g., Ni, Cs, Rb, Th Zr, Hf, Nb, HREE) in the biotite granite.

Petrografía, composición y origen de los granófidos del dique de gabros toleíticos de Messejana-Plasencia

Petrography, composition and origin of granophyres from the Messejana-Plasencia tholeiitic mafic dyke

D. Orejana[1], C. Villaseca[1,2], E. Losantos[3] y P. Andonaegui[1]

1 Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense de Madrid, José Antonio Novais 12. 28040. Madrid. dorejana@ucm.es; granito@ucm.es; andonaeg@ucm.es
2 Instituto de Geociencias, IGEO (UCM, CSIC), Severo Ochoa 7, 4ª planta. 28040. Madrid. granito@ucm.es
3 Departamento de Observación de la Tierra y Ciencias del Espacio (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), Torrejón de Ardoz, Madrid. (Spain); elosgui@inta.es

Resumen: El dique de gabros toleíticos Messejana-Plasencia presenta intercrecimientos de cuarzo y feldespato alcalino intersticial en la matriz de los gabros, así como vénulas y diques de granófidos. Su composición geoquímica difiere de los fundidos graníticos anatécticos experimentales. La ausencia en el dique de rocas de composición intermedia indica que los granófidos son fundidos félsicos, probablemente generados a raíz de un proceso de inmiscibilidad líquida durante los estadios finales de cristalización del líquido máfico, y segregados posteriormente hasta formar venas y diques. Su composición isotópica, más radiogénica en Sr y Nd que la de los gabros, y la presencia de xenocristales de circón de edad Varisca, apuntan a un fenómeno de asimilación de rocas corticales por parte del magma máfico.

Palabras clave: Granófidos, inmiscibilidad líquida, magmas toleíticos, dique Messejana-Plasencia.

Abstract: *The tholeiitic Messejana-Plasencia mafic dyke shows interstitial quartz-alkali feldspar intergrowth within the gabbros groundmass, as well as granophyric veins and dykes. Their geochemical composition is not compatible with that of experimental anatectic granitic melts. The lack of rocks of intermediate composition implies that granophyres are felsic magmas probably formed by liquid immiscibility during the last stages of mafic magma crystallization, and subsequently segregated in the form of veins and dykes. Their more radiogenic isotopic composition with respect to that of the gabbros and the presence of Variscan zircon xenocrysts, suggests that the mafic magmas assimilated crustal rocks.*

Key words: *Granophyres, liquid immiscibility, tholeiitic magmas, Messejana-Plasencia great dyke.*

INTRODUCCIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

El dique de Messejana-Plasencia (DMP), constituido por gabros toleíticos, puede considerarse uno de los diques más grandes del mundo, dada su longitud aproximada de 630 km (Fig. 1), incluyendo su prolongación bajo la cuenca sedimentaria del río Duero. Se formó por la intrusión de diversos pulsos de magma en el Macizo Ibérico a comienzos del Jurásico (~200 Ma; Dunn et al., 1998) y se enmarca en el contexto de la Provincia Magmática del Atlántico Central (CAMP por sus siglas en inglés), donde se incluyen multitud de enjambres de diques máficos radiales asociados a la apertura del sector central del Océano Atlántico.

Estudios previos de la geoquímica de esta intrusión proponen como fuente de los fundidos un manto litosférico subcontinental enriquecido, con influencia de un componente cortical reciclado dentro del manto o asimilado durante el ascenso del magma (Cebriá et al., 2003; Callegaro et al., 2014). El aspecto menos estudiado de esta intrusión son los segregados félsicos granofídicos que pueden encontrarse en el dique, principalmente en su sector NE. Se trata de cuerpos de tamaño muy variado, constituidos por cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y biotita, intersticiales dentro del entramado mineral de los gabros, o formando venas de espesor centimétrico o diques con una anchura métrica (excepcionalmente hasta 15 m en la localidad de Sanchorreja).

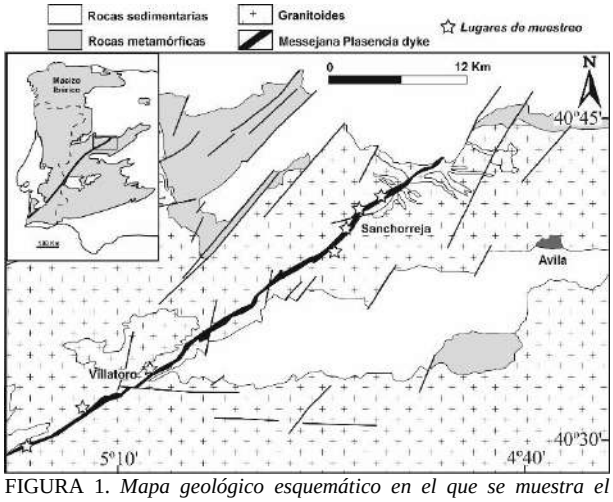


FIGURA 1. *Mapa geológico esquemático en el que se muestra el segmento NE del dique de Messejana-Plasencia y los lugares donde se han muestreado segregados y diques granofídicos.*

En este trabajo se presentan datos de química de roca total de estos granófidos (elementos mayores, traza y relaciones isotópicas de Sr-Nd) con el objetivo de interpretar cuál es el origen de estos fundidos félsicos y qué relación guardan con los gabros que los incluyen.

PETROGRAFÍA

Los granófidos aparecen dentro de los gabros del dique en muy diferentes escalas. Pueden dar lugar a segregados en forma de venas irregulares de pocos centímetros de espesor que permean dentro del gabro, o diques de tamaño métrico (mayoritariamente hasta 1 m) y contacto neto (Fig. 2A-B). El caso más llamativo es un dique de unos 15 m de espesor que aflora en Sanchorreja (Fig. 1). Pero también se encuentran con cierta abundancia rellenando intersticios dejados por los minerales principales del gabro, donde aparecen intercrecimientos de cuarzo y albita o feldespato alcalino (Fig. 2C).

En los mismos afloramientos donde los gabros presentan estos rellenos intersticiales, se pueden encontrar venas y diques de granófidos que poseen textura microgranular y granofídica, con intercrecimiento de cuarzo-feldespato alcalino entre cristales de cuarzo y plagioclasa (albita) (Fig. 2D). Las principales fases accesorias son biotita, esfena, apatito y turmalina. Son frecuentes las cavidades miarolíticas rellenas de prehnita, epidota, clorita y minerales del grupo de la arcilla. Además, se han encontrado xenocristales de circón, con hábito idiomorfo (mayoritariamente prismas bipiramidales) y textura interna de zonado oscilatorio. Las edades de estos circones (no se muestran en este trabajo) se encuentran en el rango 290-689 Ma, incluyendo bordes y núcleos heredados.

GEOQUÍMICA

La composición química de elementos mayores y trazas de los granófidos se caracteriza por elevados contenidos de SiO_2 (70-75 wt%) y elementos litófilos como K, Rb, Ba, Th y U, junto con valores bajos de MgO (< 1.8 wt%), Fe_2O_3 (< 2.9 wt%), TiO_2 (< 0.33 wt%), CaO (< 0.71 wt%) y de elementos traza como Zr, Hf, Nb, Ta y REE (Fig. 3). Los espectros de elementos traza normalizados al Condrito o al Manto Primitivo (no se muestran) reflejan un enriquecimiento relativo en los elementos litófilos arriba señalados, y anomalías negativas en Eu, Sr, Nb y Ti.

Al comparar la composición de los granófidos con la evolución química que definen los gabros del dique de Messejana-Plasencia, queda de manifiesto la presencia de un vacío composicional entre ambos grupos, principalmente en el contenido en SiO_2, Fe_2O_3, Rb y Sr, sin términos intermedios (Fig. 3). También se observa un cambio brusco en el patrón evolutivo, si se considera que los granófidos pudiesen ser el resultado de un proceso de diferenciación por cristalización fraccionada a partir del fundido máfico. Al comparar los granófidos con los granitos Variscos del Sistema Central Español (SCE), se aprecian similitudes en muchos elementos, pero notables diferencias en otros, como es el caso de los elevados contenidos de K_2O y bajos de Na_2O, Sr, Zr, Th, U y REE (Fig. 3).

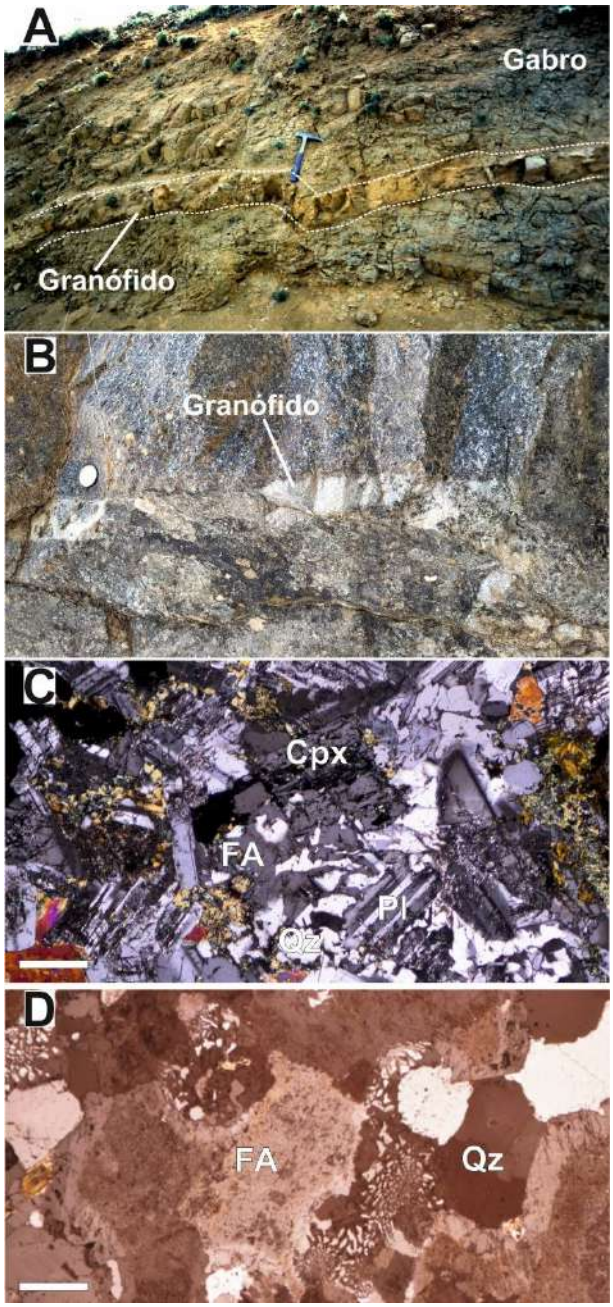


FIGURA 2. *(A-B) Imágenes de afloramiento de diques de granófido. (C-D) Imágenes de microscopio óptico de zonas intersticiales con intercrecimiento granofídico Qz-Afs (C) y textura de un granófido (D). Cpx: clinopiroxeno, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo y FA: feldespato alcalino. La barra blanca en las imágenes C y D representa 300 μm.*

Las relaciones isotópicas de Sr y Nd de los granófidos se caracterizan por ser muy heterogéneas en $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.708292–0.717215), homogéneas en cuanto a $^{143}Nd/^{144}Nd$ (0.512269-0.512395; εNd en el rango -3.7 a -5.8), y por encontrarse en una posición intermedia entre los valores más empobrecidos isotópicamente de los gabros del DMP y los más enriquecidos de los granitos del SCE (Fig. 4).

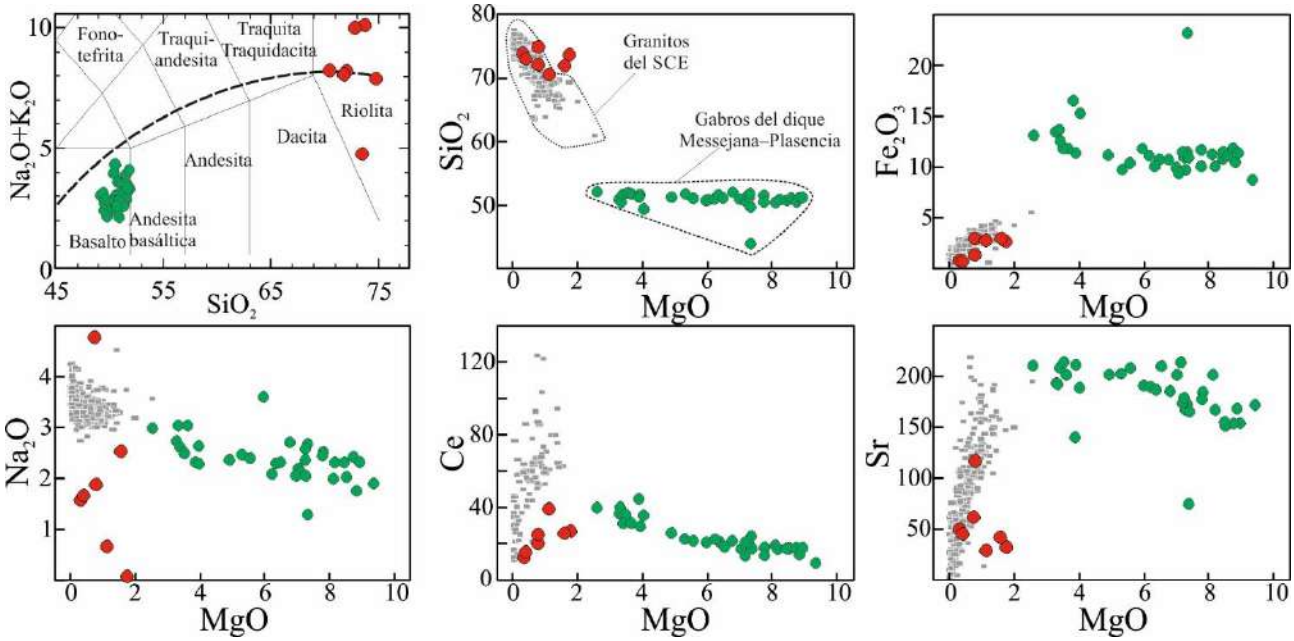


FIGURA 3. *Composición química de elementos mayores (wt%) y traza (ppm) de los granófidos y gabros del DMP. Los datos de los gabros están tomados de Cebriá et al. (2003) y Villaseca et al. (2022). La composición de los granitos del SCE (Villaseca et al., 1998) también se proyecta a modo de comparación.*

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presencia de rocas félsicas en un porcentaje relativamente bajo en sistemas magmáticos toleíticos, coexistiendo con gabros o basaltos, está ampliamente documentada (e.g., Philpotts, 1982; Marsh, 1996). Estos fundidos evolucionados podrían estar relacionados genéticamente con las rocas máficas que los albergan, o podrían haberse formado por fusión de rocas de la corteza y ser intrusivos en los gabros donde aparecen.

La composición química de los granófidos del DMP no se parece a la que poseen los fundidos anatécticos graníticos, debido a los valores generalmente mayores de K (elevado valor de *Or* normativa). De igual modo, muestran diferencias significativas respecto a la composición de los granitos del SCE: p. ej., menores contenidos en Na o LREE (Fig. 3). Estas discrepancias apuntan a la posibilidad de que el origen de los granófidos esté relacionado con el fundido máfico.

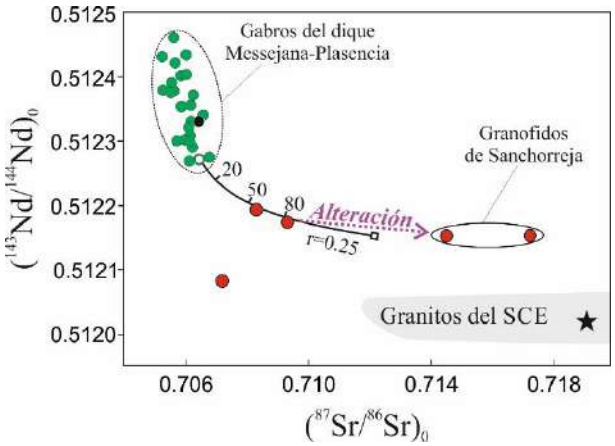


FIGURA 4. *Composición isotópica (Sr-Nd) de los granófidos y gabros del DMP. Los datos de los gabros están tomados de Cebriá et al. (2003) y Villaseca et al. (2022). La línea representa un modelo de AFC (ver detalles en el texto) donde la estrella indica la composición del contaminante.*

Las relaciones texturales y de afloramiento de los cuerpos félsicos del DMP refuerzan la conexión genética entre gabros y granófidos, pues estos aparecen en un mismo afloramiento en forma de rellenos intersticiales de tamaño milimétrico, venas de trazado irregular que permean a través de las rocas máficas y diques de mayor entidad (espesor centimétrico a métrico) (Fig. 2). Nunca se los ve fuera del dique principal de gabros. Cuerpos granofídicos muy similares han sido descritos también en otras intrusiones gabroideas de la CAMP (Kontak et al., 2002; Callegaro et al., 2014). De acuerdo con su petrografía, los granófidos podrían considerarse fundidos residuales extraídos tras la compactación de los gabros, produciéndose su segregación en forma de venas o diques de mayor entidad.

El proceso de diferenciación magmática que puede llevar a la formación de fundidos félsicos a partir de un magma parental máfico no resulta siempre evidente, necesitando frecuentemente un elevado porcentaje de cristalización fraccionada. En el caso de los granófidos del DMP, dicho proceso ha de explicar también la ausencia de rocas de composición intermedia entre los gabros y los granófidos (*Daly gap*). En otras intrusiones, este vacío composicional se ha justificado con la cinética del proceso de evolución magmática, la presencia de barreras de viscosidad-densidad y otros factores relacionados con la dinámica de la cámara magmática (e.g., Geist et al., 1995; Dufek y Bachmann, 2010). Sin embargo, la presencia de microagregados granofídicos en la matriz mineral del gabro del DMP implica que la diferenciación ocurre *in situ* en el dique, una vez se ha producido su intrusión, en lugar de ser fundidos intrusivos a partir de una cámara magmática más profunda. La estrecha asociación entre los microagregados intersticiales, vénulas y diques félsicos a nivel de afloramiento implica que un proceso clásico de cristalización fraccionada no puede explicar la generación de los granófidos en el DMP.

El *Daly gap* se ha interpretado también como el resultado de un proceso de inmiscibilidad líquida en sistemas toleíticos, que conllevaría la segregación, a partir de un líquido máfico, de fundidos ricos en sílice, al mismo tiempo que otros ricos en Fe (e.g., Charlier et al., 2013). Este hecho ha quedado de manifiesto en diferentes estudios experimentales, como se muestra en la Figura 5. En estos diagramas, los granófidos del DMP se proyectan junto al campo de los líquidos inmiscibles ricos en sílice, mientras que los gabros presentan una composición intermedia entre dichos fundidos y el campo de líquidos ricos en Fe, coincidiendo con la composición de lavas máficas de provincias magmáticas toleíticas (Fig. 5). La escasez de términos máficos ricos en Fe entre las muestras analizadas del dique (a excepción de la muestra 103329), podría ser el resultado de un inframuestreo de dichos términos, aunque los experimentos sugieren que la productividad de líquidos ricos en Fe durante el proceso de inmiscibilidad líquida es muy baja (Charlier et al., 2013).

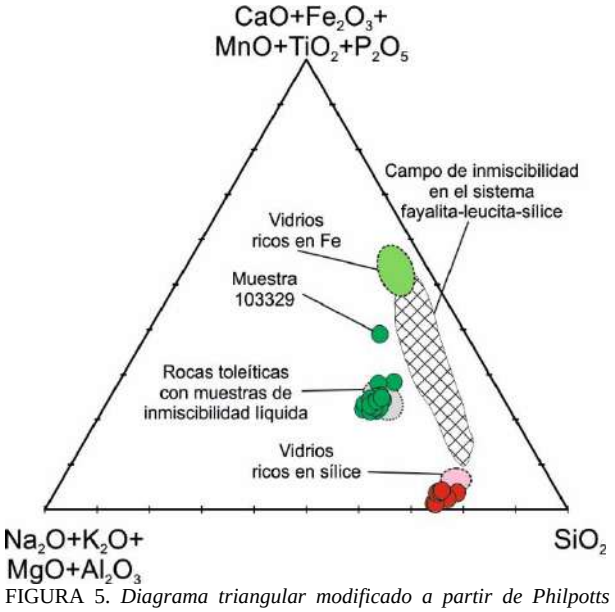


FIGURA 5. *Diagrama triangular modificado a partir de Philpotts (1982) donde se ha proyectado la composición de los gabros y granófidos del DMP, así como los campos de inmiscibilidad en sistemas magmáticos toleíticos. Los datos de los gabros están tomados de Cebriá et al. (2003) y Villaseca et al. (2022).*

La marcada diferencia entre la composición isotópica de gabros y granófidos del DMP (Fig. 4), junto con la presencia en los granófidos de circones similares en textura y edad a los de los granitos Variscos del SCE, parece indicar cierto grado de contaminación con rocas de la corteza. Dicha contaminación debió de ocurrir en el magma máfico, pues los diques granofídicos no están nunca en contacto directo con la roca encajante. En la Figura 4 se muestra un modelo de Asimilación y Fraccionamiento Cristalino (AFC), realizado para un valor de asimilación/fraccionamiento (r) de 0.25, que parte de la composición de los gabros más evolucionados y usa un material contaminante de composición similar a la de los granitos Variscos del SCE. El modelo se ajusta bien a la composición de los granófidos con valores más bajos de Sr radiogénico e implicaría fraccionamiento de plagioclasa (40%), clinopiroxeno (50%) y ortopiroxeno (10%), y porcentajes de asimilación de hasta un 21%. Sin embargo, los granófidos del sector de Sanchorreja poseen valores de $^{87}Sr/^{86}Sr$ que el modelo no alcanza a explicar (Fig. 4). Estos valores mayores de Sr radiogénico podrían estar relacionados con la alteración causada por la infiltración de fluidos hidrotermales en las miarolas de estos granófidos (Walraven et al., 1990).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto PID2020-115980 GB-I00.

REFERENCIAS

Callegaro, S., Rapaille, C., Marzoli, A., Bertrand, H., Chiaradia, M., Reisberg, L., Bellieni, G., Martins, L., Madeira, J., Mata, J., Youbi, N., De Min, A., Azevedo, M.R. y Bensalah, M.K. (2014): Enriched mantle source for the Central Atlantic magmatic province: New supporting evidence from southwestern Europe. *Lithos*, 188: 15-32.

Cebriá, J.M., López-Ruiz, J., Doblas, M., Martins, L.T. y Munha, J. (2003): Geochemistry of the Early Jurassic Messejana-Plasencia dyke (Portugal-Spain); Implications on the Origin of the Central Atlantic Magmatic Province. *Journal of Petrology*, 44, 547-568.

Charlier, B., Namur, O. y Grove, T.L. Compositional and kinetic controls on liquid immiscibility in ferrobasalt-rhyolite volcanic and plutonic series. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 113, 79-93.

Dunn, A.M., Reynolds, P.H., Clarke, D.B. y Ugidos, J.M. (1998): A comparison of the age and composition of the Sherburne Dyke, Nova Scotia, and the Messejana Dyke, Spain. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35: 1110-1115.

Kontak, D.J., De Young, M.Y.D. y Dostal, J. (2002): Late-stage crystallization history of the Jurassic North Mountain Basalt, Nova Scotia, Canada. I. Textural and chemical evidence for pervasive development of silicate-liquid immiscibility. *Canadian Mineralogist*, 40: 1287-1311.

Marsh, B.D. (1996): Solidification fronts and magmatic evolution. *Mineralogical Magazine*, 60: 5-40.

Philpotts, A.R. (1982): Composition of immiscible liquids in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80, 201-218.

Villaseca, C., Barbero, L. y Rogers, G. (1998): Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) arguments. *Lithos*, 43, 55-79.

Villaseca, C., Orejana, D., Higueras, P., Pérez-Soba, C., García Serrano, J. y Lorenzo, S. (2022): The evolution of the subcontinental mantle beneath the Central Iberian Zone: Geochemical tracking of its mafic magmatism from the Neoproterozoic to the Cenozoic. *Earth Science Reviews*, 228, 103997.

Walraven, F., Strydom, J.H. y Strydom, N. (1990): Rb–Sr open-system behaviour and its application as a pathfinder for Sn mineralisation in granites of the Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 37, 333-350.

Granitos y pegmatitas de metales raros: problemas sobre su origen y posibles soluciones

Rare-metal granites and pegmatites: problems with their origin and possible solutions

M. Pichavant

Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), Orléans, France. michel.pichavant@cnrs-orleans.fr

Palabras clave: Rare-metal granites, genetic models, crustal melting, crystal fractionation

Resumen

Los granitos y pegmatitas altamente evolucionados se encuentran en todo el cinturón Varisco, desde Iberia, Bretaña, Cornualles, el Macizo Central francés hasta el Macizo de Bohemia. Forman yacimientos de Li, Be, Sn, W, Nb, Ta, Cs, o están espacialmente asociados a ellos, y se considera que desempeñan un papel importante en la secuencia de procesos de formación de minerales. El interés actual por los metales raros y críticos subraya la necesidad de establecer modelos genéticos para estos granitos altamente especializados geoquímicamente. Sin embargo, a pesar de la activa investigación llevada a cabo en los países europeos durante aproximadamente los últimos diez años, el origen de los granitos de metales raros sigue sin resolverse. Los modelos genéticos disponibles se dividen en dos grupos principales: anatécticos y de fraccionamiento. El origen directo de los fundidos pegmatíticos y graníticos de metales raros por fusión parcial de la corteza Varisca se ha comprobado mediante restricciones geoquímicas y experimentos. Sin embargo, globalmente, no se han generado con éxito fundidos anatécticos con concentraciones de elementos traza en el rango de los granitos y pegmatitas de metales raros. Alternativamente, los fundidos de granitos y pegmatitas de metales raros podrían no ser producto de un evento anatéctico de una sola etapa. Recientes estudios de partición de elementos han mejorado nuestra capacidad para modelizar el fraccionamiento cristalino en magmas de metales raros. Sin embargo, la importancia global de los procesos de fraccionamiento en el origen de las composiciones de metales raros aún no está clara, ya que la diferenciación por cristalización podría ser importante sólo a nivel de emplazamiento del magma.

Abstract

Highly evolved granites and pegmatites are found in the whole Variscan belt, from Iberia, Brittany, Cornwall, French Massif Central to the Bohemian Massif. They are spatially associated with, Li, Be, Sn, W, Nb, Ta, Cs deposits and play an important role in the sequence of ore-forming processes. The present-day interest in rare and critical metals stresses the need for establishing genetic models for these highly geochemically specialized granites. However, despite active research carried out in European countries during the last ten years or so, the origin of rare-metal granites is still unresolved. The available genetic models divide in two main groups, anatectic and fractionation models. A direct origin of rare-metal granite and pegmatite melts by partial melting of the Variscan crust has been tested using both geochemical constraints and experiments. However, globally, anatectic melts with trace element concentrations in the range of rare metal granites and pegmatites have not been successfully generated. Alternatively, rare-metal granite and pegmatite melts might not be products of a single stage anatectic event. Recent element partitioning studies have improved our capacity to model crystal fractionation in rare-metal magmas. However, the global significance of fractionation processes in the origin of rare-metal compositions is still unclear.

Estabilidad de circón en cromititas: Un estudio experimental

Zircon stability in chromitites: An experimental study

N. Pujol-Solà[1], A. Cambeses[1], A. Garcia-Casco[1,2], I. Novo-Fernández[1], J.F. Molina[1], M.M. Repczyńska[1], L. Barcos[1], P. Montero[1], F. Bea[1]

1- Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. npujolsola@ugr.es; aitorc@ugr.es; agcasco@ugr.es; inovo@ugr.es; jfmolina@ugr.es; maria.repczynska@ugr.es; leticia_barcos@ugr.es; pmontero@ugr.es; fbea@ugr.es
2- Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), 18100 Armilla, Granada, Spain. agcasco@ugr.es

Palabras clave: Zircon, chromite, dissolution-precipitation, basalt, mantle

Resumen

La estabilidad del circón en cromititas ofiolíticas es un tema de intenso debate. En este sistema máfico ultramáfico a >1200ºC por debajo de la MOHO oceánica no se esperan ni circones juveniles magmáticos ni circones heredados cristalizados a partir de fundidos de corteza continental. Para abordar este problema, presentamos resultados experimentales considerando dos diseños: i) cubos de circón de 1 mm de borde incrustados dentro de polvo de vidrio tipo MORB dopado con 3% en peso de Cr_2O_3, simulando así la dispersión de xenocristales de circón en un fundido máfico a partir del cual podría cristalizar cromita y ii) el mismo vidrio basáltico dopado con 3% en peso de Cr_2O_3 y 2% en peso de ZrO_2, para evaluar la cristalización de circón. Los experimentos se realizaron en un horno vertical de mezcla de gases a 1 atm con una rampa de enfriamiento de 1400 a 1200 ºC a una velocidad de -11 ºC/h, bajo condiciones de fugacidad de oxígeno FMQ-2. En el primer tipo de experimento, se formó circón nuevo asociado con cromita y baddeleyita en el borde del cubo de circón inicial. En el segundo diseño experimental, se observó precipitación de granos de cromita en *clusters* pero no se observó circón nuevo. Estos resultados experimentales destacan que el líquido basáltico está subsaturado en circón si el volumen de dicho líquido es alto. Solo cuando se alcanzan altas concentraciones de Zr, simulando las condiciones de circón heredado, precipita nuevo circón junto con cristales de cromita. La cristalización de circón en equilibrio con cromita está posiblemente relacionada con pequeñas cantidades de fundido en los *clusters* de cromita que a su vez contienen alto contenido de Zr después de la precipitación de cromita.

Abstract

The stability of zircon in ophiolitic chromitites is a hot topic. Neither juvenile magmatic zircon nor inherited xenocrystic grains crystallised from continental crust melts are expected in this mafic-ultramafic system at >1200 ºC below the oceanic MOHO. Here, we present experimental results to address this issue considering two designs: i) 1-mm edged zircon cubes embedded within a finely ground powder of MORB-like glass doped with 3 wt% Cr_2O_3, to simulate zircon xenocrysts dispersed in a chromite-bearing mafic melt and ii) the same basaltic glass doped with 3 wt% Cr_2O_3 and 2 wt% ZrO_2 to evaluate zircon crystallisation. We conducted the experiments in a vertical gas-mixing furnace at 1 atm with a cooling ramp from 1400 to 1200 ºC, at a rate -11 ºC/h, under FMQ-2 oxygen fugacity conditions. In the first type of experiment, new zircon formed at the edge of the zircon cube associated with chromite and baddeleyite. In the second design, chromite grains precipitated in clusters but not new zircon. These experimental results highlight that the basaltic liquid is subsaturated in zircon if the volume of such liquid is high. Only when large concentrations of Zr is achieved, simulating the conditions of inherited zircon, new zircon precipitates alongside chromite crystals. New zircon crystallisation in equilibrium with chromite is possibly related to small melt pockets in chromite clusters containing high Zr content after chromite precipitation.

Generación de fluidos metamórficos: Perspectivas desde experimentos de fusión por deshidratación e hidrotermales

Metamorphic Fluid Generation: Insights from Dehydration Melting and Hydrothermal Experiments

M.M. Repczyńska[1], J.F. Molina[1], A. Cambeses[1], P. Montero[1], F. Bea[1], K. Itano[1], N. Pujol-Solà[1], I. Novo-Fernández[1], L. Barcos[1], A. García-Casco[1,2]

1. Departamento de Mineralogía and Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, España. maria.repczynska@ugr.es, jfmolina@ugr.es, aitorc@ugr.es, pmontero@ugr.es, fbea@ugr.es, itano@correos.ugr.es, npujolsola@ugr.es, inovo@ugr.es, leticia_barcos@ugr.es, agcasco@ugr.es
2. Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, IACT (UGR, CSIC), 18100 Armilla, Granada, Spain

Palabras clave: deshidratación; fusión; metasomatismo; biotita; fluidos

Resumen

Los fluidos y fundidos generados por reacciones de deshidratación durante el metamorfismo prograd influyen significativamente en el contenido de elementos traza y la composición isotópica de los magmas corticales. La composición de estas fases así como sus efectos sobre los minerales anhidros a la escala de grano son cuestiones importantes aún sin resolver. En este trabajo se han realizado experimentos con cilindros de granito en un horno vertical, 1200-800 ºC, en atmósfera de N_2. También realizamos experimentos de lixiviación en Bombas de Teflón (170ºC y 10 bares) y autoclave (550ºC y 1.5 kbar). Los resultados de los experimentos en cilindros de roca indican que la moscovita experimentó fusión por deshidratación para formar fundidos ultrabásicos y peraluminosos con contenidos más altos en Na y más bajos en K que la moscovita original. Por el contrario, la biotita experimentó una deshidratación subsolidus para producir óxidos y un fluido acuoso rico en álcalis. El feldespato potásico no nucleó en el sitio de deshidratación; en cambio, el K y otros elementos incompatibles fueron transportados por los fluidos expulsados, induciendo reacciones metasomáticas en la plagioclasa. Los experimentos de lixiviación en biotita revelan intercambio de cationes (K^+ por Na^+ y Ca^{2+}) en soluciones salinas (NaCl, $CaCl_2$) y una pérdida casi total de Rb, Li, Cs y Ba. Estos resultados experimentales demuestran: (i) un mecanismo de descomposición de moscovita por fusión por deshidratación y de biotita por deshidratación subsolidus; y (ii) una movilidad de elementos incompatibles durante la descomposición de biotita y moscovita, y el lixiviado de biotita por soluciones salinas con una alta capacidad metasomatizante.

Abstract

Fluids and melts generated by dehydration reactions during prograde metamorphism significantly influence trace elements and isotopic composition of crustal magmas. The composition of these mobile phases and their effects on anhydrous minerals at the grain-size scale are outstanding issues. In this work, we conducted experiments on granite rock cylinders in a vertical furnace, 1200 to 800 ºC, with an N_2 atmosphere. We also performed complementary leaching experiments in Teflon Bombs (170ºC and 10 bars) and autoclave (550ºC and 1.5 kbar). The results of rock cylinder experiments indicate that muscovite underwent dehydration melting to form ultrabasic, peraluminous melts with higher Na and lower K than the starting muscovite. In contrast, biotite underwent subsolidus dehydration to yield spinel, Fe-Ti oxides and alkali-rich aqueous fluids. The K-feldspar did not nucleate at the dehydration site; instead, K and other incompatible elements were transported by the expelled fluids, inducing metasomatic reactions in plagioclase. Leaching experiments on biotite reveal cation exchange (K^+ by Na^+ and Ca^{2+}) from saline solutions (NaCl, $CaCl_2$), and almost total loss of Rb, Li, Cs and Ba. These experimental results demonstrate: (i) contrasting behavior of muscovite and biotite during their breakdown, i.e., dehydration melting in the former and subolidus dehydration in the latter; and (ii) mobility of incompatible elements during biotite and muscovite breakdown and biotite leaching by saline solutions with a high metasomatizing capacity.

Combinación de procesos de fraccionamiento extremo con cristalización en desequilibrio en el sistema granito-pegmatita de Castillejo de Dos Casas (Salamanca)

Combination of extreme fractionation processes with disequilibrium crystallization in the Castillejo de Dos Casas granite-pegmatite system (Salamanca)

E. Roda-Robles[1], I. Garate-Olave[1], A., Pesquera[1], P.P. Gil-Crespo[1] y J. Errandonea-Martin[1]

1 Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco 48094 Leioa, Bizkaia. encar.roda@ehu.es, idoia.garate@ehu.eus, alfonso.pesquera@ehu.es, pedro.gil@ehu.eus, jon.errandonea@ehu.eus

Palabras clave: Castillejo de Dos Casas, pegmatitas, fraccionamiento, modelización geoquímica.

Resumen

El sistema granito-pegmatita de Castillejo de Dos Casas (C2C) (Zona Centro Ibérica) incluye: (1) granito porfídico rico en biotita; (2) granito de dos micas; (3) leucogranito rico en B-P±F; (4) cúpula aplopegmatítica rica en Li; y (5) dique aplopegmatítico rico en Li a techo de la cúpula. (4) y (5) presentan lepidolita, montebrasita y topacio, con casiterita y óxidos de Nb-Ta accesorios, con altos contenidos en Li (>1%), F (>2%), Rb (hasta 4770ppm) y Sn (hasta 1800ppm) en roca total. La variación composicional entre las cinco unidades es gradual, con un aumento desde (1) hasta (4/5) del contenido en Li, F, Rb, Cs y Sn, paralelo a un descenso en Ca, Fe, Mg, Ti, Ba, REE y K/Rb. La modelización geoquímica efectuada para un fraccionamiento de tipo Rayleigh con los elementos Ba, Li y Rb indica que con un 60-70% de fraccionamiento del granito porfídico (1) podría generarse el magma correspondiente al granito de dos micas (2) y al leucogranito (3). A su vez, sería necesario un grado de fraccionamiento entre 70-99% de (3) para generar las facies pegmatíticas más enriquecidas en elementos incompatibles. Las texturas direccionales (cristales "en peine" y bandeados rítmicos) son comunes en la cúpula pegmatítica. Estas texturas se relacionan a menudo con una cristalización rápida en condiciones de fuerte subenfriamiento. En el sistema C2C estas condiciones se darían una vez alcanzado un alto grado de fraccionamiento del magma, con la apertura del sistema, que es evidenciada por la presencia del dique pegmatítico. Un rápido descenso de la presión favorecería la exsolución de parte del H_2O disuelto en el magma, con su consiguiente subenfriamiento.

Abstract

The Castillejo de Dos Casas (C2C) Variscan igneous system (Central Iberian Zone) includes: (1) biotite-rich porphyritic granite; (2) two-mica granite; (3) B+P±F-rich leucogranite; (4) Li-rich aplite-pegmatite cupola; and (5) Li-rich aplite-pegmatite dyke. (4) and (5) include lepidolite, montebrasite and topaz, with accessory cassiterite and Nb-Ta oxides, and show high contents in Li (>1%), F (>2%), Rb (up to 4770ppm) and Sn (up to 1800ppm). Chemical variation is gradual, with a continuous increase from (1) to (4/5) in Li, F, Rb, Cs and Sn, parallel to a decrease in Ca, Fe, Mg, Ti, Ba, REE and K/Rb. Results of geochemical modelling for Rayleigh fractionation with Ba, Li and Rb indicate that the two mica granite (2) and the leucogranite (3) could be generated via 60-70% of fractionation of the porphyritic granite (1). It would be necessary the 70-99% of fractionation of the leucogranitic melt (3) to generate the evolved pegmatitic units. Directional textures ("combed" crystals and rhythmic layering) are common in the C2C pegmatitic cupola. These textures are often related to a rapid crystallization under strong undercooling conditions. In the C2C system these conditions could be attained when the magma experienced a high fractionation degree. By then, the opening of the system, evidenced by the presence of the pegmatitic dyke, would induce a sudden pressure decrease that would favour the exsolution of part of H_2O dissolved in the melt, consequently producing its undercooling.

Xenocristales de circón de la Isla de Pascua (Rapa Nui) revelan la actividad del hotspot desde el Jurásico medio.

Zircon xenocrysts from Easter Island (Rapa Nui) reveal hotspot activity since the middle Jurassic.

Y. Rojas-Agramonte[1*], N. Pardo[2], D.J.J. van Hinsbergen[3], Ch. Winter[1], M.P. Marroquín-Gómez[4], Sh. Liu[5], A. Gerdes[6], R. Albert[6], Sh. Wu[7], A. García-Casco[8]

[1]Institute of Geosciences, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel, Germany, yamirka.rojas@ifg.uni-kiel.de
[2]Departamento de Geociencias, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, n.pardo@uniandes.edu.co
[3]Department of Earth Sciences, Utrecht University, Princetonlaan 8a, Utrecht University, 3584 CB Utrecht, The Netherlands, d.j.j.vanhinsbergen@uu.nl
[4]The University of Arizona Department of Geosciences Tucson, Arizona, 85721, EE. UU, mpmarroquing@arizona.edu
[5]Beijing SHRIMP Centre, Chinese Academy of Geological Sciences, 26 Baiwanzhuang Road, 100037 Beijing, China, sjliu@bjshrimp.cn
[6]Department of Geosciences, Goethe University Frankfurt, Altenhoferallee 1, 60438 Frankfurt am Main, Germany, gerdes@em.uni-frankfurt.de; albertroper@em.uni-frankfurt.de
[7]State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, No. 19, Beitucheng Western Road, Chaoyang District, Beijing, 100029, P.R.China, shitou.wu@mail.iggcas.ac.cn
[8]Department of Mineralogy and Petrology, University of Granada, Fuentenueva s/n, 18071 Granada, Spain, agcasco@ugr.es

Palabras clave: Isla de Pascua, Xenocristales, hotspot, Large Igneous Province, Palmer Land event.

Resumen

En este trabajo se identifican circones derivados del manto recuperados de arenas de playa y suelos de la Isla de Pascua que son mucho más antiguos que el vulcanismo y su litosfera subyacente. Una gran población de circones de 0-165 Ma de antigüedad tienen firmas isotópicas coherentes de oxígeno ($\delta^{18}O_{(circón)}$ 3.8- 5.9‰) y Hf del manto ($\varepsilon Hf_{(t)}$ +3.5-+12.5). Estos resultados son consistentes con la cristalización de circón a partir de fundidos relacionados con la pluma. Por tanto, sugerimos que el punto caliente de Pascua comenzó hace al menos c. 165 Ma. Una gran población de circones de c. 160-164 Ma podría indicar una intensa fase inicial de fusión masiva asociada a la formación de una Gran Provincia Ígnea (LIP) tras la primera llegada de la pluma.

Usamos reconstrucciones de placas para mostrar que tal LIP se habría formado en la Placa Fénix. Se habría subducido por debajo de la Península Antártica alrededor de 100-105 Ma, ofreciendo una solución para el enigmático evento de deformación de Palmer Land, previamente propuesto como resultado de una colisión con un indentador desconocido. Nuestros hallazgos muestran que la carga de xenocristales de circón derivados del manto astenosférico, puede no ser una excepción. El "fantasma" de una prolongada actividad del punto caliente aquí descrito sugiere que el punto caliente de Pascua y el manto sublitosférico en el que se encuentra permanecieron estacionarios durante al menos 165 Ma.

Abstract

In this work, we report the finding of mantle-derived zircon grains retrieved from Easter Island beach sands and red soils that are much older than volcanism and its underlying lithosphere. A large population of 0–165 Myr old zircons have coherent oxygen ($\delta_{18}O_{(zircon)}$ 3.8– 5.9‰) and Hf mantle isotopic signatures ($\varepsilon Hf_{(t)}$ +3.5–+12.5). These results are consistent with the crystallization of zircon from plume-related melts. We thus suggest that the Easter hotspot started at least ~165 Ma ago. A large population of ~160-164 Ma zircons could signal an intense initial massive melting phase associated with the formation of a Large Igneous Province (LIP) upon the first arrival of the plume.

We use plate reconstructions to show that such a LIP would have formed on the Phoenix Plate. It would have subducted below the Antarctic Peninsula around 100-105 Ma, offering a solution for the enigmatic Palmer Land deformation event, previously proposed to result from a collision with an unknown indenter. Our findings show that asthenospheric mantle-derived xenocryst zircon cargo, may not be an exception. The here-reported “ghost” of a prolonged hotspot activity suggests that the Easter hotspot and the sub-lithospheric mantle in which it is entrained remained mantle-stationary for at least 165 Ma.

Evolución de la sección de arco Ediacárico-Cámbrico preservada en el SW de Iberia (Complejo de Ossa-Morena)

Evolution of the Ediacaran-Cambrian arc section preserved in SW Iberia (Ossa-Morena Complex)

E. Rojo-Pérez[1], R. Arenas[1], J.M Fuenlabrada[2] y R. Díez Fernández[3]

1 Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad Complutense e Instituto de Geociencias (UCM, CSIC) 28040 Madrid. e.rojo@ucm.es; rarenas@ucm.es
2 Unidad de Geocronología (CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría), Universidad Complutense 28040 Madrid. jmfuenla@ucm.es
3 Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Salamanca. r.diez@igme.es

Palabras clave: Ediacaran-Cambrian arc, petrogenetic and geodynamic evolution, isotopic sources.

Resumen

La geoquímica de series sedimentarias permite reconocer patrones y cambios en los escenarios geodinámicos. En márgenes activos, la contribución de estas series al magmatismo de arco a través de procesos como la erosión por subducción está siendo activamente investigada. En este sentido, la geoquímica de las series siliciclásticas depositadas a lo largo del margen de Gondwana entre el Ediacárico y el Cámbrico preservan la historia evolutiva de sus fuentes, relacionadas con la actividad de arco y de las áreas continentales próximas. El SW del Macizo Ibérico (Complejo Ossa-Morena) conserva una sección de este arco cuya evolución puede seguirse a través de la caracterización del magmatismo relacionado con la subducción y el registro metasedimentario coetáneo, durante un intervalo de tiempo que abarca casi 100 Ma. Este estudio revela que el magmatismo de arco estuvo ligado a la sedimentación sinorogénica de una forma compleja poco explorada. El reciclado del arco se aprecia por la equivalencia isotópica (Nd) entre las series sedimentarias y el comienzo de la subducción (pre- a 602 Ma) preservado en esta sección. Los primeros pulsos magmáticos de formación del arco (c. 602-550 Ma) se caracterizan por su signatura adakitica relacionada con la fusión de un volumen significativo de sedimentos introducidos por el *slab*, probablemente favorecido por erosión por subducción. Mientras que hacia los estadios finales (c. 540-534 Ma), el magmatismo evolucionó hacia una mayor participación del manto asociada a la variación progresiva del ángulo del *slab*. Este estudio propone un modelo de evolución petrogenética y geodinámica del arco entre el Ediacárico y el Cámbrico temprano, mejorando la precisión de las futuras reconstrucciones paleogeográficas.

Abstract

The geochemistry of sedimentary series allows the recognition of patterns and shifts in geodynamic settings. In active margins, the contribution of these series to arc magmatism through processes such as subduction erosion is being actively investigated. In this regard, the geochemistry of siliciclastic series sedimented along the Gondwana margin between the Ediacaran and Cambrian preserves the evolution of their sources, related to arc activity and nearby continental areas. The SW Iberian Massif (Ossa-Morena Complex) preserves a section of this arc whose evolution can be followed through the characterisation of subduction-related magmatism and the coeval metasedimentary record, during a time interval spanning almost 100 Ma. This study reveals that arc magmatism was linked to synorogenic sedimentation in a complex and poorly explored way. The arc recycling is shown by the isotopic equivalence (Nd) between the sedimentary series, and the subduction onset (pre- to 602 Ma) preserved in this section. The early magmatic pulses of arc building (c. 602-550 Ma) are characterised by their adakitic signature related to the melting of a significant volume of slab-induced sediments, probably favoured by subduction erosion. Meanwhile, during late stages (c. 540-534 Ma), magmatism evolved towards greater mantle input associated with the progressive variation of the slab angle. This study provides a model for the petrogenetic and geodynamic evolution of the arc from the Ediacaran to the Early Cambrian, improving the accuracy of future paleogeographic reconstructions.

Geocronología U-Pb (LA-ICP-MS) en circones del Ortogneis de la Magdalena: Edad de la unidad inferior del basamento Cadomiense en el Macizo de Mérida

U-Pb zircón dating (LA-ICP-MS) of the Magdalena Orthogneiss: Age of the lowermost unit of the Cadomian basement at the Mérida Massif

S. Sánchez Martínez[1], R. Albert[2], R. Arenas[1], E. Rojo-Pérez[1], A. Gerdes[2], R. Díez Fernández[3]

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense 28040 Madrid. sosache@ucm.es, rarenas@ucm.es, e.rojo@ucm.es
2 Frankfurt Isotope and Element Research Center, Goethe-Universität Frankfurt 60438 Frankfurt. RichardAlbert@fierce.uni-frankfurt.de, gerdes@fierce.uni-frankfurt.de
3 Departamento de Geología y Subsuelo, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CSIC) 37001 Salamanca. r.diez@igme.es

Palabras clave: Basamento cadomiense, Macizo de Mérida, Gneis de la Magdalena, Datación U-Pb.

Resumen

En el Macizo de Mérida (SW del Macizo Ibérico) aparecen muy bien representados los restos del Orógeno Cadomiense, que constituyen los niveles más antiguos reconocidos en el basamento de Iberia. Este macizo está constituido por tres unidades que afloran bajo series del Cámbrico Inferior y del Ordovícico. La Unidad Gneísica Inferior y la Unidad Superior de Esquistos y Metagranitoides representan una sección del margen de Gondwana, mientras que la Unidad Intermedia Máfica – Ultramáfica tiene afinidad oceánica y es considerada una asociación ofiolítica (Ofiolita de Mérida). Circones obtenidos de dos muestras de los gneises migmatíticos de la Unidad Inferior (Ortogneis de la Magdalena) se han analizado mediante LA-ICP-MS para llevar a cabo un estudio de sus edades U-Pb, mostrando una compleja distribución de poblaciones de edad. Se pueden distinguir dos poblaciones principales de edades. La población más antigua y abundante tiene una edad media de c.620 Ma, que se interpreta como la edad del protolito granítico. La población más joven tiene una edad media de c. 596 Ma, que se interpreta como la edad del episodio de migmatización que tuvo lugar durante el metamorfismo de la unidad. Esta edad más joven se correlaciona con la edad del metamorfismo principal de la Ofiolita de Mérida (c. 390 Ma; geocronología U-Pb de granate; LA-ICP-MS). De acuerdo con estos resultados, el Ortogneis de la Magdalena representa la unidad más antigua del Macizo de Mérida, que se acrecionó bajo la Unidad Ofiolítica tras el cierre de la cuenca oceánica representada por ésta última.

Abstract

Remnants of the Cadomian Orogen, which constitute the oldest section of the Iberian Massif, are well represented in SW Spain, being the Mérida Massif one of the most representative examples of this basement. Outcropping below Lower Cambrian and Ordovician series, the Mérida Massif consists of three different units. The Lower Gneissic Unit and the Schistose-Metagranitic Upper Unit represent a section of the Gondwana margin, while the Mafic-Ultramafic Intermediate Unit has oceanic affinity being considered an ophiolitic assemblage (Mérida Ophiolite). LA-ICP-MS U-Pb analysis have been performed in zircons from two samples of migmatitic orthogneisses from the Lower Unit (Magdalena Orthogneiss), yielding a complex distribution of age populations. Within the main group of zircon ages two different populations can be distinguished, the oldest and most abundant yielded an average value of c.620 Ma interpreted as the granitic protolith age, while the youngest yielded an average value of c. 596 Ma interpreted as the age of the migmatization of the unit. The younger age correlates with that obtained from LA-ICP-MS U-Pb garnet dating in the Mérida Ophiolite (c. 590 Ma). According to these results, the Magdalena Orthogneiss represents the oldest unit from the Mérida Massif. This gneissic unit was accreted below the Mérida Ophiolite following the closure of that oceanic basin.

Características geoquímicas de los eventos volcánicos ácidos Misipienses de la Cuenca de Matachel (Zona de Ossa-Morena).

Geochemical characteristics of the Mississippian acid volcanic events of the Matachel Basin (Ossa-Morena Zone).

F. Sarrionandia[1], J. Errandonea-Martin[2], E. Larrondo[3], M. Carracedo-Sánchez[2], L. Eguiluz[1] y J.I. Gil Ibarguchi[2]

1 Dpto. Geología, Facultad de Farmacia, Universidad del País Vasco UPV/EHU 01006 Vitoria-Gasteiz.
fernando.sarrionandia@ehu.eus; luis.eguiluz@ehu.eus
2. Dpto. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU 48080 Bilbao.
jon.errandonea@ehu.eus; manuel.carracedo@ehu.eus; josei.gil@ehu.eus
3 Team Ingeniería y Consultoría S.L., Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia, 207C, 48170, Zamudio.
egoitz.larrondo@gmail.com

Palabras clave: Geoquímica, riolitas, volcanismo, Matachel, Zona de Ossa-Morena.

Resumen

La cuenca de Matachel (Zona de Ossa-Morena; Badajoz) es una unidad tectono-estratigráfica que alberga tres episodios volcánicos diferenciados por registros sedimentarios interestratificados de edad Missisipiense, denominados (en orden cronoestratigráfico) 'Ácido I', 'Basico', y 'Ácido II'. Los episodios volcánicos 'Acido I' (AI) y 'Ácido II' (AII), están integrados por riolitas con contenidos variables tanto en sílice (AI: 67.91–82.64%; AII: 65.69–78.02%), como en alúmina (AI: 9.13–14.89%; AII: 10.89–14.99%) y álcalis (AI: 5.74–9.67%; AII: 7.88–9.89%), destacando sus bajos contenidos en P_2O_3 (AI: 0.01–0.10%; AII: 0.01–0.17%). Las riolitas del episodio AI son mayormente ferrosas alcali-cálcicas a alcalinas, mientras que las del episodio AII tienen un carácter más álcali-cálcio magnesiano, aunque también incluyen términos subordinados ferroso alcalinos. Se tratan de rocas fuertemente peraluminosas ($ACNK_{AI}$: 0.9–1.3; $ACNK_{AII}$: 1.0–1.2), con variables relaciones Rb/Ba (AI: 0.07–0.83; AII: 0.16–4.28) y Rb/Sr (AI: 0.43–5.13; AII: 2.96–11.8). Destacan las bajas relaciones Th/Nb (AI: 1.03–1.71; AII: 1.21–1.93) y variables enriquecimientos en tierras raras ligeras ($LREE/HREE_{AI}$: 2.45–10.99; $LREE/HREE_{AII}$: 3.94–11.9). La gran similitud en las características geoquímicas de ambos eventos volcánicos ácidos sugiere la posible derivación a partir de magmas parentales similares, de naturaleza híbrida (mantélico-cortical), resultado de la fusión de una misma fuente mantélica, pero con una variable contribución de materiales ortogneísicos de la corteza inferior.

Abstract

The Matachel basin (Ossa-Morena Zone; Badajoz) corresponds with a tectono-stratigraphic unit comprising three discrete volcanic events separated by Missisipian interstratified sedimentary rocks, termed (according to their chronostratigraphic order) 'Acid I', 'Basic', and 'Acid II'. The volcanic events 'Acid I' (AI) and 'Acid II' (AII), are integrated by rhyolites with variable contents in both silica (AI: 67.91-82.64 wt.%; AII: 65.69-78.02 wt.%), alumina (AI: 9.13-14.89 wt.%; AII: 10.89-14.99 wt.%) and alkalis (AI: 5.74-9.67 wt.%; AII: 7.88-9.89 wt.%), standing out their low P_2O_3 contents (AI: 0.01-0.10 wt.%; AII: 0.01-0.17 wt.%). The rhyolites of the AI event are mostly ferroan alkali-calcic to alkalic, while those of the AII event have a more alkali-calcic-magnesian character, although they also include some subordinate ferroan-alkali terms. Analyzed samples are strongly peraluminous rocks ($ACNK_{AI}$: 0.9-1.3; $ACNK_{AII}$: 1.0-1.2), with variable Rb/Ba (AI: 0.07-0.83; AII: 0.16-4.28) and Rb/Sr (AI: 0.43-5.13; AII: 2.96-11.8) ratios. There are remarkable the low Th/Nb ratios (AI: 1.03-1.71; AII: 1.21-1.93) and the variable enrichments in light rare earth elements ($LREE/HREE_{AI}$: 2.45-10.99; $LREE/HREE_{AII}$: 3.94-11.9). Observed similarities in the geochemical characteristics of both acid volcanic events suggest their derivation from similar parental magmas of hybrid nature (mantle-crustal), generated by melting of a same mantle source, but with a variable contribution of orthogneisses from the lower crust.

Doble datación de circón, análisis de elementos traza e isótopos de O para descifrar erupciones explosivas-efusivas del Pleistoceno procedentes de un magma zonado de una isla oceánica, Isla de Ascensión

Zircon double-dating, trace element and O isotope analysis to decipher late Pleistocene explosive-effusive eruptions from a zoned ocean-island magma system, Ascension Island

J.H. Scarrow[1], A.K. Schmitt[2], M. Danišík[2], K.J. Chamberlain[3], B.V. Davies[4], J. Rushton[5], R.J. Brown[6] and J Barclay[7]

1Department of Mineralogy and Petrology, University of Granada, Granada, Spain. jscarrow@ugr.es
2 John de Laeter Centre, Curtin University, Perth, Australia. axel.schmitt@curtin.edu.au, M.Danisik@curtin.edu.au
3 School of Environmental Sciences, University of Liverpool, Liverpool, UK. K.J.Chamberlain@liverpool.ac.uk
4 Department of Earth and Environmental Sciences, University of Manchester, Manchester, UK. bridie.davies@manchester.ac.uk
5 British Geological Survey, Keyworth, UK. jere1@bgs.ac.uk
6 Department of Earth Sciences, University of Durham, Durham, UK. richard.brown3@durham.ac.uk
7 School of Earth Sciences, University of Bristol, Bristol, UK. j.barclay@bristol.ac.uk

Palabras clave: tephrochronology, chronostratigraphy, U-series, (U-Th)/He, pumice

Resumen

La combinación de datos composicionales de circón con datación doble (desequilibrio ^{238}U-^{230}Th y (U-Th)/He) puede descifrar las escalas de tiempo y la dinámica de los procesos magmáticos. La secuencia Echo Canyon (EC), Isla Ascensión, Atlántico Sur, se compone de erupciones explosivas-efusivas de traquita. La datación con U-Th-Pb en circón de clastos de lava ha revelado vulcanismo recurrente a 1.34 y 0.6 Ma, y 95 ka. Las edades de enfriamiento de (U-Th)/He en circón indican que la mayor parte de la secuencia explosiva-efusiva de EC estalló en un breve episodio a ca. 95 ka. Además, las edades uniformes de cristalización de ^{238}U-^{230}Th en circón sugieren un almacenamiento de magma solo moderadamente prolongado con fundido presente en profundidad durante un máximo 10^3-10^4 años antes de la erupción. El carácter enriquecido de las composiciones de circón, sin indicaciones de contaminación por la corteza continental en los valores de isótopos de oxígeno (δ^{18}O 2.67-5.63‰), sugiere un componente enriquecido en la fuente. Además, las composiciones de circón con bajo δ^{18}O implican la asimilación de roca de caja alterada por procesos hidrotermales a alta temperatura. La evolución del magma por cristalización fraccionada condujo a una estratificación composicional pre-eruptiva y una extracción progresivamente más profunda de magma menos evolucionado registrada en composiciones de roca total y valores de Zr/Hf en el circón.

Abstract

Novel combination of zircon compositional data with double-dating (disequilibrium ^{238}U-^{230}Th and (U-Th)/He) can decipher the timescales and dynamics of magmatic processes. The Echo Canyon (EC) sequence, Ascension Island, South Atlantic, comprises small-volume explosive-effusive eruptions of trachyte. Zircon U–Th–Pb dating of lithic lava clasts has revealed recurrent evolved volcanism at 1.34 and 0.6 Ma, and 95 ka. The (U-Th)/He zircon cooling ages indicate that most of the EC explosive-effusive sequence erupted in a brief episode at ca. 95 ka. Additionally, uniform ^{238}U-^{230}Th zircon crystallisation ages suggest moderately protracted magma storage with melt present at depth for at most 10^3–10^4 years before eruption. The enriched character of zircon trace element compositions without a continental crustal signature in the oxygen isotope values (δ^{18}O 2.67-5.63‰), suggests an enriched component in the EC magma source. Furthermore, low δ^{18}O zircon compositions imply assimilation of high T hydrothermally altered country rock by the source magma. Magma evolution by fractional crystallisation led to pre-eruptive compositional stratification with progressively deeper tapping of less evolved magma from discrete lenses recorded in whole-rock compositions and zircon Zr/Hf values.

Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of magmatism from the Sal-Boavista-Maio ridge (Cape Verde archipelago): temporal evolution of its mantle sources

Geoquímica isotópica (Sr-Nd-Pb) del magmatismo de la dorsal Sal-Boavista-Maio (archipiélago de Cabo Verde): evolución temporal de sus fuentes de manto

C. Villaseca[1, 2], D. Orejana[1], M.J. Huertas[1], E. Ancochea[1], C. de Ignacio[1], M. García-Rodríguez[1], J.A. Moreno[3,4]

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid 28040 Madrid. granito@ucm.es; dorejana@ucm.es; huertas@ucm.es; eancochea@ucm.es; cris@ucm.es; magarc40@ucm.es
2 Instituto de Geociencias IGEO (UCM, CSIC), Universidad Complutense 28040 Madrid.
3 Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva 21071 Huelva. juanantonio.moreno@dct.uhu.es
4 Centro de Investigación en Química Sostenible (CIQSO), Universidad de Huelva 21071, Huelva.

Abstract: *Cape Verde (CV) magmatism started in the easternmost islands (the Sal-Boavista-Maio ridge) forming basal complexes of plutonic and volcanic rocks. These Early to Middle Miocene rocks show marked isotope geochemical differences between the northern islands (Sal and Boavista), which show higher $^{143}Nd/^{144}Nd$ and lower $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{206}Pb/^{204}Pb$ and $^{208}Pb/^{204}Pb$ ratios than those from the southernmost island of Maio. Although some Late Miocene magmatic episodes of Maio display a composition similar to that of coeval rocks from the northern islands, the current model indicating that some mantle components dominate the northern CV island alignment (HIMU and DMM types) with respect to the EM-1 pole, prevalent on the southern CV islands, remains well founded.*

Key words: Intraplate alkaline magmatism, Cape Verde archipelago, isotopic data, temporal evolution, northern and southern island alignments.

Resumen: El magmatismo de Cabo Verde (CV) se inicia en las islas más orientales del archipiélago (alineación Sal-Boavista-Maio) formando complejos basales eruptivos, de rocas plutónicas y volcánicas. Estas rocas, en su mayoría de edad Mioceno Inferior y Medio, presentan marcadas diferencias de geoquímica isotópica entre las islas más septentrionales (Sal y Boavista), con mayores relaciones de $^{143}Nd/^{144}Nd$ y más bajas de $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{206}Pb/^{204}Pb$ y $^{208}Pb/^{204}Pb$, que las encontradas en rocas de la isla más meridional (Maio). No obstante, algunos episodios intrusivos en esta última isla coinciden composicionalmente con eventos magmáticos contemporáneos (Mioceno Superior) del grupo insular septentrion. Esta convergencia de datos isotópicos no modifica el modelo actual de que unos componentes de manto dominan en la alineación insular del norte (tipos HIMU y DMM) respecto al polo EM-1, prevalente en la alineación del sur.

Palabras clave: Magmatismo alcalino de intraplaca, archipiélago de Cabo Verde, datos isotópicos, evolución temporal, alineaciones insulares norte y sur.

INTRODUCTION

The Cape Verde (CV) archipelago is a volcanically active ocean island group formed by alkaline intraplate magmatism. Successive plutonic and volcanic events built a complex rock association within each island generating a diverse and wide compositional range of eruptive products.

The oldest CV islands are those situated close to the African continent defining a north to south alignment: the Sal-Boavista-Maio ridge (Fig. 1). In these islands the oldest igneous rocks are mostly from the Early to Middle Miocene forming part of eruptive complexes of varied age: 25.6 to 16.3 Ma in Sal (e.g., Torres et al., 2010), 17.5 to 11.5 Ma in Boavista (Ancochea et al., 2012) and 19.3 to 13.5 Ma in Maio (Samrock et al., 2022, and references therein). The rest of Cape Verde was formed mainly during the last 7 Ma defining two island alignments (northern and southern, Fig. 1).

Maio is the island with higher abundance of basic/ultrabasic rocks within the studied ridge. Its central intrusive complex is mainly formed by gabbros, essexites and pyroxenites, whereas intermediate or felsic rocks represent less than 5% of the complex. Later volcanic formations (e.g. Casas Velhas, Malhada and Penoso lava flows) are mostly ankaramites, melilitites and nephelinites (e.g., Samrock et al., 2022). A similar situation is envisaged in Sal island, although the circular plutons of its old central complex have a large amount and variety of intermediate essexite and monzonite rocks, reaching up to 15% of these intrusions (Torres et al., 2010). By contrast, Boavista highlights for being the most felsic island of the whole CV archipelago. Around 50 vol% of the island is formed by syenites, trachytes and phonolites from the felsic central complex, whereas more recent lava flows are mostly basic/ultrabasic, similarly to later volcanics above described in Maio and Sal. In this work we discuss isotopic data from rocks with ages up to

16.5 Ma in Sal and Boavista islands but there is only available data for rocks of the last 10 Ma in Maio.

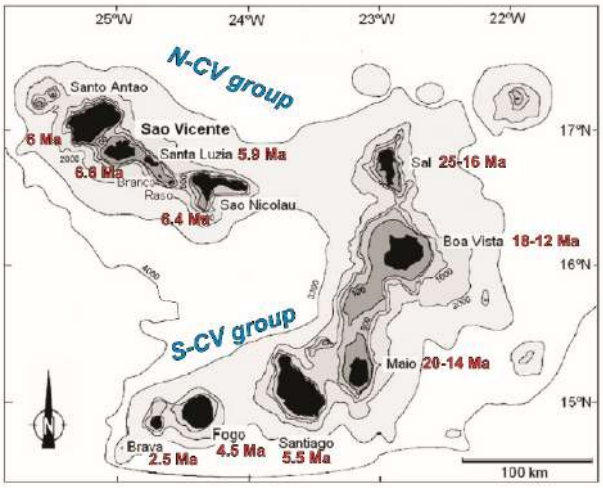


FIGURE 1. *Bathymetric and topographic map of the Cape Verde archipelago (modified from Ancochea et al., 2012). Ages of the oldest eruptive phases on several islands are shown (mostly from Holm et al., 2008; Torres et al., 2012; Ancochea et al., 2012; Samrock et al., 2022; and other references there in). The northern (N-CV) and southern Cape Verde islands (S-CV) are also discriminated.*

RESULTS AND DISCUSSION

Our new isotope data, along with published geochemical and geochronological data from Sal and Boavista indicate the early incoming of a FOZO-like component in the formation of the northern Cape Verde alignment to which other isotopic mantle sources (HIMU and DMM components) were added later. It is remarkable that old circular plutonic complexes of Sal (about 16.3 Ma, Torres et al., 2010) define a particular isotopic compositional field characterized by higher radiogenic Nd and lower $^{206}Pb/^{204}Pb$ and $^{208}Pb/^{204}Pb$ ratios than later volcanic events from this island (Fig. 2), thus displaying a more heterogeneous intra-island isotopic composition during Miocene magmatic events when compared to the Boavista magmatic evolution.

The isotopic and geochronological data from the Maio island are much more scarce. Nevertheless, the isotopic signatures of late Miocene Maio lavas (Casas Velhas and Penoso) suggest melting of mantle sources of EM-1 affinity (i.e., low radiogenic Nd and high $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios), in marked contrast with the coeval magmatic events from Sal and Boavista (Fig. 2). The involvement of this enriched mantle component will continue over time in the formation of the southern CV islands (Gerlach et al., 1988).

However, the late Miocene Malhada plateau lavas of Maio (~7 Ma) yielded higher Nd isotopic signatures (0.512886 - 0.512903) and low $^{86}Sr/^{87}Sr$ ratios (0.70325 - 0.70339), very similar to those of the northernmost islands (Fig. 2). This isotopic component is also found in some of the oldest lavas from Santiago (Flamengo Formation of ~4.6 Ma) and Brava (Lower Unit of ~3 Ma) islands, as previously noticed by Gerlach et al. (1988) and Mourao et al. (2012), respectively. This isotopic overlapping between late Miocene silicate magmas of the southern and northern CV islands is also displayed by the scarce carbonatitic magmatism intrusive in both alignments, which also overlap in isotopic Sr and Nd ratios (Fig. 3). However, the southern CV carbonatites do not show the high radiogenic Pb isotopic ratios of the São Vicente carbonatites (N-CV group), which have the highest contribution of a HIMU mantle component recorded in all the CV archipelago (Hoernle et al., 2002; de Ignacio et al., 2012).

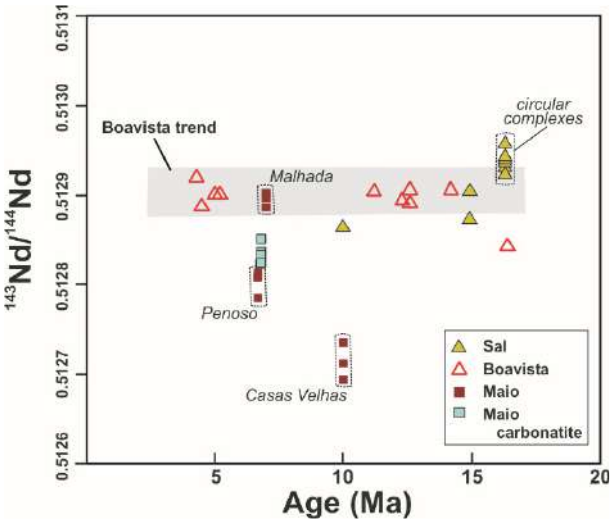


FIGURE 2. *Initial isotopic Nd ratios versus age of rocks from the Sal-Boavista-Maio ridge. Only mafic rocks with MgO ≥ 4.8 wt% have been plotted. Published geochronological data from Sal (Holm et al., 2008; Torres et al., 2010, and references therein), Boavista (Dyrh and Holm, 2010; Ancochea et al, 2012) and Maio (Mitchell et al., 1983; Samrock et al., 2022) are used in this plot. Most isotopic data from Sal (excepting Late Miocene lavas from Doucelance et al., 2003) and Boavista islands are unpublished, whereas Maio data are from Gerlach et al. (1988, silicate rocks) and Hoernle et al. (2002, carbonatites). Some units from Sal (circular plutons from the Old Eruptive Complex) and Maio (Casas Velhas, Penoso and Malhada volcanic Formations) islands have been highlighted with compositional fields. A broad chemical evolution over time for the Boavista magmatism is also depicted (grey field of Boavista trend).*

Despite this compositional convergence in Late Miocene mantle sources between the northern and southern islands of the studied ridge, our new isotope data reinforce the conclusions from previous studies which indicate that some mantle components prevail in the southern (EM-1) or in the northern (HIMU, DMM) island alignments of the CV archipelago (Gerlach et al., 1988) (Fig. 3). Both isotopic trends start from the same FOZO-like component suggesting that this is the dominant mantle reservoir in the Cape Verde plume, which has being progressively mixed either with MORB-type sources in the N-CV islands (more evident on the islands further into the ocean) or with enriched mantle components in the S-CV alignment. The supply of this EM-1 source has been maintained over more than 10 Ma in the upwelling mantle plume.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Dr. José Manuel Fuenlabrada for performing the Sr-Nd isotopic analyses in previously leached samples with HCl and a HF-HNO_3 mixture. This work is included in the objectives of, and

supported by, the PID2020-115980GB-I00 project of the Ministerio de Ciencia e Innovación (MICIN) of Spain. MGR thanks the Banco Santander-UCM agreement for funding her predoctoral grant.

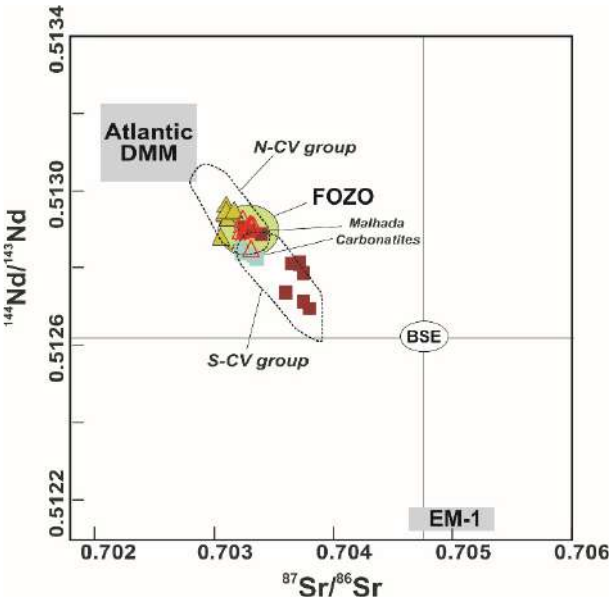


FIGURE 3. *$^{143}Nd/^{144}Nd$ versus $^{87}Sr/^{86}Sr$ for basic and ultrabasic rocks of the Sal-Boavista-Maio ridge. Same symbols as in Figure 2. The compositional field of basic rocks from the N-CV and S-CV islands is mostly taken from Gerlach et al. (1988). Note that Late Miocene Malhada lavas and carbonatite dykes of similar age from Maio (blue and brown symbols) plot overlapping data from the N-CV group. Isotopic fields of Atlantic DMM, FOZO, BSE and EM-1 mantle reservoirs is taken from Gerlach et al. (1988) and Mourao et al. (2012).*

REFERENCES

Ancochea, E, Hernán, F., Huertas, M.J., Brändle, J.L. (2012): A basic radial dike swarm of Boa Vista (Cape Verde Archipelago); its significance in the evolution of the island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 243-244: 24-37.

de Ignacio, C., Muñoz, M., Sagredo, J. (2012): Carbonatites and associated nephelinites from Sao Vicente, Cape Verde Islands. *Mineralogical Magazine* 76: 311-355.

Doucelance, R., Escrig, S., Moreira, M., Gariépy, C., Kurz, M.D. (2003): Pb-Sr-He isotopoe and trace element geochemistry of the Cape Verde Archipelago. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67: 3717-3733.

Dyrh, C.T., Holm, P.M. (2010): A volcanological and geochemical investigation of Boa Vista, Cape Verde Islands; $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology and field constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 189: 19-32.

Gerlach, E., Clif, R.A., Davies, G.R., Norry, M., Hodgson, N. (1988): Magma sources of the Cape Verde Archipelago: isotopic and trace element constraints. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52: 2979-2992.

Hoernle, K., Tilton, G., Le Bas, M.J., Duggen, S., Garbe-Schönberg, D. (2002): Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 142: 520-542.

Holm, P.M., Grandvuinet, T., Friis, J., Wilson, J.R., Barker, A.K., Plesner, S. (2008): An $^{40}Ar/^{39}Ar$ study of the Cape Verde hot spot: Temporal evolution in a semistationary plate environment. *Journal of Geophysical Research* 113: B08201.

Mitchell, J.G., Le Bas, M.J., Zielonka, J., Furnes, H. (1983): On dating the magmatism of Maio, Cape Verde Islands. *Earth and Planetary Science Letters* 64: 61-76.

Mourao, C., Mata, J., Doucelance, R., Madeira, J., Millet, M-A., Moreira, M. (2012): Geochemical temporal evolution of Brava Island magmatism: Constraints on the variability of Cape Verde mantle sources and on carbonatite-silicate magma link. *Chemical Geology* 334: 44-61.

Samrock, L.K., Hansteen, T.H., Dullo, W-C., Wartho, J-M. (2022): Internal igneous growth, doming and rapid erosion of a mature ocean island: the Miocene evolution of Maio (Cabo Verde). *International Journal of Earth Sciences* 111: 1129-1148.

Torres, P., Silva, L.C., Munhá, J., Caldeira, R., Mata, J., Tassinari, C. (2010): Petrology and geochemistry of lavas from Sal Island: Implications for the variability of the Cape Verde magmatism. *Comunicaçoes Geológicas* 97: 35-62.

SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

La Sociedad Geológica de España fue fundada en 1985 y tiene como fines la promoción, fomento y difusión del conocimiento, progreso y aplicaciones de la Geología, el asesoramiento en materia científica y educativa a las Instituciones y Entidades que lo requieran, y la representación de los intereses científicos de la comunidad geológica de España a nivel internacional. Sus miembros tienen derecho a participar en todas las actividades organizadas por la Sociedad, a optar a ocupar cualquiera de sus cargos directivos y a recibir gratuitamente las publicaciones periódicas de la Sociedad: Geogaceta y Revista de la Sociedad Geológica de España.

JUNTA DE GOBIERNO

Presidente	**Juan Antonio Morales González** Dpto. de Ciencias de la Tierra Facultad de Ciencias Experimentales Univ. de Huelva, 21007 Huelva Tel.: 959 21 98 15; e-mail: jmorales@uhu.es
Secretario	**Miguel Gómez Heras** Dpto. de Geología y Geoquímica Facultad de Ciencias Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid Tel.: 91 497 54 07 ext. 6; e-mail: miguel.gomezheras@uam.es
Tesorera	**Blanca María Martínez García** Departamento de Geología Facultad de Ciencia y Tecnología Universidad del País Vasco, 48940 Leioa e-mail blancamaria.martinez@ehu.eus
Vicepresidenta	**Ana Ruiz Constán**
Vicesecretario	**Ramón Casillas Ruiz**
Secretario 2º	**José Eugenio Ortiz Menéndez**
Vocales	**Francisco Manuel Alonso Chaves** **Manuel Díaz Azpiroz** **Pedro Huerta Hurtado** **Álvaro Jiménez Berrocoso** **Raquel Martín Banda** **Pilar Mata Campo** **Ángel Salazar Rincón**
Secretaría técnica	**Isabel Corral Fernández**

ORGANIZAN

PATROCINAN

COLABORAN