

Modelización mediante Técnicas
Geoestadísticas de la Formación de
Travertinos Asociada al Sistema
Termal de Alicún de las Torres a
partir de Datos de Tomografía
Eléctrica y Porosidad

A. J. Prado Pérez

E. Aracil

L. Pérez del Villar

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Catálogo general de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>

Depósito Legal: M -14226-1995

ISSN: 1135 - 9420

NIPO: 471-10-036-2

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S54

GEOLOGIC SURVEYS; GEOPHYSICAL SURVEYS; TRAVERTINE; STATISTICAL MODELS; CARBON DIOXIDE; NATURAL ANALOGUE; GEOLOGIC FORMATIONS; GREENHOUSE GASES; ENVIRONMENTAL IMPACTS

Modelización mediante Técnicas Geoestadísticas de la Formación de Travertinos Asociada al Sistema Termal de Alicún de las Torres a partir de Datos de Tomografía Eléctrica y Porosidad

Prado Pérez, A. J.; Aracil, E.; Pérez del Villar, L.

79 pp. 73 fig. 10 tablas 23 refs.

Resumen:

El Proyecto Singular Estratégico: "Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂", cofinanciado por el MICINN y los Fondos FEDER (UE), contemplaba, en el subproyecto: "Almacenamiento Geológico de CO₂", el estudio detallado del análogo natural de escape de CO₂ en forma de DIC (Carbono Inorgánico Disuelto), del sistema termal de Alicún de Las Torres (Prov. de Granada), el cual se caracteriza por tener asociada una importante formación de travertinos. Al objeto de estimar la cantidad de C atrapado por esta formación mineral, y por lo tanto de una forma estable, se ha estimado la masa de travertinos a partir de los datos de las campañas de tomografía eléctrica realizadas previamente. Para ello, se ha realizado un tratamiento geoestadístico exhaustivo de dichos datos, se ha determinado la porosidad en cada unidad de travertinos mediante porosimetría de intrusión de mercurio y se ha empleado la densidad de la calcita. Además, los métodos estadísticos utilizados han permitido obtener un modelo 3-D de dicha formación carbonatada en el que se han definido la superficie de contacto entre ésta y el substrato y las superficies que separan las tres unidades que constituyen dicha formación.

Geostatistical Modelling of the Travertine Formation Associated with the Alicún de las Torres Thermal System by Using Electrical Tomography and Porosity Data

Prado Pérez, A. J.; Aracil, E.; Pérez del Villar, L.

79 pp. 73 fig. 10 tablas 23 refs.

Abstract:

In the framework of a Singular Strategic Project entitled: "Advanced Technologies of Carbon, Capture and Storage (CCS)I", supported by the MICINN (Spain) and the FEDER funds (EU), specifically in the Carbon Storage Task, a comprehensive study on the CO₂ leakage as DIG (Dissolved Inorganic Carbon) in the Alicun de Las Torres (Prov. of Granada) natural analogue thermal system was envisaged. This analogous system is characterised by the presence of a very important travertine formation, which can be considered as a permanent and stable sink for CO₂. Consequently, the estimation of the travertine mass has been a main objective of this investigation. For that, data from two complementary electrical tomography campaigns, previously treated by a powerful geostatistical tool, have been used, as well as the porosity average value of this travertine and the calcite density. Besides this, the statistical methodology applied has also allowed the establishment of a 3-D model of the travertine formation, displaying the geological contact between this formation and the underlying materials, as well as the contacts among the three units forming the travertine formation.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del Proyecto Singular Estratégico: “Procesos Avanzados de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂ (PSE-120000-2008-6), Subproyecto 3: Almacenamiento Geológico de CO₂, Línea de Análogos Naturales (PSS-120000-2008-31)”, financiado por el MICINN y los FONDOS FEDER. Los autores quieren agradecer a la Dra. R. Campos del CIEMAT y a su equipo de investigación las determinaciones de porosidad realizadas en muestras de travertinos, así como al equipo de AGS S.L. por la excelente labor realizada en el campo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	2
2. METODOLOGÍA	7
2.1 Tomografía eléctrica	7
2.2 Geoestadística	11
Análisis descriptivo de los datos.....	11
Análisis de la continuidad espacial	11
Predicción espacial	14
Validación del modelo	15
2.3 Porosimetría	16
3. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN	18
3.1 Interpretación General	18
Primera Campaña	18
Segunda campaña	31
3.2 Interpretación de detalle	43
3.3 Análisis geoestadístico	47
Análisis Geoestadístico General	47
<i>Análisis descriptivo de los datos</i>	47
<i>Análisis de la continuidad espacial</i>	55
<i>Predicción espacial</i>	59
<i>Validación del modelo</i>	60
Análisis Geoestadístico de detalle	64
<i>Análisis descriptivo de los datos</i>	64
<i>Análisis de la continuidad espacial</i>	66
<i>Predicción espacial</i>	67
<i>Validación del modelo</i>	68
4. CÁLCULO DEL VOLUMEN Y LA MASA DE TRAVERTINOS	70
5. CONCLUSIONES	77
6. REFERENCIAS	78

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Proyecto Singular Estratégico PSE 120000-2008-6 (08/184): "Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂", aprobado el 31 de Octubre de 2008 por el Ministerio de Ciencia e Innovación", contemplaba, en el subproyecto PSS 120000-2008-31: "Almacenamiento Geológico de CO₂", el estudio detallado del Análogo Natural de Escape de CO₂ en forma de DIC (Carbono Inorgánico Disuelto) del Sistema Termal de Alicún de Las Torres (Prov. de Granada), dentro del que destaca la precipitación, debida al escape de CO₂, de un gran volumen de CaCO₃ en forma de travertinos. Para conocer el comportamiento del Sistema como posible sumidero de CO₂, y poder estimar la cantidad total de C atrapado como mineral, se hizo imprescindible conocer el volumen de travertinos precipitados en la zona. Para ello, se procedió a analizar, usando técnicas geoestadísticas, los datos obtenidos de las campañas geoelectricas realizadas previamente en la zona. El objetivo principal de este trabajo era el de obtener un modelo 3-D detallado que permitiera, además de describir y entender cómo ha evolucionado la formación de dichos travertinos a lo largo de su historia geológica, aproximadamente 250.000 años, calcular el volumen total de estos materiales con la finalidad de cuantificar el C que ha sido atrapado en forma mineral y, por lo tanto, estable.

La zona de estudio está localizada geológicamente en el sector central de las Cordilleras Béticas, concretamente en el contacto entre sus dos grandes dominios: las Zonas Externas y las Zonas Internas. Este contacto se encuentra fosilizado por los materiales de relleno de la cuenca Guadix-Baza, una de las cuencas neógenas intramontañosas existentes en las Cordilleras Béticas, cuyo basamento comprende materiales carbonatados mesozoicos, que afloran hacia el norte (Zonas Externas), y materiales metamórficos, que afloran hacia el sur (Zonas Internas) (Fig.1)

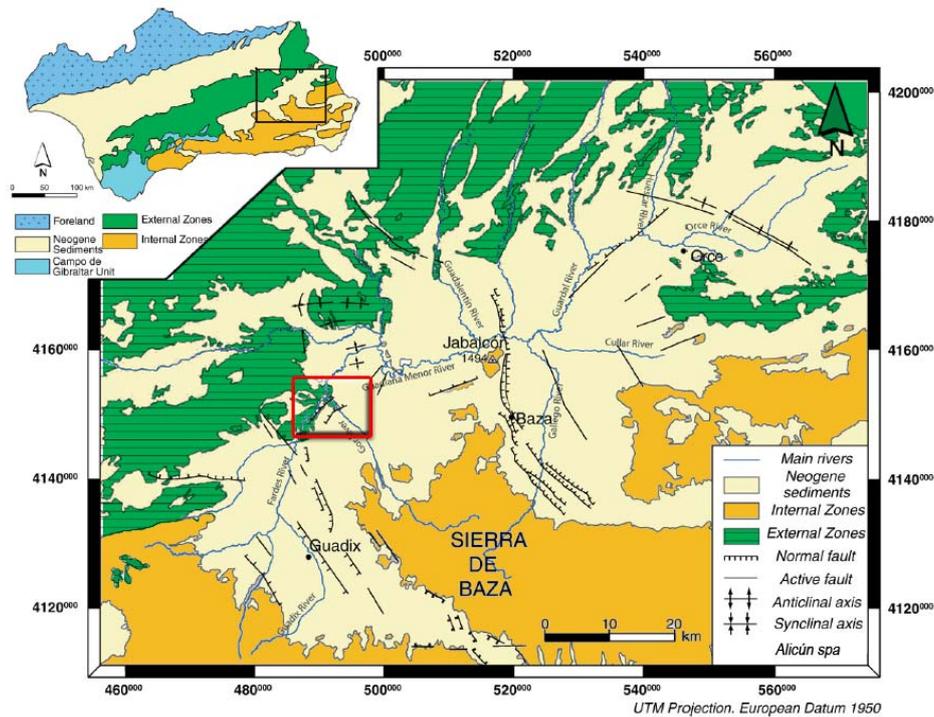


Fig. 1. Mapa geológico general de la cuenca Guadix-Baza, en el que se muestran los 3 grandes dominios que se distinguen en la zona de estudio y la localización de la zona del Sistema Termal de Alicún de las Torres (Pérez Peña et al., 2009, modificado)

La cuenca de Guadix-Baza se extiende a lo largo de unos 100km de longitud con una orientación principal NE-SO. En ella existen dos depocentros que se corresponden con las subcuencas de Guadix y Baza, localizados al SO y NE, respectivamente. Desde el punto de vista morfológico, la cuenca Guadix-Baza está limitada, al norte, por la Sierra de Cazorla; al sur y sureste, por las Sierras Nevada y Baza, respectivamente; todas ellas pertenecientes a las Cordilleras Béticas. Su morfología actual consiste en una plataforma que, con una altitud media de 1000m sobre el nivel del mar, está atravesada por una intensa red drenaje hacia el océano Atlántico, canalizada por el río Guadalquivir. Esta red de drenaje ha facilitado y facilita el desarrollo de importantes valles y cañones con una profundidad de hasta 200m.

La historia sedimentaria de la cuenca comenzó a mediados del Tortoniense con una etapa inicial de ambiente marino al que siguieron varios ciclos de sedimentación continental.

Como se ha comentado anteriormente, en el contacto entre las zonas externas e internas de las Cordilleras Béticas, y relacionadas con la falla de Cádiz-Alicante, aparece una serie de manantiales termales con un caudal que, en su conjunto, supera los 150L/s.

Estos manantiales se han aprovechado desde finales del siglo XIX para usos terapéuticos y medicinales. Asociados a ellos siempre aparecen formaciones de travertinos como ocurre en el caso del manantial de Alicún de las Torres, donde dichas rocas alcanzan, en su conjunto, aproximadamente 100 m de espesor, y que son las que han constituido el objeto del presente estudio. Su principal interés estriba en que es una formación que representa el efecto del escape de CO₂ en forma de DIC. Además, constituye una formación privilegiada para la realización de estudios paleoclimáticos, dadas sus características de espesor y continuidad lateral.

Estos travertinos se encuentran en la zona centro-occidental de la cuenca de Guadix-Baza, en el límite entre los materiales post-miocenos y los mesozoicos pertenecientes al Subbético (ver Fig. 1), y dispuestos discordantemente sobre materiales cretácicos y paleocenos. A lo largo y ancho del contacto entre los travertinos y estos materiales mesozoicos-paleógenos son frecuentes los depósitos de conglomerados poligénicos, fuertemente cementados, así como niveles arenosos con estructuras típicas de terrazas fluviales. La formación de travertinos está formada por tres unidades que se superponen parcialmente (Díaz Hernández et al., 2000 y 2006), y que son: la inferior, intermedia y superior.

La Unidad inferior tiene aproximadamente 40m de espesor y se dispone discordantemente, mediante una discordancia angular y erosiva, sobre los materiales finicretácicos del Subbético. Está formada por varios cuerpos sigmoidales que se solapan hacia el río Fardes y que son característicos de depósitos progradantes con morfología tipo *dam* y *cascade* (Pentecost y Viles, 1994)

La Unidad Intermedia se dispone parcialmente sobre la plataforma inferior y sobre el sustrato cretácico-paleoceno. Su espesor total es similar al de la plataforma inferior y destaca la existencia de abundantes tobas calcáreas.

La Unidad superior es la más potente y alcanza aproximadamente 60m de espesor. Se pone en contacto directo con el sustrato Subbético y está estructurada en 3 estratos compactos y masivos, de espesor decreciente hacia el techo, que progradan a morfologías en *cascade* hacia el valle del río Fardes.

Con el fin de: i) establecer el contacto entre la formación de travertinos y el substrato finicretácico del subbético; ii) determinar la geometría interna de cada una de las tres unidades que conforman la formación de travertinos; iii) definir las posibles relaciones entre ellas; y iv) determinar finalmente el volumen total de travertinos para calcular posteriormente la cantidad total de C retenido en forma mineral, la información obtenida a partir de la geología de superficie se complementó con dos campañas de geofísica, mediante tomografía eléctrica. Esta técnica fue elegida por los objetivos planteados, descritos anteriormente, la profundidad óptima de exploración que permite este método geofísico de exploración, y el contraste eléctrico entre la formación de travertinos y el substrato margoso del final del Cretácico. Para alcanzar dichos objetivos se emplearon técnicas geoestadísticas que han permitido, a su vez, determinar las similitudes y diferencias de los travertinos de cada unidad, el rango de variación de los espesores de las mismas, y la relación espacial entre ellas.

2. METODOLOGÍA

2. 1. Tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica registra la resistividad de los materiales que se exploran, la cual depende de varios factores que se explicarán a continuación y que están relacionados entre sí mediante la expresión [1]:

$$\rho = \frac{F}{V} \times \rho_w \times \frac{1}{F_s}$$

[1]

Donde: ρ es la resistividad de la roca; ρ_w es la resistividad del fluido contenido en los poros de la roca; v es el volumen relativo de huecos; F es el factor de formación, que depende de la forma y disposición de los poros; y F_s es el factor de saturación, que depende, a su vez, del grado de saturación de los poros.

En la zona de saturación, por debajo del nivel freático, el valor del parámetro F_s es 1 ya que todos los poros están rellenos de agua. Por encima de este nivel, el valor de F_s dependerá de la capacidad de la roca para almacenar agua. Por ejemplo, para las gravas y arenas gruesas dicho parámetro presenta valores que oscilan entre 0.01 y 0.40, mientras que para rocas capaces de almacenar agua por capilaridad, como las arcillas, dicho parámetro alcanza un valor de hasta 0.60.

Estos factores son los que determinan el comportamiento eléctrico de los diferentes materiales geológicos. Por lo tanto, una campaña de prospección geoelectrica mediante tomografía eléctrica permitirá la determinación de los diferentes valores de resistividad que, por atribución, permitirán identificar: i) las unidades litológicas de distinta naturaleza, como son arcillas, margas, calizas, etc.; ii) los aspectos estructurales, como fallas y pliegues; y iii) los rasgos geomorfológicos de los materiales investigados, como son cuevas y rellenos.

El trabajo de campo realizado en la zona investigada totalizó 21 perfiles eléctricos distribuidos en dos campañas. En la primera, realizada en Febrero de 2009, se hicieron 11 perfiles con una separación de electrodos de 10m para investigar la zona hasta profundidades superiores a 100m. Los resultados obtenidos permitieron diseñar la segunda campaña que, llevada a cabo en el mes de Marzo, consistió en la realización de 10 perfiles

con una separación de electrodos de 5m, lo que permitió alcanzar una mayor resolución dentro del margen de profundidad requerido en el estudio, inferior a 70m.

La posición de los perfiles de ambas campañas (Fig. 2) estuvo condicionada por las características morfológicas del terreno, mientras que la posición de los perfiles de la segunda lo estuvo, además, por los resultados de la primera.

Las características de cada uno de los perfiles realizados se resumen así:

- i) Los perfiles 1, 2, 4, 6, 10 y 11 tienen una longitud de 470m, una separación entre electrodos de 10m, 48 electrodos por perfil y 2.920 cuadripolos, dispositivo que permitió una profundidad máxima de exploración de 110m.
- ii) El perfil 3 tiene una longitud de 420 m, 43 electrodos separados entre sí 10 m, y 2510 cuadripolos de medida, dispositivo que permitió una profundidad máxima de exploración de 90m.
- iii) Los perfiles 5 y 7 tienen 410m de longitud, 42 electrodos separados entre sí 10m, y 2,450 cuadripolos de medida, lo que permitió una profundidad máxima de exploración de 90m.
- iv) El perfil 8 tiene una longitud de 390 m, 40 electrodos separados entre sí 10m y, 2,400 cuadripolos de medida, permitiendo explorar hasta 85m de profundidad.
- v) El perfil 9 tiene una longitud de 400m, 41 electrodos separados entre sí 10m, y 2,425 cuadripolos de medida, con lo que se alcanzaba una profundidad máxima de investigación de 90 m.
- vi) Los perfiles 12, 13 y 17 tienen una longitud de 175 m, 36 electrodos separados entre sí 5m, con 1,120 cuadripolos de medida, dispositivo que permitió explorar hasta 40m como profundidad máxima.
- vii) Los perfiles 14, 15, 16 y 19 tienen una longitud de 355m, con 72 electrodos separados entre sí 5m, y con 2,250 cuadripolos de medida, esquema idóneo para investigar una profundidad máxima de 75m.

viii) Los perfiles 18, 20 y 21 tiene una longitud de 256m, 54 electrodos separados entre sí 5m, con 1,840 cuadripolos de medida, permitiendo una profundidad máxima de investigación de 80m.

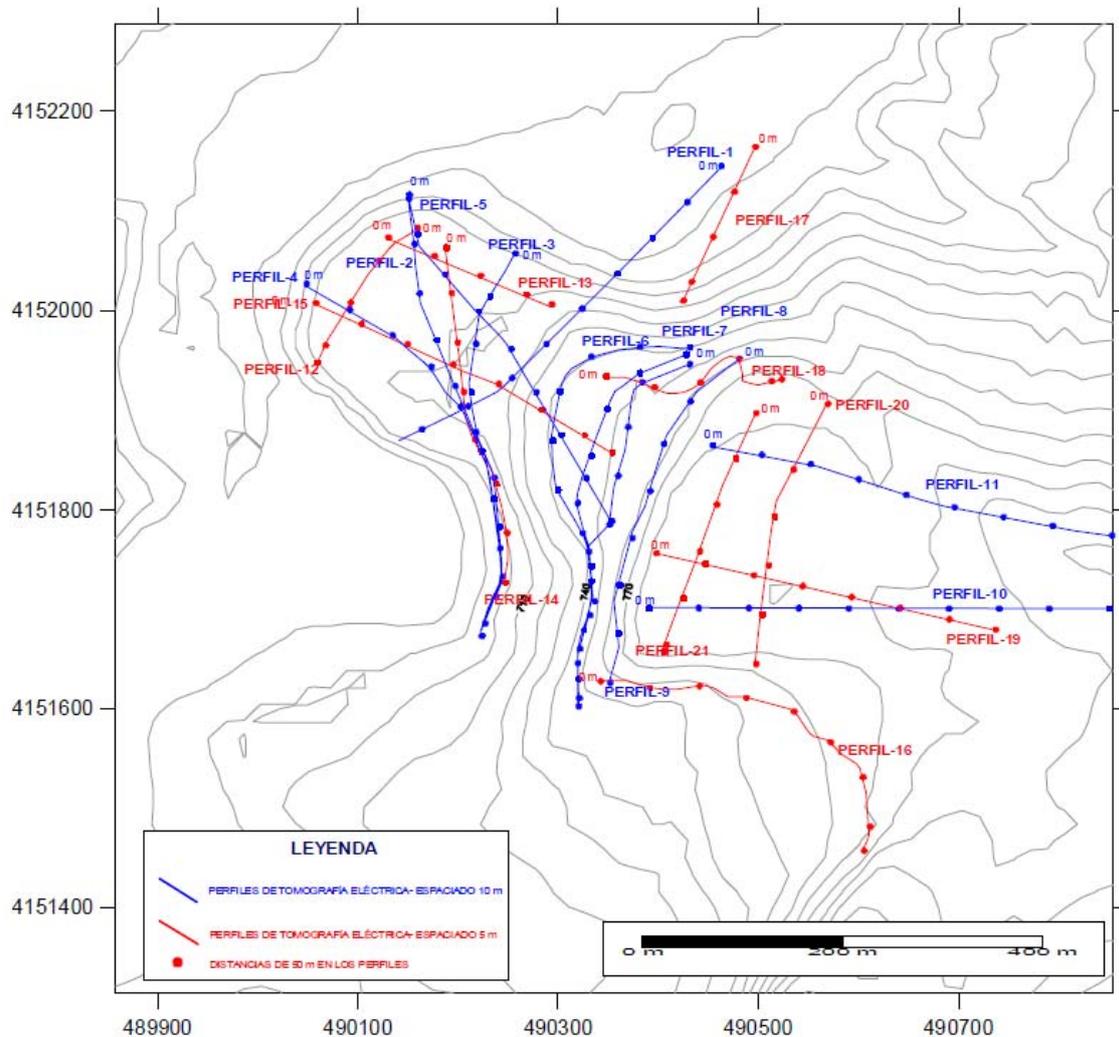


Fig. 2. Mapa topográfico de la zona estudiada en el que se localizan los perfiles eléctricos realizados en las dos campañas. En azul, los perfiles de la primera campaña con separación de electrodos de 10 m; y, en rojo, los perfiles de la segunda con separación de electrodos de 5 m.

Todos los perfiles se realizaron con doble configuración, por un lado, con la Dipolo-Dipolo, que permitió definir mejor las posibles cavidades y la posición de las fracturas y, por otro, con la configuración Schlumberger-Wenner, que permitió definir más exactamente los contactos y superficies con tendencia a la horizontalidad. El equipo empleado fue el resistímetro SYSCAL 72 Pro digital, fabricado por IRIS INSTRUMENTS (Orleáns, Francia)

Los perfiles de tomografía eléctrica, una vez registrados, fueron procesados independientemente. Durante este primer proceso se realizó:

- **El filtrado de los valores erróneos:** entre los miles de valores de resistividad que se midieron en cada perfil algunos de ellos eran anómalos. Estos últimos constituyen un porcentaje mínimo y se caracterizan por ser negativos ($<0 \text{ ohm}\times\text{m}$) o mayores de $10,000 \text{ ohm}\times\text{m}$. También se consideraron erróneos aquellos cuyo porcentaje de error era mayor del 1%, valor máximo que se considera aceptable en este tipo de trabajos.
- **La representación de los datos de resistividad en perfiles:** los valores de resistividad, una vez procesados y filtrados, se trataron mediante el *software* *res2dinV*® que permitió visualizarlos en perfiles. En estos perfiles se adjunta una regleta de colores que se corresponden con diferentes valores de resistividad. Cada regleta, en este primer procesado, es específica para cada perfil.
- **La unificación de colores de la regleta:** con el fin de que los valores de todos los perfiles de una misma zona pudieran ser comparados, se realizó un reprocesado mediante el cual esas regletas de colores específicas para cada perfil se unificaron, de manera que cada color representara el mismo valor de resistividad en todos los perfiles.
- **La corrección topográfica:** los perfiles, una vez procesados, mostraban una topografía plana o nivel “0”. Para corregirlos, se introdujo la topografía de la línea por la que se realizó el perfil para adaptarlo a la morfología del terreno, proporcionándole así sus correspondientes cotas absolutas.
- **Procesado de detalle:** las zonas con mayor incertidumbre se reprocesaron mediante el estudio detallado de dichas áreas. El trabajo principal consistió en modificar la regleta de resistividades, acotándola a los valores de resistividad de las zonas que interesaban en cada momento; de tal manera que permitiera el estudio de detalle de éstas.

2. 2. Geoestadística

Tras el procesado inicial descrito, cada perfil se analizó independientemente mediante la interpretación geológica del mismo, lo que ha permitido delimitar el contacto entre los travertinos y los materiales del substrato. En total se obtuvieron 711 puntos de contacto, los cuales son el resultado de seleccionar un punto cada 10 metros en los perfiles de la primera campaña, y cada 5 metros en los de la segunda. Estos 711 datos se exportaron a ArcGIS® mediante el cual se realizó el análisis geoestadístico en 4 etapas:

1. **El análisis descriptivo de los datos:** el primer paso de todo estudio geoestadístico consiste en realizar un análisis previo de los datos y en describirlos estadísticamente mediante el análisis del promedio, dispersión y forma de la variable estudiada, que en este caso se trata de la cota del contacto entre los travertinos y el substrato subbético. Esta etapa se ha realizado usando el *software* SPSS®, con el que se han calculado los principales estadísticos descriptivos y elaborado los diagramas de Tuckey. En esta etapa se ha realizado también un análisis de tendencias para identificar posibles pautas predeterminadas en la variable estudiada. Esta etapa, pese a ser necesaria en cualquier estudio estadístico, aporta poca información acerca de la variable y de su comportamiento en el espacio. Por lo tanto, se ha realizado una predicción espacial de los valores que adquiriría la variable estudiada mediante las técnicas geoestadísticas que se describen a continuación.
2. **El análisis de la continuidad espacial:** también denominado análisis estructural o estudio variográfico (Armstrong y Carignan, 1997), que consiste en el cálculo del semivariograma experimental y el ajuste a éste de un modelo teórico conocido.

El cálculo del semivariograma experimental es la etapa geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado (Chica, 1987). Es decir, ayuda a tener conocimiento de cómo la variable cambia de una localización a otra (Lamorey y Jacobsom, 1995; Issaks et al., 1999). Por lo tanto, es la herramienta más importante de la que se dispone en geoestadística para el estudio de la

distribución espacial de la variable en estudio (Sahin et al., 1998; Genton, 1998a).

El variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados una distancia h (Journel y Huijbregts, 1978) o, lo que es lo mismo, la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia h [2].

$$\text{Var}\{Z(x+h)-Z(x)\} = 2\gamma(h) \quad [2]$$

La función $\gamma(h)$ se denomina semivariograma, la cual puede ser obtenida mediante la expresión [3]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad [3]$$

Donde: $Np(h)$ es el número de pares a la distancia h .
 h es la separación entre el par de puntos.
 $Z(x_i)$ son los valores experimentales.
 x_i localizaciones donde son medidos los valores $z(x_i)$.

Esta expresión de $\gamma(h)$ representa la herramienta más importante en todo estudio geoestadístico (Armstrong y Carignan, 1997; Weerts, y Bierkens, 1993; Chica, 1987). Su cálculo no consiste en una simple evaluación de su expresión, según se plantea en Krajewski y Gibbs (1993); Journel y Huijbregts (1978); Xie y Myers (1995 a y b) y Pannatier (1993), si no que está relacionada con los elementos siguientes:

- La dirección en la que será calculado el semivariograma, que viene definida por uno o dos ángulos que determinan una dirección en el espacio α y/o β con tolerancias angulares $d\alpha$ y/o $d\beta$. El semivariograma calculado usando tolerancia angular de 90° se denomina semivariograma omnidireccional y permitirá realizar un análisis previo del comportamiento de la variable en todas las direcciones del espacio.
- El incremento o paso en el cálculo del semivariograma h .

- Una distancia, que representa la distancia máxima a la que pueden estar alejados los segundos puntos del par con respecto a la línea que define la dirección de cálculo, conocida como ancho de banda.
- La distancia L_{\max} hasta la cual será calculado del semivariograma. Se recomienda que ésta sea la mitad de la distancia entre las muestras más alejadas (Armstrong y Carignan, 1997; Krajewski y Gibbs, 1993), aunque dependiendo de la geometría del fenómeno regionalizado, puede ser calculado, en algunos casos, hasta una distancia superior.

La Fig. 3 muestra un ejemplo de un semivariograma experimental y el modelo teórico ajustado.

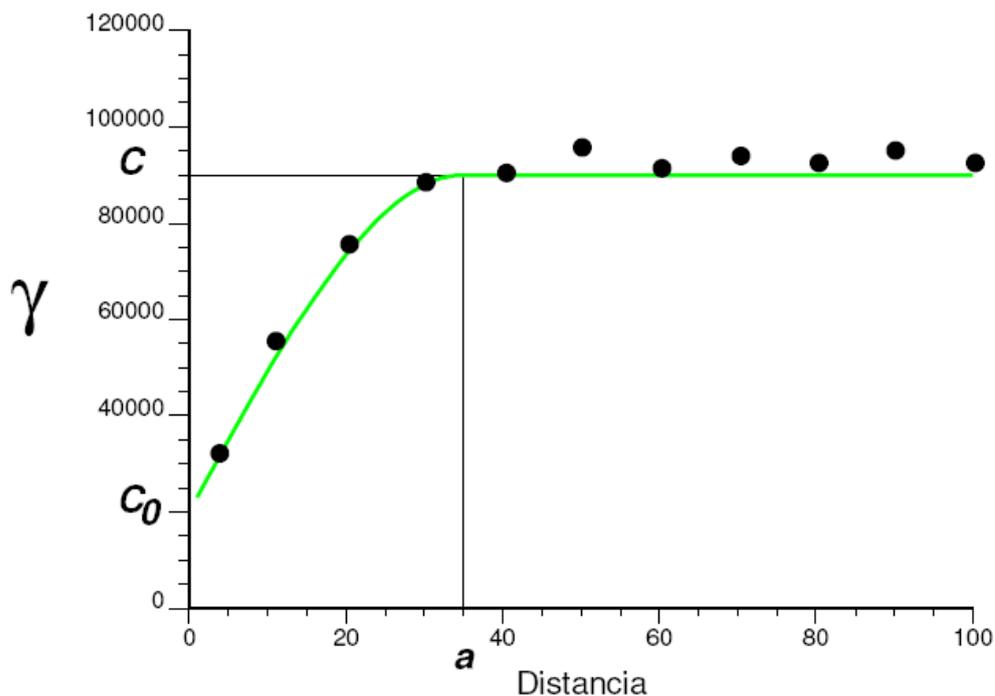


Fig. 3. Semivariograma experimental (puntos negros) y modelo teórico ajustado al mismo (en verde). Los principales parámetros que definen un semivariograma teórico son: el alcance (a), que es la distancia a partir de la cual se estabiliza el semivariograma y representa la zona de influencia de un dato y la distancia a partir de la cual no existe correlación; la meseta (c), que es el valor constante que toma el semivariograma a distancias mayores del alcance; y el efecto pepita (C_0), que es el valor del semivariograma a pequeñas escalas.

Inicialmente se calcula el semivariograma omnidireccional que proporciona una idea inicial de la variabilidad espacial de los datos, siendo el más idóneo para representar y obtener una estructura clara y definida. Posteriormente, los

semivariogramas deben ser calculados en diferentes direcciones. Seguidamente, y para certificar la existencia de posibles anisotropías, se calcula el Mapa de Variogramas o superficie variograma, que es un gráfico en 2 dimensiones en el que se representan los valores del semivariograma experimental para todos los vectores de separación posibles (Frykman y Rogon, 1993; Homand-Etienne et al., 1995; Isaaks et al., 1999) Ésta es una herramienta importante que permite, además de analizar dichas anisotropías si existieran, obtener la dirección inicial aproximada para el cálculo de los semivariogramas direccionales. En este caso particular ha sido suficiente calcular dos semivariogramas separados entre sí 90°.

Este semivariograma experimental no se utiliza en el proceso de estimación, sino que a éste se deben de ajustar uno a varios modelos teóricos que permitan obtener un modelo o función analítica que caracterice la continuidad espacial de la variable estudiada. En general, el ajuste a modelos teóricos para la determinación de los parámetros del semivariograma se realiza de forma visual.

Finalmente debe obtenerse uno o varios modelos de variogramas con los correspondientes valores de meseta y alcance. El modelo de variograma seleccionado debe representar fielmente los aspectos que se suponen importantes del variograma experimental (Wackernagel, 1995), que serán usados posteriormente en el proceso de estimación o simulación.

3. **La predicción espacial:** la información acerca de los datos y el modelo de continuidad espacial ha permitido realizar la estimación de los valores en lugares donde no se disponía de datos procedentes de la tomografía eléctrica.

En este estudio se ha seleccionado el “*krigeado*” como algoritmo interpolador, el cual predice los valores de las variables estudiadas mediante una suma ponderada de los valores medidos. Esta ponderación se realiza mediante el cálculo de unos coeficientes de ponderación (λ_a) que no sólo dependen de la distancia de los puntos a estimar con respecto a los puntos medidos, sino que también tiene en cuenta el comportamiento espacial de la variable, el cual viene determinado por el semivariograma teórico seleccionado en la etapa del análisis espacial.

El “*krigeado*” tiene dos objetivos principales: el primero es que la varianza del error cometido en la estimación sea mínima ($\text{Var}[Z^*(v) - Z(v)] = \min \sigma^2$), y el segundo, que el estimador hallado no esté sesgado ($E[Z^*(u) - Z(u)] = 0$), por lo que se le puede considerar uno de los mejores interpoladores. Otra de las ventajas del “*krigeado*” es la posibilidad de estimar la incertidumbre local para los valores estimados, haciendo los mapas de predicción de error.

Entre los diferentes estimadores existentes, en este trabajo se ha seleccionado el “*krigeado*” ordinario ya que admite que la tendencia general de los valores puede fluctuar suavemente dentro del vecindario que contiene los datos que intervienen en cada estimación, de forma que el valor esperado de la variable es constante, pero, a diferencia del “*krigeado*” simple, no se conoce su valor. Este estimador seleccionado responde a las ecuaciones [4, 5 y 6]:

$$\text{Estimador:} \quad Z^*(v) = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad [4]$$

$$\text{Sistema:} \quad \begin{aligned} \sum \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu &= \gamma(x_j, v) \quad [5] & j = 1, \dots, n \\ \sum \lambda_i &= 1 \end{aligned}$$

$$\text{Varianza de krigeaje:} \quad \sigma^2 = \sum \lambda_i (\gamma(x_i, v) - \gamma(v, v) + \mu) \quad [6]$$

Donde: $Z^*(v)$ representa el valor estimado de la variable; λ_i son los coeficientes de ponderación desconocidos a priori; γ es la matriz del sistema que caracteriza la correlación entre los datos; y $Z(x_i)$ los valores muestreados.

4. **Validación del modelo:** antes de elaborar la superficie final, se debe tener una idea de la validez o no del modelo espacial elaborado, y de cómo estima este modelo los valores de la variable en las localizaciones donde no existen datos experimentales. Para ello, aquí se ha usado el método de la validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989; Cressie y Noel 1993; Goovaerts 1997; Stein 1999), ya que ayuda a decidir y a considerar, como mejor estimador, uno de los modelos elaborados en la etapa anterior. Este procedimiento omite un punto experimental de tomografía y recalcula el valor de la variable en dicho punto sin tenerlo en cuenta para realizar el cálculo. Este proceso lo realiza para todos los puntos medidos con el fin de comparar el valor medido mediante tomografía con el estimado, calculando así una serie de estadísticos (error medio, raíz cuadrada del error medio, error medio estandarizado y la raíz cuadrada del error medio estandarizado) y gráficos (valor estimado-valor

real; error; error estandarizado y gráfico QQ de los errores) que permiten evaluar la calidad del modelo seleccionado para la elaboración de la estimación.

2. 3. Porosimetría

Para la determinación de la porosidad y de la distribución del tamaño de poro en 26 muestras de las tres unidades diferenciadas en la formación de travertinos se ha utilizado la técnica de porosimetría por intrusión de Hg, utilizando un porosímetro Micromeritics, modelo AutoPore, Serie IV 9500, el cual permite, mediante la intrusión forzada de Hg, la medida del diámetro de los poros de una roca en el rango comprendido entre 0.003 y 36 μ m, trabajando a unas presiones máximas de 33,000psia.

El método empleado para la preparación de las muestras y para su medida se ajusta al procedimiento descrito en AutoPore IV 9500, Operator's manual V1.09. Los parámetros que se han medido en este trabajo son:

- a) Volumen total de Hg intruido (mL/g)
- b) Área total de poros (m²/g)
- c) Radio medio de los poros (volumen) (μ m)
- d) Radio medio de los poros (área) (μ m)
- e) Radio medio de poro (2V/A) (μ m)

El método de medida está basado en los fenómenos de capilaridad generados por los líquidos que no mojan a los sólidos con los que se ponen en contacto. Así, el Hg, que no penetra espontáneamente en los conductos capilares de la roca, precisa de una presión para introducirse, presión que es inversamente proporcional al diámetro (D) de dichos conductos. Para el caso del Hg y de poros cilíndricos, el valor de D viene expresado por la ecuación [7]

$$D = - 4 \gamma \cos \theta / P \quad [7]$$

En la que (P) es la presión aplicada; (D) es el diámetro de poro; (θ) es el ángulo de contacto entre el sólido y el Hg; y (γ) la tensión superficial del fluido, en este caso la del Hg, que varía con su pureza. Normalmente se acepta el valor de 484dinas/cm. El ángulo de contacto (θ) también en función de la composición del sólido, pero se recomienda un valor de 130° si no se tiene otra información adicional que indique lo contrario.

La medida de la porosidad se realiza a partir del volumen de Hg que penetra en los poros de la roca en función de la presión aplicada. Este método permite conocer el volumen de la muestra (V_k) y el volumen de los poros rellenos con Hg (V_p), por lo que la porosidad efectiva E (%) se determina a partir de la ecuación [8], mientras que la porosidad total PT se calcula mediante la ecuación [9]

$$E = 100 \times V_p/V_k \text{ [8]}$$

$$PT = 100 \times (1 - D_b/D_r) \text{ [9]}$$

En la que (D_b) es la densidad del conjunto, determinada como la relación entre la masa seca y el volumen de la muestra, y (D_r) es la densidad real de la muestra determinada mediante picnometría de He.

La preparación y medidas de la porosidad se han realizado en el laboratorio de propiedades físicas de las rocas de la Unidad de Integración de Sistemas Geológicos del Dpto. de Medio Ambiente del CIEMAT.

3. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

3. 1. Interpretación general.

Los resultados obtenidos a partir de la exploración de la formación de travertinos mediante tomografía eléctrica se han clasificado en dos tipos: los primeros, relacionados con los perfiles de resistividad, se han interpretado en términos de unidades litológicas con características eléctricas diferentes y, los segundos, con el cálculo volumétrico de las unidades de travertinos diferenciadas en la zona.

Como se ha comentado en el apartado de Metodología, para la investigación de la formación problema se han realizado dos campañas (Figs. 4 y 27), por lo que la interpretación y la discusión de los resultados se va a realizar, en una primera aproximación, separadamente y perfil por perfil

Primera campaña

Así, de la primera campaña, que totalizó 11 perfiles (Fig. 4), en los que la separación de electrodos fue de 10m, se ha la siguiente información:

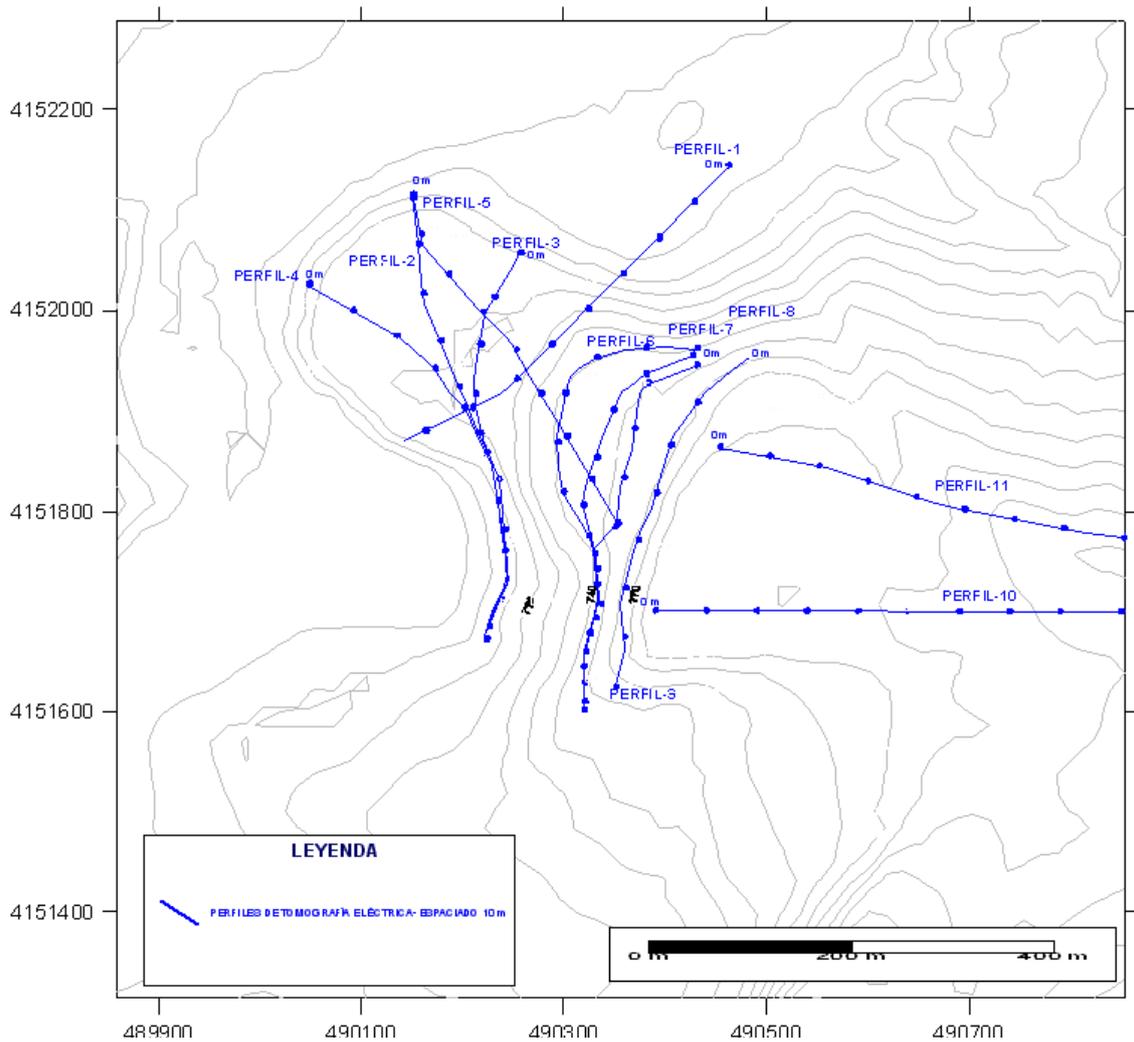


Fig. 4. Mapa topográfico con la representación de los perfiles de tomografía eléctrica realizados en la primera campaña..

El **perfil 1** (Figs. 5 y 6) representa un corte transversal a la unidad inferior de travertinos, siendo su principal interés el que permite, por un lado, comprobar el espesor de esta unidad y, por otro, analizar la relación existente entre ésta y los materiales margosos del sustrato.

El inicio de este perfil se localiza al SO de la zona y el final hacia el NE (ver Fig. 4). Tiene una longitud de 470m y permitió una profundidad máxima de exploración de 110m.

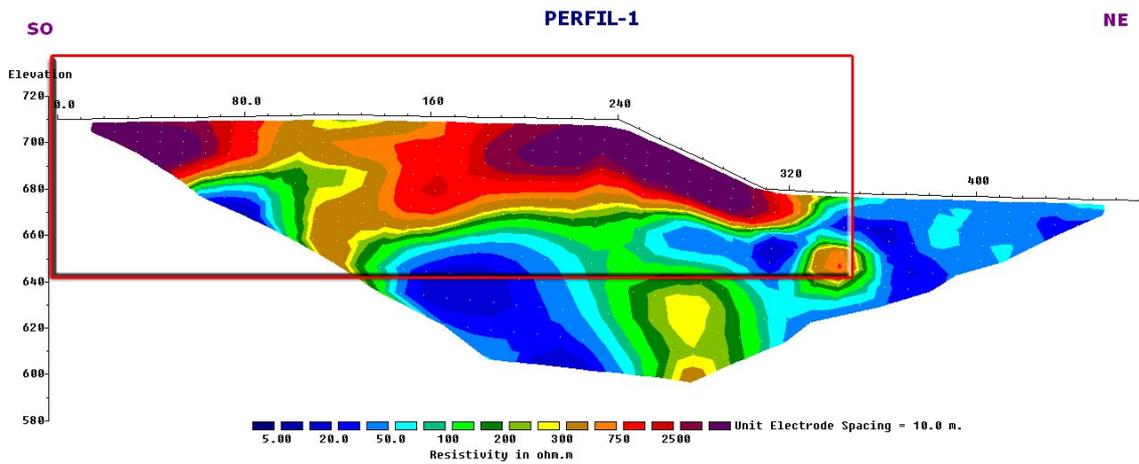


Fig. 5. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 1 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig.6.

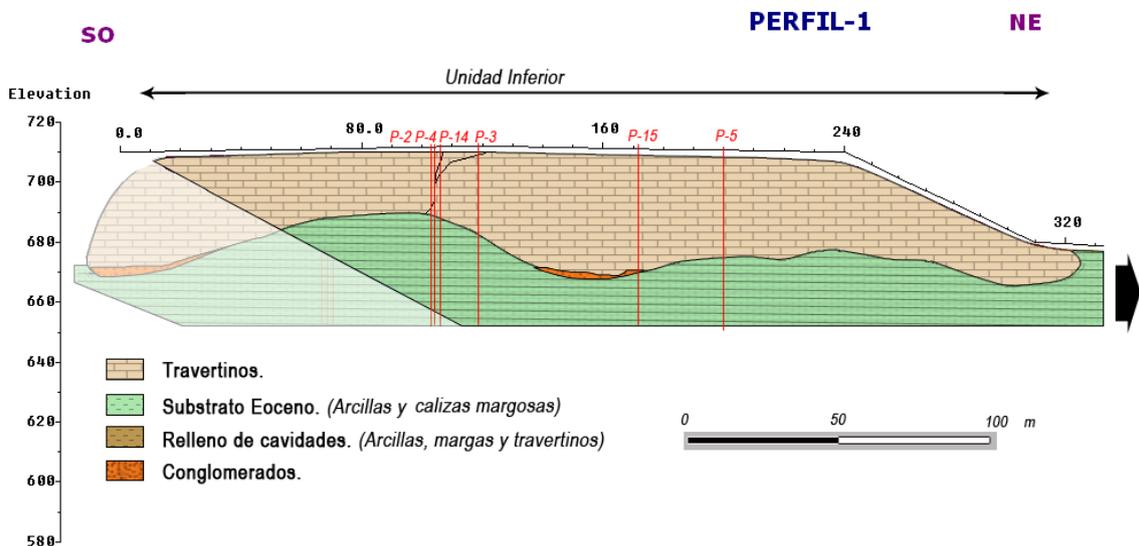


Fig. 6. Interpretación geológica del perfil 1.

La diferencia de resistividades observadas en profundidad permite diferenciar los travertinos de los materiales calcáreo-margosos del sustrato y, por lo tanto, la cota del muro de los primeros, la cual, en este perfil, varía entre 668 y 690 m, con un valor medio de 673 ± 7 m. Hacia el SO del perfil, esta cota asciende hasta los 690 m. El techo de la unidad, que coincide con la superficie topográfica, es bastante constante y se sitúa aproximadamente en la cota de 710 m. De este modo, el espesor de la unidad de travertinos a lo largo del perfil varía entre 40 m, hacia el NE, y 25 m hacia el SO.

Aunque el contraste de resistividades entre la unidad de travertinos y el sustrato margoso es evidente, en la zona con resistividades más bajas (sustrato margoso) existe un núcleo

con resistividades mayores que se ha interpretado como una intercalación carbonatada, que, a su vez, son muy frecuentes en la formación margosa, y cuyo buzamiento hacia N-NO es similar al de la estructura más resistiva que aparece en este perfil. En el campo, concretamente en el contacto entre los travertinos y las margas subyacentes, se ha identificado la existencia un nivel de conglomerados muy cementados y discontinuos que podría ser el responsable de los valores tan altos de resistividad que aparecen en algunas zonas de dicho contacto.

El **perfil 2** (Figs. 7 y 8) representa un corte longitudinal de la unidad inferior de la formación de travertinos, y permite delimitar el contacto entre esta unidad carbonatada y el sustrato eoceno.

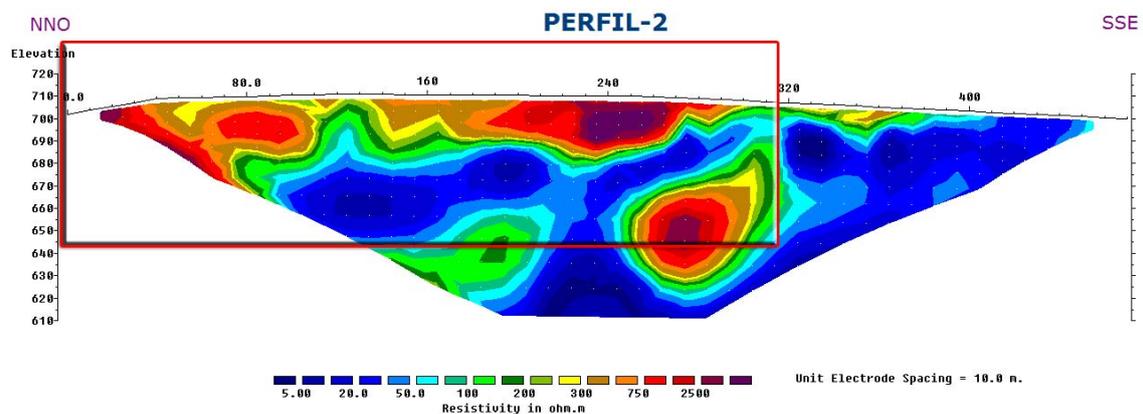


Fig. 7. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 2 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 8.

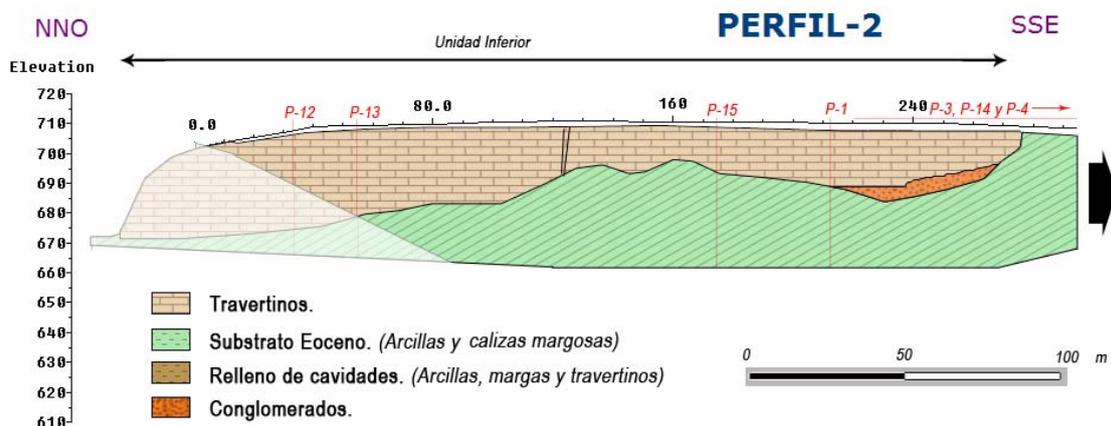


Fig. 8. Interpretación geológica del perfil 2. Obsérvese la localización de los conglomerados depositados por el río Fardes antes de la formación de los travertinos.

El inicio de este perfil (ver Fig. 4) se encuentra al NNO de la unidad explorada (electrodo 1) y el final en el SSE de la misma (electrodo 48). Al igual que el perfil 1, el 2 tiene una longitud de 470m y alcanzó una profundidad máxima de exploración de 110m.

La diferencia de resistividades en profundidad permite identificar la cota del muro de la unidad explorada de travertinos, que en este perfil se sitúa entre 680 y 705m, dependiendo del punto, con una cota media de 689 ± 7 m. El techo, que coincide también con la superficie topográfica, tiene una cota constante en torno a los 705m. En consecuencia, el espesor medio de esta unidad a lo largo del perfil 2 es de unos 20m, espesor que disminuye progresivamente hasta desaparecer hacia el SSE, donde los materiales se ponen en contacto con las margas eocenas del sustrato.

Los travertinos están presentes en superficie desde el inicio del perfil hasta el metro 270 aproximadamente, y presentan valores altos de resistividad aparente, estando los más altos ($>2.500\text{ohm}\times\text{m}$) localizados entre los metros 0-40 y 220-270 del perfil. Alrededor del metro 125 del inicio del perfil se detectan unas anomalías que podrían corresponder con unas discontinuidades que tendrían buzamientos aparentes hacia el SSE y vertical, respectivamente.

El **perfil 3** (Figs. 9 y 10) representa un corte transversal de la unidad inferior, que además de definir la cota del muro de los travertinos, permite conocer la relación lateral entre los materiales cuaternarios y las margas eocenas.

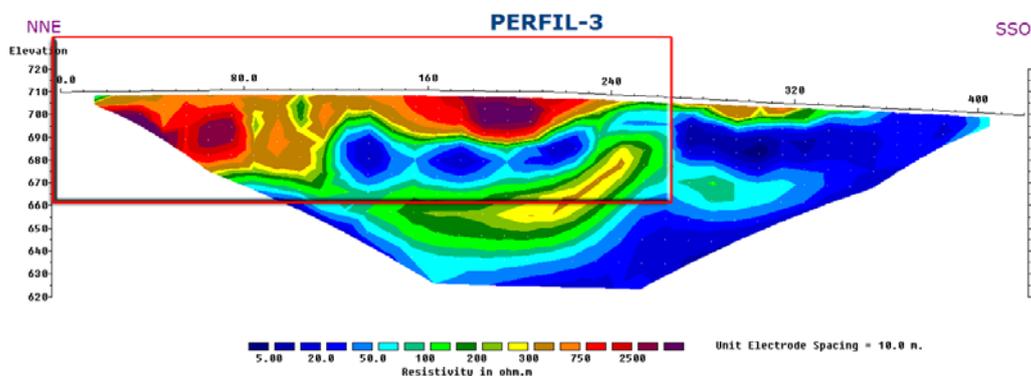


Fig. 9. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 3 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 10.

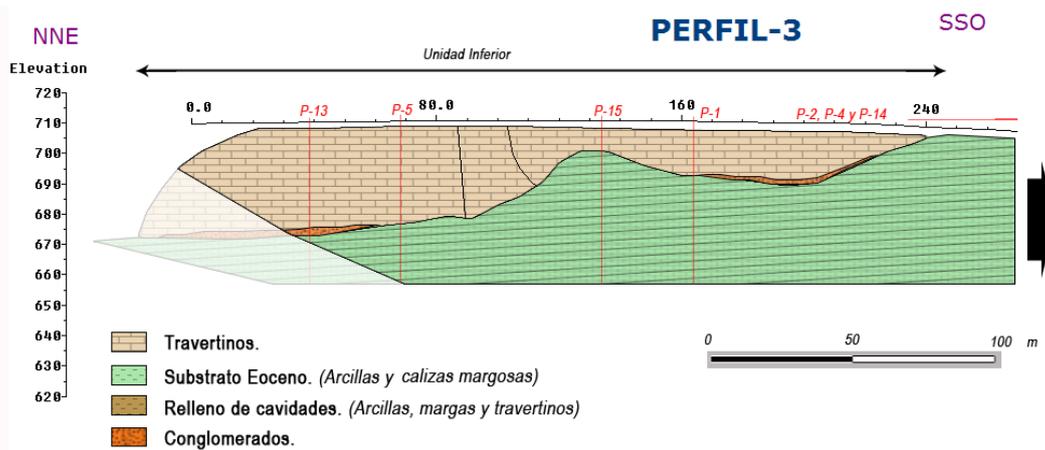


Fig. 10. Interpretación geológica del perfil 3. Obsérvese la localización y la morfología lenticular, adaptada al paleorrelieve, de los conglomerados depositados por el río Fardes antes de la formación de los travertinos

El inicio de este perfil se encuentra al NNE de la plataforma explorada (electrodo 1) y el final en el SSO de la misma (electrodo 43). Tiene una longitud de 420 m, y ha permitido la exploración de una profundidad máxima de 90m. La cota del muro de los travertinos varía entre 675m, en la zona norte, y 707m, en la zona sur. La cota media es de 686 ± 10 m, similar a la encontrada en el perfil 2. La cota del techo de la formación es idéntica a la de los perfiles 1 y 2, por lo que el espesor de esta unidad tiene unos 35m desde el inicio del perfil hasta el metro 120. A partir de este punto la potencia se reduce aproximadamente a unos 10m aproximadamente debido al alto que se observa en el paleorrelieve subyacente (ver Fig.10) Sin embargo, desde el metro 160 al 200 la potencia vuelve a aumentar hasta aproximadamente 20m. A partir de ese punto, la potencia disminuye rápidamente hasta desaparecer hacia el S, concretamente a la altura del metro 240.

Esta unidad inferior de la formación de travertinos aflora desde el inicio del perfil hasta el metro 240, presentando, en su conjunto, valores altos de resistividad, especialmente entre los metros 0 y 80 y entre los metros 170 y 220 del perfil. En esos intervalos la resistividad alcanza valores superiores a $2,500 \text{ ohm} \times \text{m}$, lo que podría significar la presencia de oquedades en el material, y/o a la existencia de los niveles de conglomerados de la base. En los metros 85 y 105 de este perfil también se han detectado varias anomalías que, por su relativa baja resistividad y morfología perpendicular al contacto entre los travertinos y las margas, podrían corresponder a sendas discontinuidades. El paquete más resistivo que existe por debajo de las margas del sustrato se corresponde con las intercalaciones

carbonatadas, muy estratificadas, que existen en dicha formación margosa y que buzanan hacia el NO.

El **perfil 4** (Figs. 11 y 12) tiene unas características similares a las descritas para los perfiles 2 y 3. Representa un corte longitudinal NO-SSE de la plataforma inferior que, con orientación NO-SSE, tiene una longitud de 470m. La profundidad máxima de exploración alcanzada en este perfil fue de 110m. A partir de la distribución de los valores de resistividad se deduce que la cota del muro de la formación de travertinos varía entre 672 y 707m, con una media de 685 ± 7 m. El espesor de la unidad a lo largo del perfil es de 25m, disminuyendo hacia el SSO hasta el contacto con las margas paleocenas. En su inicio es donde se registra el mayor espesor de travertinos que es del orden de 35m.

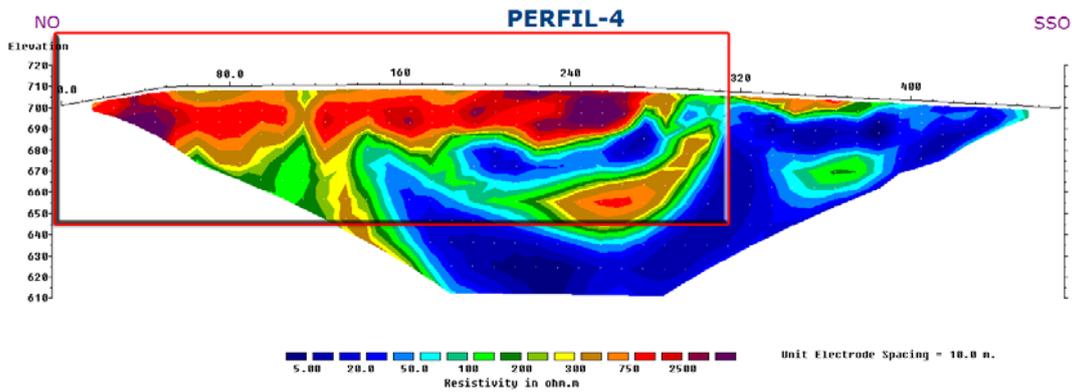


Fig. 11. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 4 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 12.

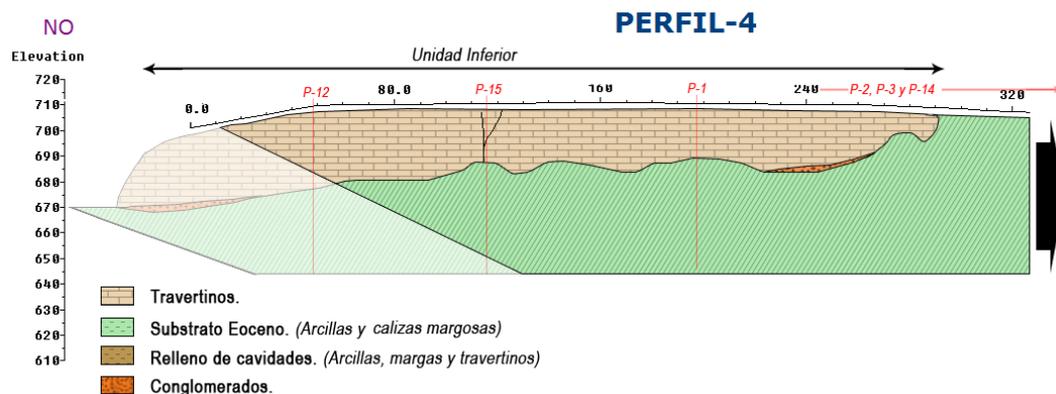


Fig. 12. Interpretación geológica del perfil 4. Obsérvese la localización y la morfología lenticular, como en los perfiles anteriores, de los conglomerados depositados por el río Fardes antes de la formación de los travertinos.

La formación de travertinos presenta una morfología similar a la definida en los perfiles anteriores, y aflora desde el inicio del perfil hasta el metro 290, punto en el que se localiza

el contacto con el sustrato eoceno. Se trata de una unidad con valores de resistividad altos, aunque en su interior se han observado zonas con resistividades anómalamente bajas ($< 700\text{ohm}\times\text{m}$) que podrían corresponder a discontinuidades parcialmente rellenas con materiales margosos. Estas zonas se localizan en las proximidades de los metros 115 y 140, contados desde el inicio del perfil. Ambas anomalías presentan un buzamiento aparente subvertical. Sin embargo, las zonas que presentan valores mayores de resistividad están localizadas entre los metros 0-60 y 210-270 del perfil, siendo estos valores superiores a $2,500\text{ohm}\times\text{m}$, lo que podría interpretarse como un material compacto resistivo con posible presencia de oquedades. Por debajo de los materiales margosos, se vuelve a manifestar, al igual que en los perfiles anteriores, el paquete carbonatado con buzamiento NO que estaría intercalado en las margas finicretácicas.

El **perfil 5** (Figs. 13 y 14) tiene un interés especial ya que es el único de la primera campaña que atravesó la unidad inferior y la intermedia. Representa un corte longitudinal a ambas unidades orientado NNO (electrodo 1)-SO (electrodo 42) y que permite entender la relación existente entre ambas. Tiene una longitud de 410m y ha permitido una profundidad máxima de exploración de 90m.

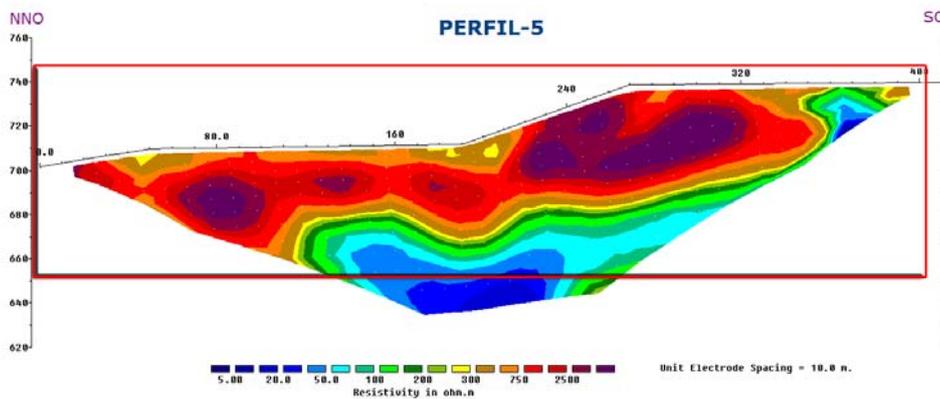


Fig. 13. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 5 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 14.

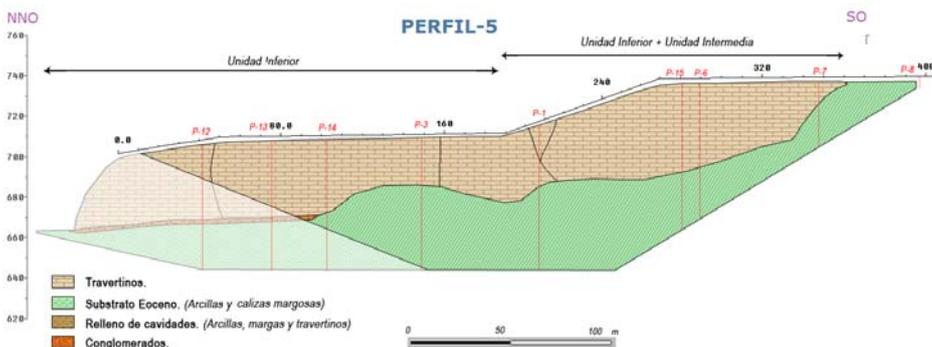


Fig. 14. Interpretación geológica del perfil 5. Obsérvese la localización en el extremo NNO de los conglomerados depositados por el río Fardes antes de la formación de los travertinos

La cota del contacto entre los travertinos y las margas finicretácicas se sitúa entre los 667 y los 700m, observándose un ligero ascenso de ésta desde el NNO al SO, lo que se refleja también en los perfiles 6, 7 y 8, como se verá más adelante. La cota del techo asciende desde 710m, que es la cota del techo de la plataforma inferior, hasta aproximadamente 740 m, que es la cota que marca la parte más alta de la unidad intermedia. Sin embargo, con este perfil no se puede deducir la disposición relativa de ambas unidades; es decir si ambas unidades se relevan lateralmente o la intermedia está superpuesta a la inferior. Por ello, este perfil se analizará e interpretará posteriormente, cuando el estudio y la interpretación estén enfocados a la zona de contacto entre dichas unidades.

Por otra parte, se observa que la potencia de travertinos es bastante constante en la zona NNO, concretamente entre los metros 35 y 45, mientras que en la mitad SO, y debido al ascenso de la cota del techo de la unidad, se observan los espesores mayores, alcanzando toda la formación un valor medio de 40m, con un máximo de aproximadamente 50m. Conviene recordar que esta potencia puede corresponder a la suma de la unidad inferior y la intermedia.

Dentro del cuerpo más resistivo y en el entorno de los metros 160 y 200 del perfil se localizan sendas discontinuidades con buzamiento subvertical. Entre los metros 215 y 320 del perfil destaca la presencia de una zona muy resistiva ($>2,500\text{ohm}\times\text{m}$) que puede corresponder a una zona de travertinos muy compactos, posiblemente con presencia de oquedades. Este hecho parece confirmarse con los datos de observación en el campo ya que, en esta zona, la unidad intermedia se encuentra formada fundamentalmente por materiales tobáceos con muchos huecos, los cuales serían los responsables de estos valores tan elevados de resistividad.

Los **perfiles 6, 7 y 8** (Figs. 15 a 20) representan cortes transversales a la parte distal, media y proximal de la unidad intermedia e inferior, y permiten apreciar la estructura interna de dichas unidades, la relación entre ellas, y los contactos basal y lateral entre éstas y el sustrato. Tienen una longitud de 470, 410 y 390 m, respectivamente; y alcanzaron una profundidad de exploración comprendida entre 85 y 110 m.

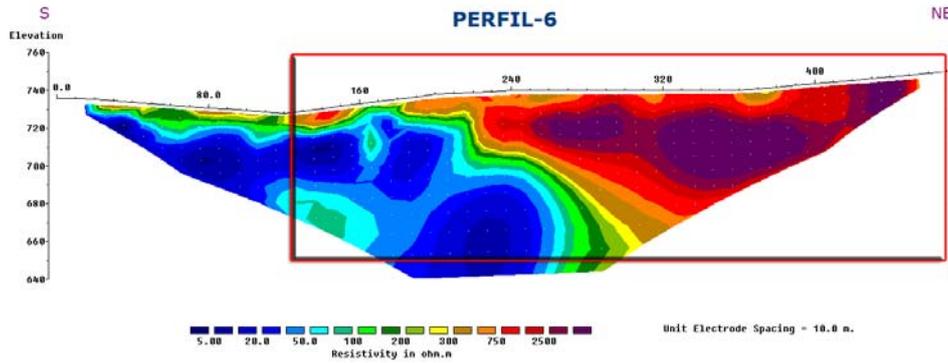


Fig. 15. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 6 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 16.

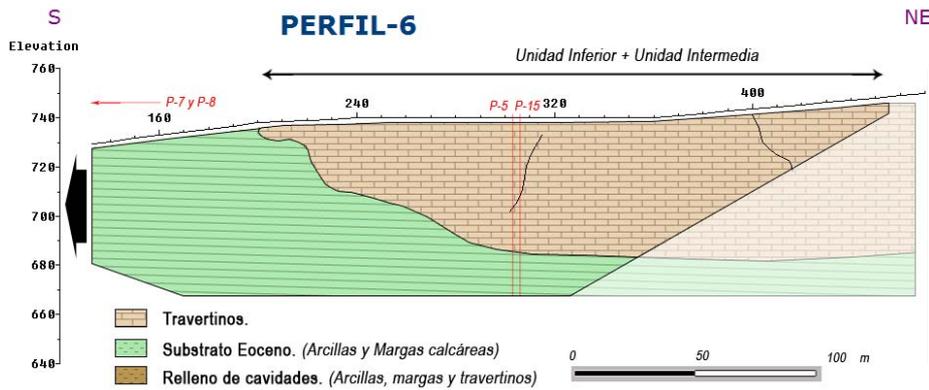


Fig. 16. Interpretación geológica del perfil 6.

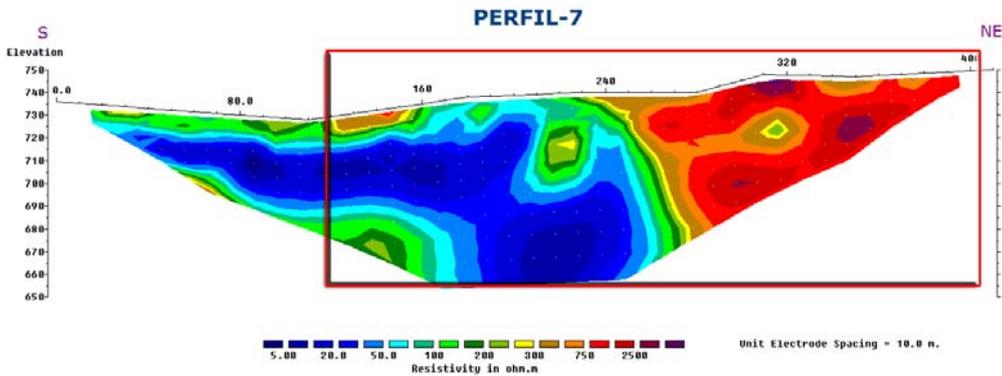


Fig. 17. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 7 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 18.

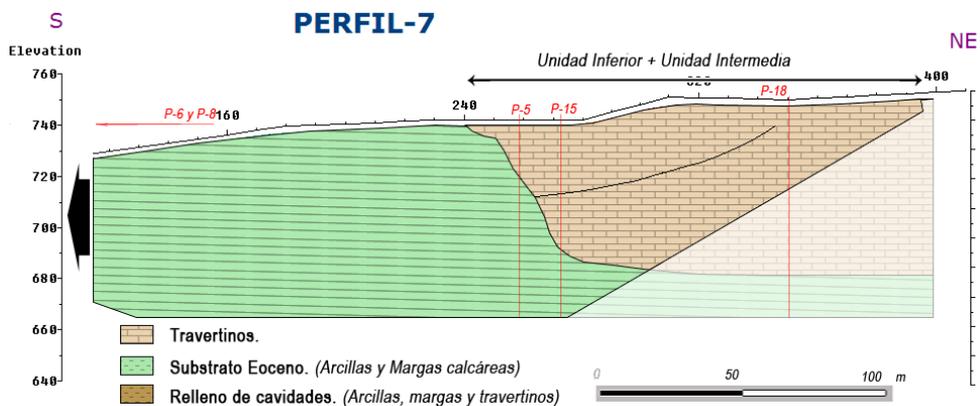


Fig. 18. Interpretación geológica del perfil 7.

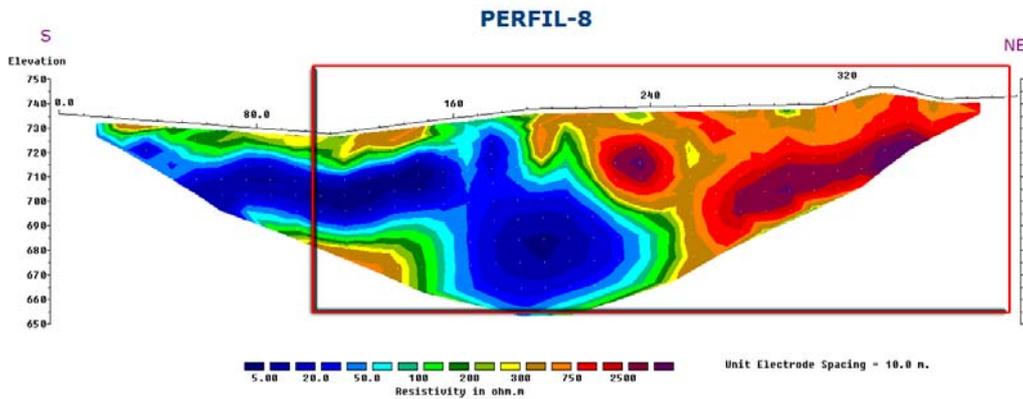


Fig. 19. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 8 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 20.

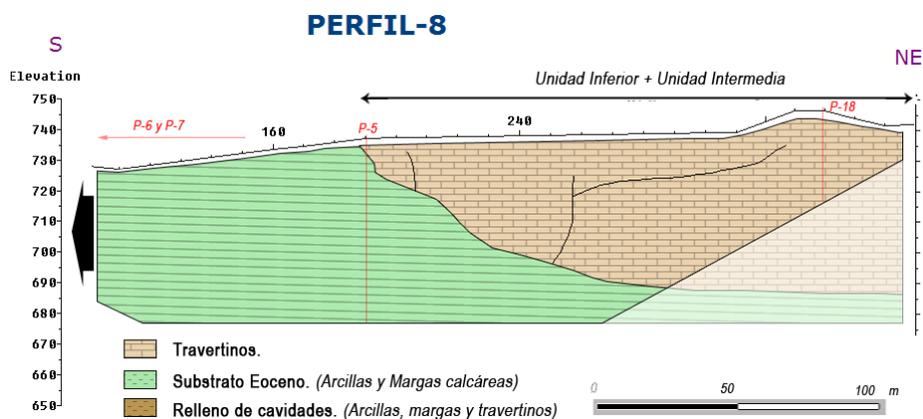


Fig. 20. Interpretación geológica del perfil 8.

La cota del muro de esta unidad intermedia aumenta progresivamente del perfil 6 al 8, por lo que el espesor de la misma disminuye desde aproximadamente 75m, en la parte más potente del perfil 6, hasta 55m, en la zona central del perfil 8. Lateralmente, el espesor disminuye hasta desaparecer en el contacto con los materiales eocenos.

Aunque en los perfiles de las Figs. 17 y 19 se observa una cierta homogeneidad interna en la formación de travertinos, parecen diferenciarse dos capas con tendencia más o menos horizontal, lo que implicaría que el paquete más resistivo estaría formado por dos cuerpos superpuestos, siendo el más resistivo y potente el inferior. Este hecho coincide con la relación entre la unidad inferior y la intermedia, de manera que la primera estaría superpuesta a la intermedia.

El **perfil 9** (Figs. 21 y 22) representa un corte transversal al muro de la unidad superior. Tiene un especial interés porque da información acerca de la relación entre esta unidad y la intermedia. Tiene una longitud de 400m y su profundidad máxima de investigación es

de 90m. La cota del contacto entre los travertinos y el sustrato se sitúa entre los metros 722 y 740, con un valor medio de 732 ± 4 m, mientras que la cota de la superficie topográfica es bastante constante y situada aproximadamente a 750m. Por lo tanto, el espesor de esta parte basal de la unidad superior tiene un valor constante a lo largo de todo el perfil y que ronda los 17m. Este espesor sugiere que la unidad superior no se apoya directamente sobre los materiales de la unidad intermedia sino que lo hace sobre un sustrato mucho más conductivo, constituido por las margas eocenas con intercalaciones carbonatadas.

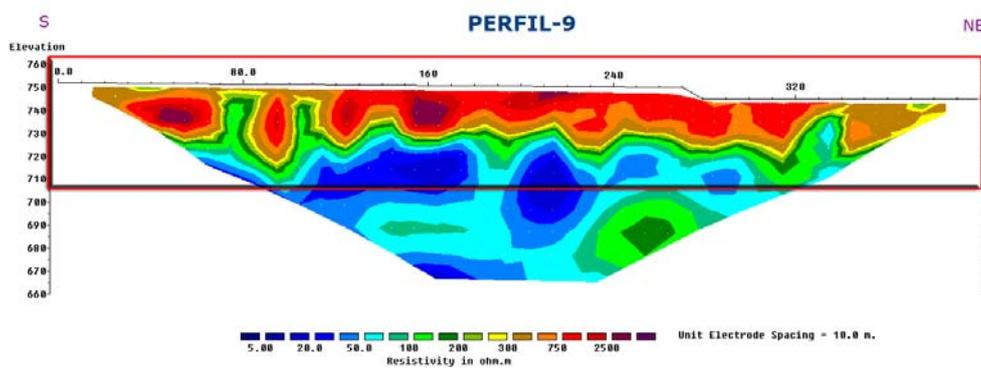


Fig. 21. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 9 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 22.

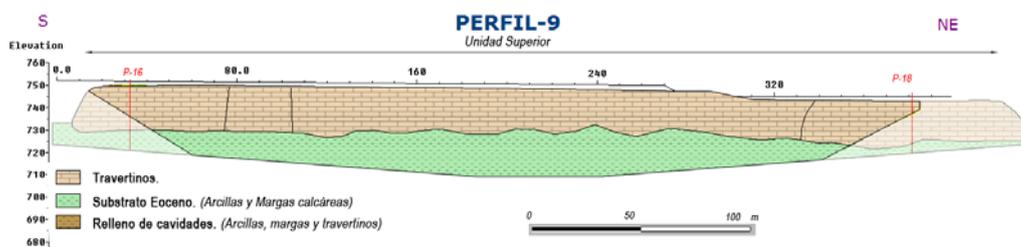


Fig. 4. 22. Interpretación geológica del perfil 9.

Las anomalías atribuibles a posibles discontinuidades están aproximadamente en los metros 75, 105 y 330 del perfil. Estas tres posibles discontinuidades presentan un buzamiento prácticamente vertical.

Los **perfiles 10 y 11** (Figs. 23 a 26) representan sendos cortes longitudinales a los sectores N y S, respectivamente, de la plataforma superior de la formación de travertinos. Tienen una longitud de 470 y 410 m, y alcanzaron profundidades de exploración de 110 y 90m. En ambos destaca la existencia de un paquete muy resistivo que alcanza el metro 240 en el

perfil 10 y el metro 200 en el 11. Este paquete resistivo se corresponde con la unidad superior de la formación de travertinos. La discontinuidad basal entre los travertinos y el substrato está aproximadamente situada a los 730m, valor coincidente con el deducido en el perfil 9, y que ha permitido cuantificar el espesor de la unidad superior, que es de 45m aproximadamente. Este paquete más resistivo se extiende por debajo de una capa conductora cuya potencia oscila entre 3 y 5 m y que se corresponde con las arcillas y margas del suelo desarrollado en la parte alta de esta plataforma, así como con las cavidades que frecuentemente existen en la parte más superficial de la plataforma superior y que están rellenas por materiales más conductores.

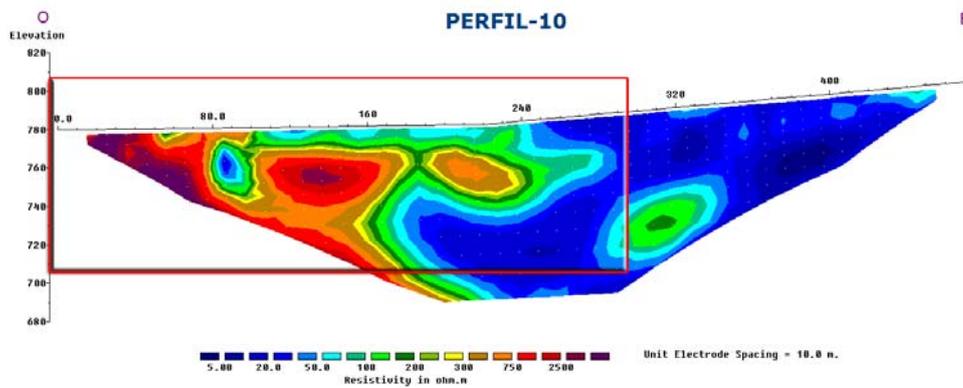


Fig. 23. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 10 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 24.

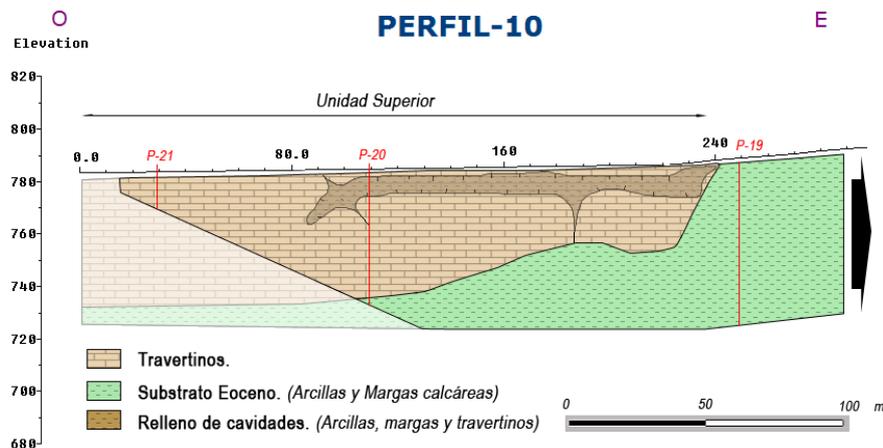


Fig. 24. Interpretación geológica del perfil 10.

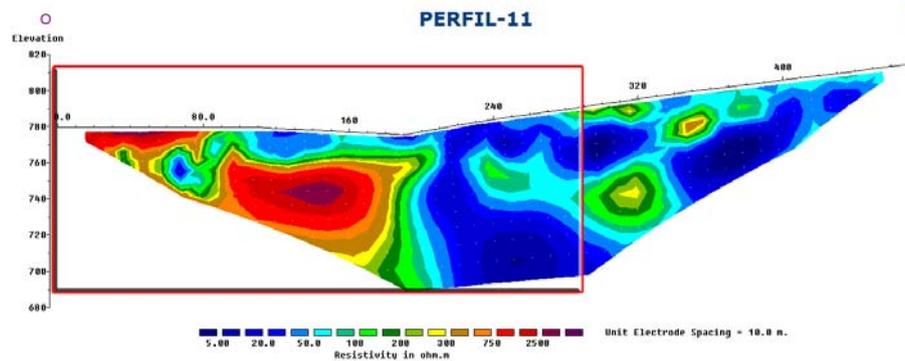


Fig. 25. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 11 de la primera campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 26.

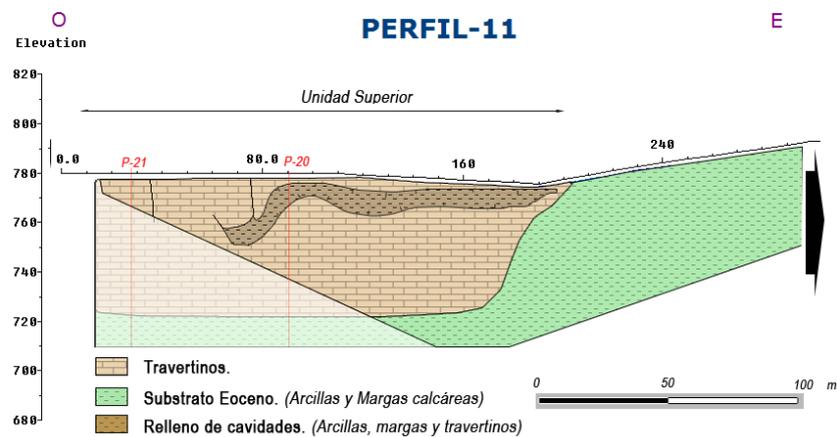


Fig. 26. Interpretación geológica del perfil 11.

En el perfil 10 aparece una anomalía indicativa de la presencia de una discontinuidad aproximadamente en el metro 185 del perfil y que se caracteriza por su buzamiento vertical. Entre los metros 80 y 90 del mismo perfil, a una profundidad entre 5 y 15m, se identifica otra zona mas conductora, de morfología globular, que podría corresponder a una cavidad rellena de materiales finos. El perfil 11 presenta varias discontinuidades de la misma naturaleza: la primera se encuentra hacia el metro 220 del perfil e indica el contacto lateral entre los travertinos y el basamento; la segunda aparece entre los metros 60 y 75, a una profundidad entre 8 y 18m, presenta una morfología similar a la descrita en el perfil anterior, muy conductora y que podría corresponder a otra cavidad cársica rellena de materiales más conductores.

Segunda campaña

Al igual que se ha realizado con los resultados obtenidos de los perfiles de tomografía eléctrica realizados durante la primera campaña y cuya separación entre electrodos fue de 10 m, los resultados obtenidos de los 10 perfiles realizados durante la segunda campaña

(ver Fig. 27) y cuya separación entre electrodos fue de 5m, también se explicarán separadamente.

El perfil 12, con una orientación NNE-SSO, representa una sección de 175m de longitud de la zona distal de la plataforma inferior de la formación de travertinos. A lo largo del perfil se distribuyeron un total de 36 electrodos separados entre sí 5m, lo que permitió una profundidad máxima de exploración de unos 40 m (Figs. 28 y 29)

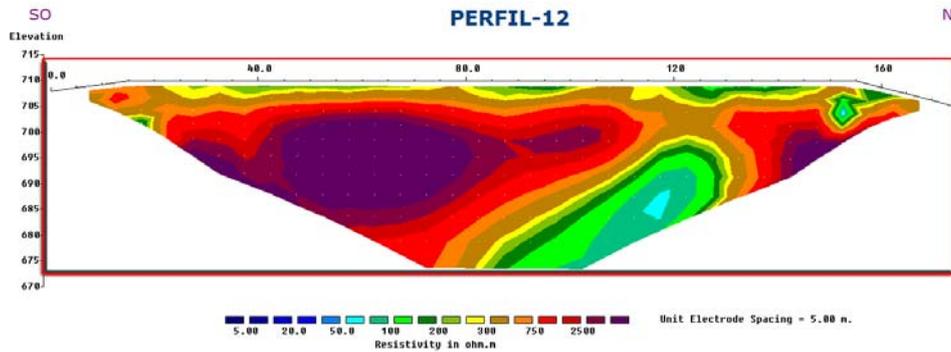


Fig. 28. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 12 de la segunda campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 29.

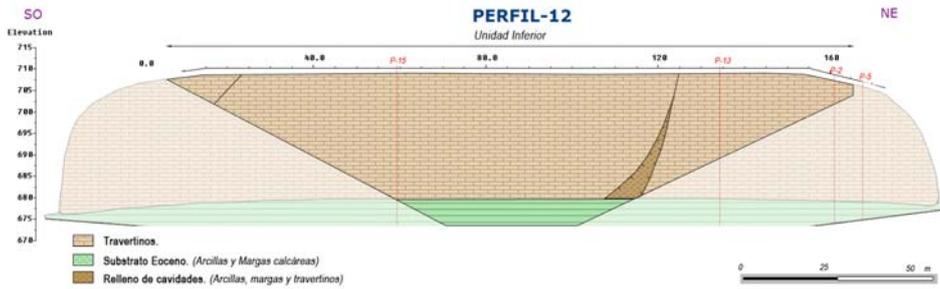


Fig. 29. Interpretación geológica del perfil 12.

Los materiales carbonatados, caracterizados por los valores altos de resistividad, aparecen a lo largo de todo el perfil, y la cota del muro de éstos varía entre 676 y 701m, siendo el valor medio de 687 ± 7 m. Esta cota es bastante homogénea a lo largo de todo el perfil, permitiendo calcular una potencia media de travertinos de 25 m, exceptuando el tramo comprendido entre los metros 100 y 130, en el que se localiza una anomalía en los valores de la resistividad que puede deberse a la existencia de una importante discontinuidad con buzamiento aparente hacia el SO. Esta discontinuidad en la resistividad y, por lo tanto, en la continuidad de los travertinos, podría deberse al relleno de fracturas y cavidades con materiales más finos, como arcillas y/o margas.

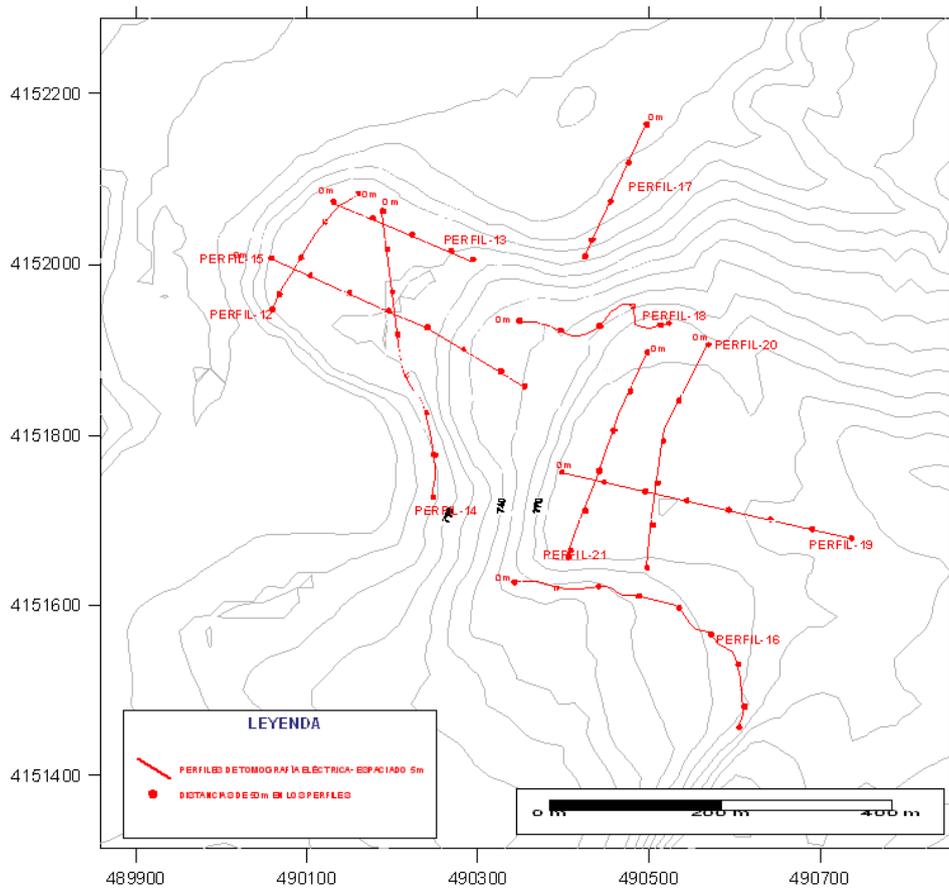


Fig. 27. Mapa de situación de los perfiles de tomografía eléctrica realizados durante la segunda campaña.

El perfil 13 (Figs. 30 y 31), de 175 m de longitud, es perpendicular al anterior, y representa cómo varía la cota del muro de la unidad inferior de la formación de travertinos desde la zona más próxima a la más alejada del manantial. El perfil está orientado E-O, y quizá sea el perfil de las dos campañas que menos variaciones de resistividad presenta. En él se aprecia un paquete muy resistivo y continuo en el que no se distinguen prácticamente heterogeneidades. La única zona destacable y que interrumpe esta continuidad en los valores de resistividad se observa en los 2m más superficiales de los 55 primeros metros lineales del perfil. En esta zona aparecen valores muy bajos de resistividad, que se corresponden con el suelo desarrollado en esa zona. La cota del muro de la formación es constante y está situada a 682m, aproximadamente.

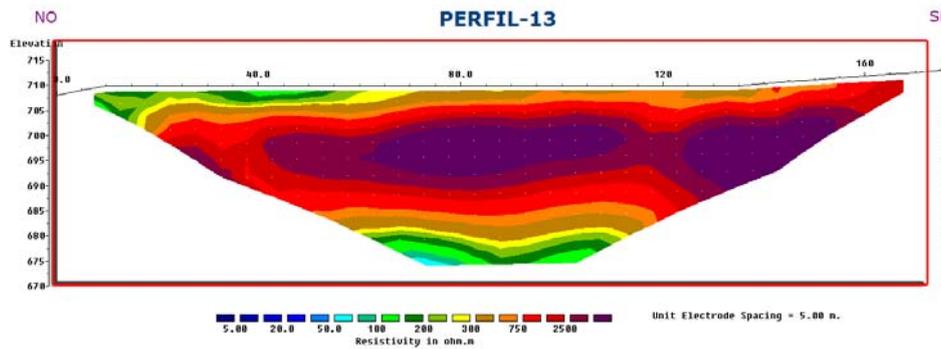


Fig. 30. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 13 de la segunda campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 31.

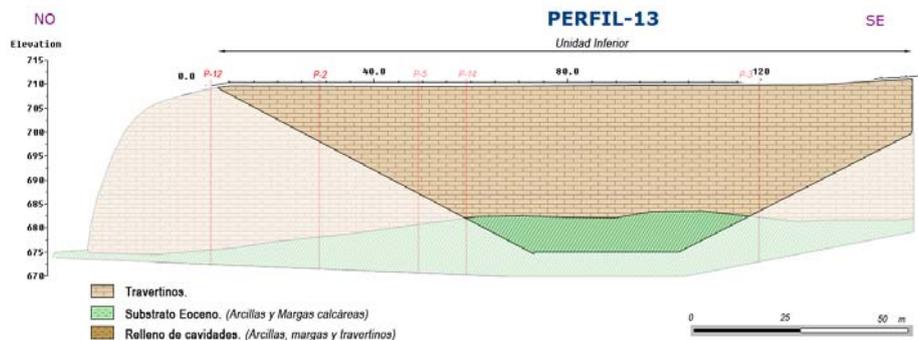


Fig. 31. Interpretación geológica del perfil 13.

El perfil 14 (Figs. 32 y 33) es complementario a los perfiles 2 y 3 de la primera campaña. En él se obtiene un perfil similar a los obtenidos en los de la primera campaña pero con más resolución, lo que ha permitido diferenciar mejor las variaciones de la cota del muro de la unidad inferior en su sector central. Dicha cota, con esta resolución, varía entre 678 y 105m, esta última en la zona Sur del perfil. La cota media es de $690 \pm 8\text{m}$. Exceptuando el sector central de la unidad, localizado entre los electrodos 65 y 115, la unidad es bastante homogénea, y precisamente en esa zona se aprecia la existencia de una serie de discontinuidades que modifican el espesor de la unidad. Estas discontinuidades ya aparecían en la misma zona en el perfil 2 y menos claramente en el perfil 3 de la primera campaña.

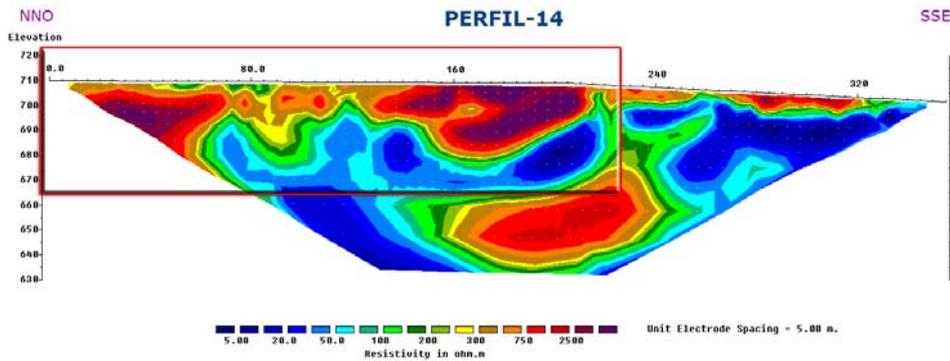


Fig. 32. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 14 (2ª campaña). El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 33.

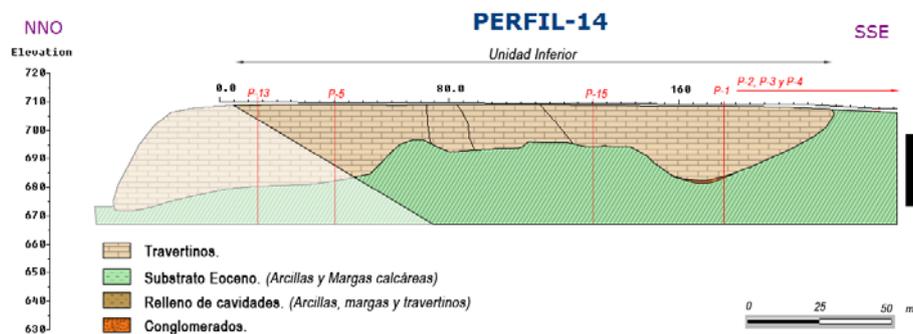


Fig. 33. Interpretación geológica del perfil 14.

Conviene destacar también la existencia de un paquete de alta resistividad englobado en el sustrato margoso, el cual se identificó e interpretó en los perfiles de 2 y 3 de la primera campaña como materiales carbonatados correspondientes a las alternancias entre margas y calizas que forman el sustrato y, al igual que lo observado en dichos perfiles, con buzamiento también hacia el NO.

El perfil 15 es análogo al nº 5 de la primera campaña, y representa por tanto un perfil longitudinal que atraviesa las unidades inferior e intermedia de los travertinos, por lo que es muy interesante ya que permite estudiar la relación existente entre ambas (Figs. 34 y 35).

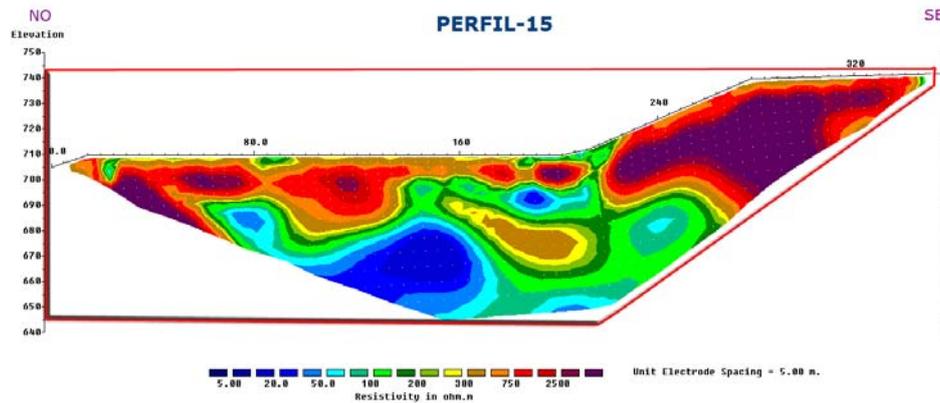


Fig. 34. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 15 de la segunda campaña de tomografía eléctrica. El recuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 35.

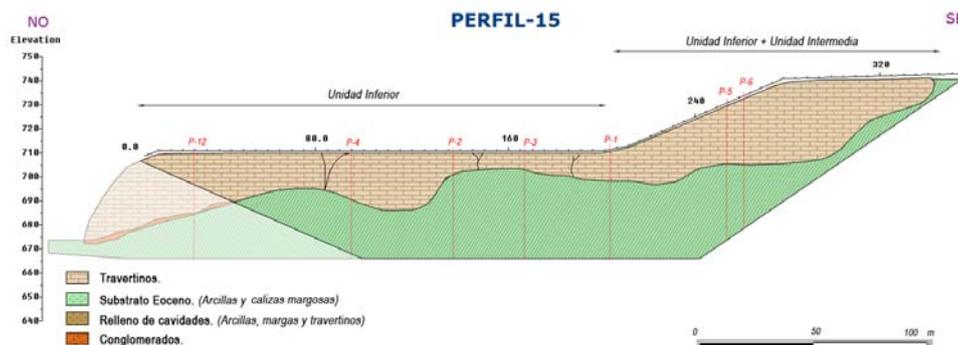


Fig. 35. Interpretación geológica del perfil 15.

Este perfil se caracteriza por tener una orientación NO-SE, una longitud de 355m y haber permitido una profundidad máxima de investigación de 75m. La cota del muro es muy variable, debido fundamentalmente a las discontinuidades existentes en la unidad y al paleorelieve aparente que aparece en el sector central de la unidad inferior. El valor medio de la cota es de 693 ± 8 m, encontrándose una distribución bimodal de esta variable y, por lo tanto, dos valores medios: el primero de unos 680m, correspondiente a los sectores NO y SE del perfil, y el segundo, de unos 700 m, que se encuentran en el sector central, entre los electrodos 140 y 210. En la unidad inferior pueden diferenciarse tres zonas: la primera, situada hacia el centro del perfil, entre los metros 135 y 210, presenta el contraste de resistividades a una cota de 695 m.s.n.m., similar a la observada en el perfil 1 de la primera campaña, y donde los travertinos alcanzan un espesor de sólo unos 15 m. La segunda zona, situada más hacia el NO de la primera, entre los metros 80 y 135, la cota del contraste de resistividades se sitúa a 680 m.s.n.m., por lo que la potencia de travertinos aumenta hasta aproximadamente 30-40m. En la tercera, situada más al NO de las dos anteriores, concretamente al inicio del perfil, la cota del contraste de resistividades se sitúa a una cota

intermedia entre las dos anteriores, lo que significa que el espesor de los travertinos alcanza unos 20m, también intermedia entre las de las otras dos zonas.

En la parte más superficial del perfil se observa la presencia de varias zonas en las que aparecen valores anómalos de resistividad, correspondientes con posibles oquedades y desarrollo de suelo. Se han detectado dos anomalías que corresponderían a sendas discontinuidades, situadas hacia los metros 85 y 220 del perfil.

La zona perteneciente a la unidad intermedia es muy homogénea y es donde aparecen los mayores valores de resistividad de toda la formación de travertinos de Alicún, lo que es debido a que en esta unidad es frecuente la existencia de tobas calcáreas que tienen valores muy elevados de resistividad, siendo ésta una característica constante en todos los perfiles que atraviesan dicha unidad.

El perfil 16, orientado E-O (Fig. 36), se ha realizado con la intención de comprobar si la unidad superior de la formación de travertinos se extendía lateralmente por debajo de la zona urbanizada del balneario. Como se puede comprobar, sólo se han medido valores elevados de resistividad hacia el SSE, zona en la que se pone en contacto, mediante una zona de falla normal, los materiales eocenos y las calizas jurásicas que forman el Cerro de la Raja. Dicha falla es la responsable de los 5 manantiales que forman el complejo termal de Alicún de las Torres.

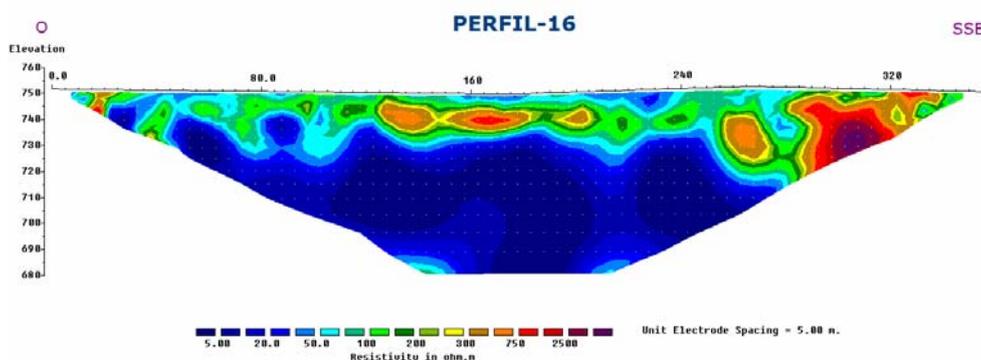


Fig. 36. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 16 de la segunda campaña de tomografía eléctrica.

El perfil 17, con orientación NNE-SSO (Figs. 37 y 38), se ubicó en esta zona para localizar la extensión lateral hacia el N de la unidad inferior. Como se observa en dicho

perfil, el contacto entre los travertinos y las margas eocenas es neto y se produce a partir del electrodo 60. Desde esta zona hacia el final el muro de la unidad de travertinos se sitúa aproximadamente sobre los 667m.

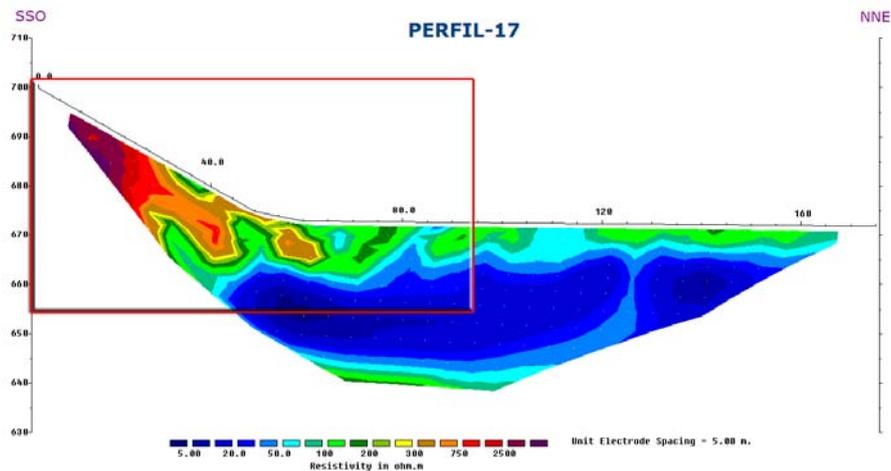


Fig. 37. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 17 de la segunda campaña de tomografía eléctrica. El cuadro en rojo es la parte interpretada en la Fig. 38.

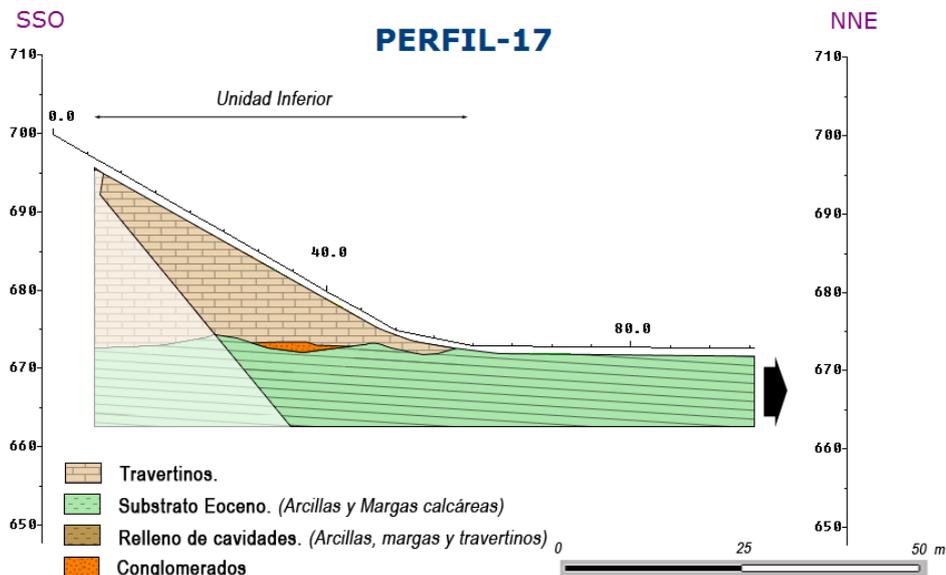


Fig. 38. Interpretación geológica del perfil 17.

El perfil 18 (Figs. 39 y 40) constituye el único que se consiguió realizar entre la unidad superior y la intermedia. De esta manera se trató de conseguir una longitud mínima de un perfil que permitiera explicar la relación existente entre estas dos unidades contiguas.

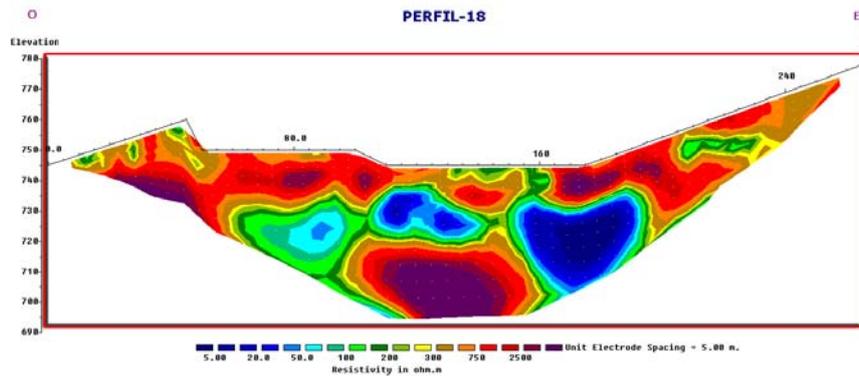


Fig. 39. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 18 de la segunda campaña de tomografía eléctrica.

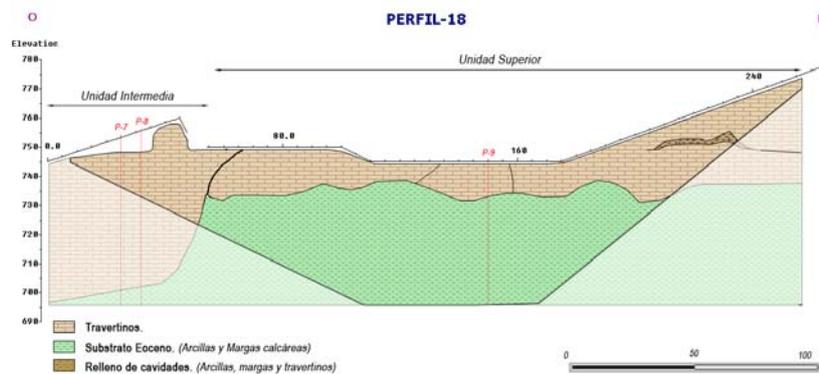


Fig. 40. Interpretación geológica del perfil 18.

La orientación del perfil es básicamente E-O, tiene una longitud de 256m, y permitió una profundidad máxima de investigación de 80m. Los valores de resistividad son muy variables, de tal manera que desde el inicio del perfil hasta el electrodo 60 el perfil atraviesa travertinos pertenecientes a la unidad intermedia, donde no se puede apreciar el contacto entre esta unidad y el zócalo eoceno. Desde este electrodo hasta el final del perfil, el contacto se mantiene constante a unos 730m, cota que también se observó en el perfil 9. El espesor medio de la unidad intermedia de la formación de travertinos no se puede calcular debido a que no se ha detectado el contacto con los materiales margosos del substrato. Sin embargo, asumiendo como correctos los valores encontrados en los perfiles 5, 6, 7, 8 y 15, donde sí aparecía ese contacto entre los metros 675 y 685, se puede estimar que esta unidad tiene un espesor máximo de 60m. Para la unidad superior, y según la zona, el espesor varía entre un mínimo de 5m, que se localiza en el sector central, y casi 45m en el sector oriental.

La discontinuidad principal aparece alrededor del metro 50, y se corresponde con una

discontinuidad vertical que marca el límite entre la unidad superior y la intermedia, y otras 2 discontinuidades menores en los metros 160 y 190.

El perfil 19, orientado E-O (Figs. 41 y 42), es análogo a los perfiles 10 y 11 de la primera campaña. Representa un perfil longitudinal a la unidad superior de la formación de travertinos, la cual aparece en los primeros 200m del perfil.

Al igual que en los perfiles 10 y 11, en esta unidad aparece, ahora de manera más evidente, un nivel de aproximadamente 5m con una resistividad mucho menor que la del paquete de travertinos y que representa las múltiples oquedades rellenas de material más conductor existentes en la parte superficial de la unidad superior y que tan sólo son visibles en el campo. El contacto inferior entre los materiales carbonatados y los margosos del sustrato se sitúa a una cota bastante constante, a 720m en la parte occidental, que se corresponde con el contacto inferior observado en los perfiles 9 y 18. Este valor aumenta hacia el E donde el travertino desaparece bajo los materiales cuaternarios.

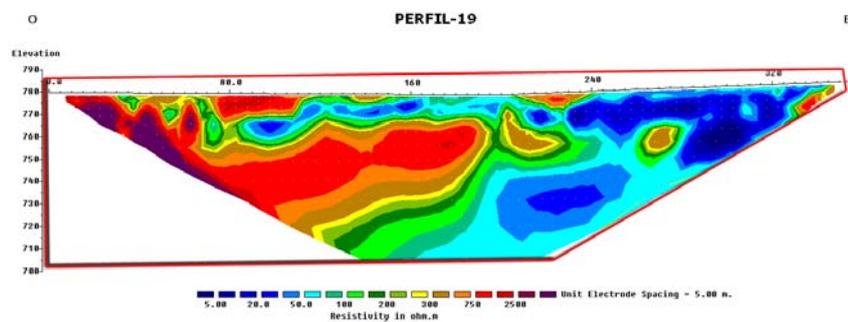


Fig. 41. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 19 de la segunda campaña de tomografía eléctrica.

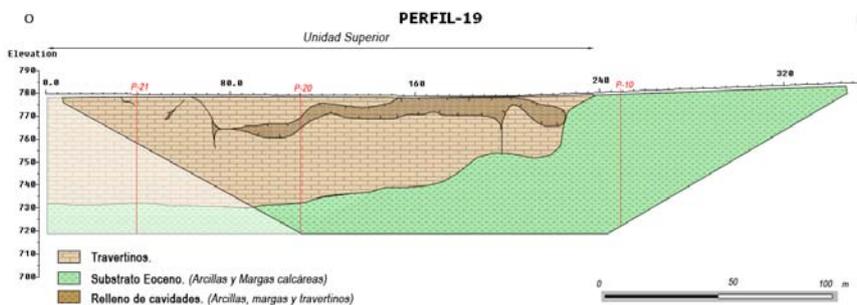


Fig. 42. Interpretación geológica del perfil 19.

La anomalía principal del perfil se ha localizado cerca del metro 195, y corresponde con una discontinuidad vertical, a partir de la cual, hacia el Este, disminuye de forma sensible

de espesor.

Los **perfiles 20 y 21** están orientados NE-SO y son los únicos que representan un corte transversal a la unidad superior de la formación de travertinos de manera completa, ya que el perfil 9 sólo atravesaba el muro de la misma. El perfil 20 (Figs. 43 y 44) es el perfil transversal localizado más próximo al manantial, mientras que el 21 (Figs. 45 y 46) es muy similar al primero pero en una zona más distal.

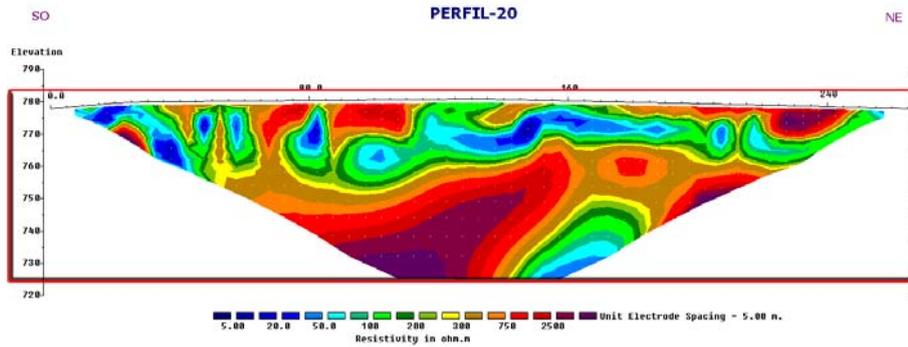


Fig. 43. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 20 de la segunda campaña de tomografía eléctrica.

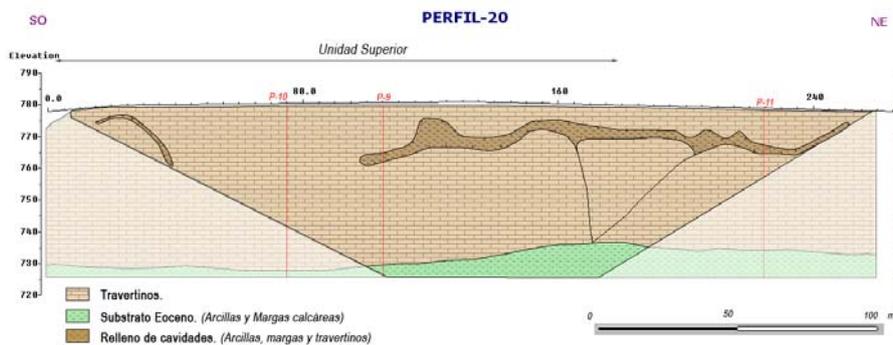


Fig. 44. Interpretación geológica del perfil 20.

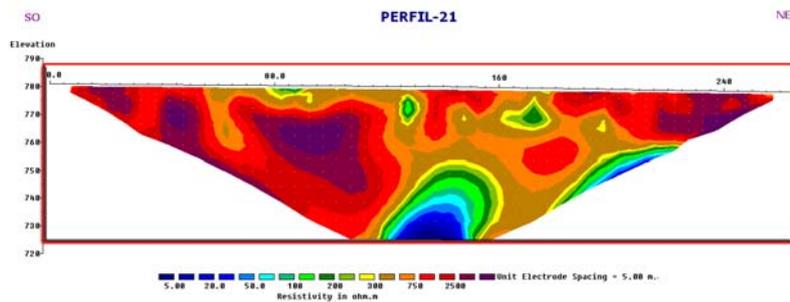


Fig. 45. Distribución en profundidad de los valores de resistividad del perfil 21 de la segunda campaña de tomografía eléctrica.

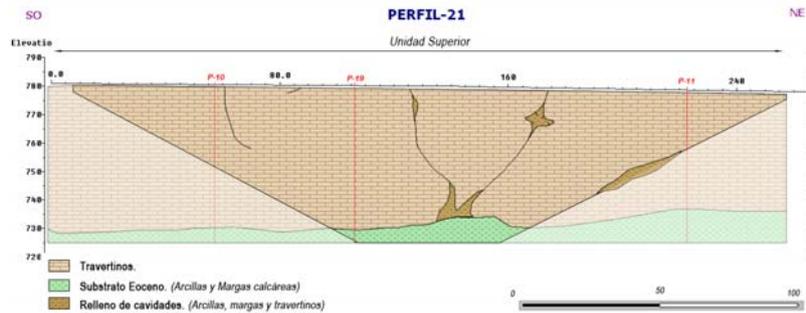


Fig. 46. Interpretación geológica del perfil 21.

Ambos perfiles tienen una longitud de 256m y su profundidad máxima de investigación fue de 80m de profundidad, profundidad a la que el contacto entre los travertinos y los materiales menos resistivos del sustrato varía entre los 715 y 750m. La cota media a la que se sitúa dicho contacto es similar a la obtenida en los perfiles anteriores realizados sobre esta unidad, y varía alrededor de los 730m. Por tanto, el espesor máximo de esta unidad se puede estimar en 55m, con un valor medio aproximado de 50m. Al igual que en todos los perfiles que atravesaban el techo de esta unidad, en los primeros metros, entre 5 y 10m, aparecen claramente varias discontinuidades subhorizontales que ponen en contacto los materiales carbonatados altamente resistivos, con otros de carácter más conductivos y que se corresponden con las frecuentes cavidades existentes en los primeros metros de la unidad superior, las cuales están rellenas de arcillas y margas, fundamentalmente. Esta discontinuidad es evidente en el perfil 20 y se corresponde perfectamente con la encontrada en los perfiles 9, 10 y 11.

Las principales discontinuidades que afectan a los travertinos, aparte de las anteriormente mencionadas, están situadas, en el perfil 20, hacia los metros 60, con un buzamiento aparente hacia el SO, y hacia el metro 100, con buzamiento vertical. En el perfil 21, las anomalías se localizan hacia los metros 130 y 170. En el último perfil, dentro del paquete resistivo perteneciente a los travertinos, se localiza una zona con morfología circular con valores de resistividad entre 200y300 $\text{ohm}\times\text{m}$, que podría interpretarse como una cavidad rellena de material más conductor.

Tras la interpretación individual de los perfiles realizados en las dos campañas de investigación, se ha realizado un esquema tridimensional de la interpretación de los principales perfiles (Fig. 46).

3. 2. Interpretación de detalle.

Los perfiles 5, 6, 7, 8 y 15 tienen la particularidad de ser los únicos de las dos campañas que atraviesan las unidades inferior e intermedia de la formación de travertinos, por lo que tienen el interés de permitir comprender la relación espacial entre dichas unidades.

El contacto entre ambas unidades es difícilmente identificable en los perfiles interpretados ya que el contraste de resistividades entre ellas es mucho menor que el existente entre los travertinos y el substrato. Por ello, se ha procedido a reprocesar los perfiles mediante la modificación de la regleta de resistividades empleadas en cada zona. Esta regleta se adaptó exclusivamente a la zona del contacto en cada perfil, obteniéndose así una escala única para cada uno de ellos, la cual está adaptada a los valores de resistividad existentes en dichos contactos, y que permite destacar los contrastes existentes entre la unidad inferior y la intermedia (Figs. 48 a 52)

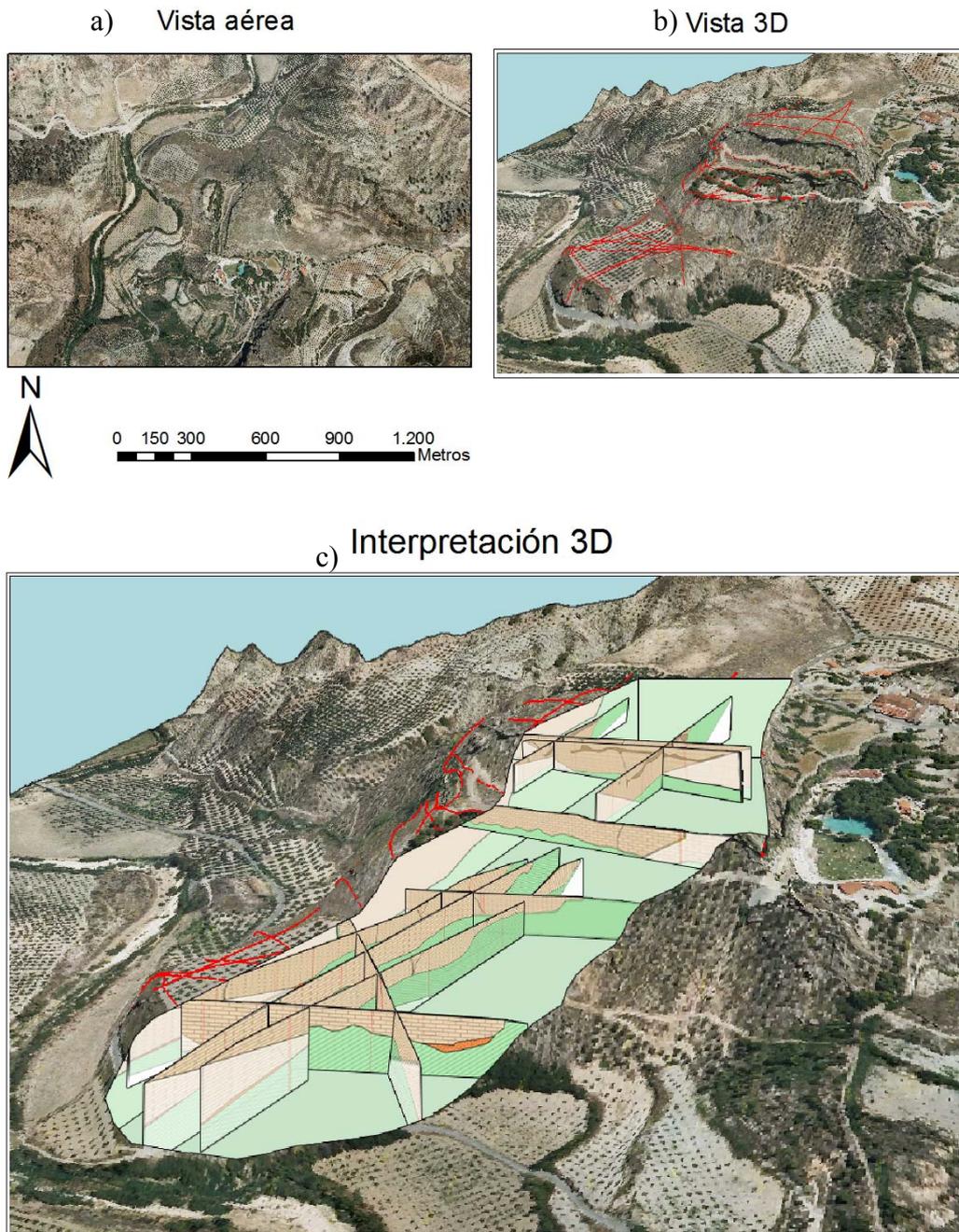


Fig. 47. a y b) Vistas aérea y tridimensional de la zona de travertinos. c) Interpretación en 3D de los perfiles de tomografía eléctrica geológicamente interpretados.

Para analizar el contacto entre las unidades intermedia e inferior a lo largo del **perfil 5** se han analizado los valores de resistividad tal y como se midieron en el campo. Esto se ha realizado con el objetivo de ver qué valores de resistividad se concentraban en la zona del contacto (Fig. 48). Realizada esta operación, se procedió a representar el perfil con una regleta de colores que variara en el rango de los valores deducidos. Así, las pequeñas

variaciones de resistividad serían más evidentes y permitirían identificar el contacto entre ambas unidades aunque su contraste de resistividades no fuese muy elevado.

Tras realizar este reprocesado, en el perfil de la Fig. 48 se observa que la cota del contacto varía entre los 710 y 725 metros, estando el mayor espesor (18m) de la unidad intermedia en la parte más occidental del perfil, mientras que, hacia el E, el espesor se mantiene bastante constante, entre 10 y 15m.

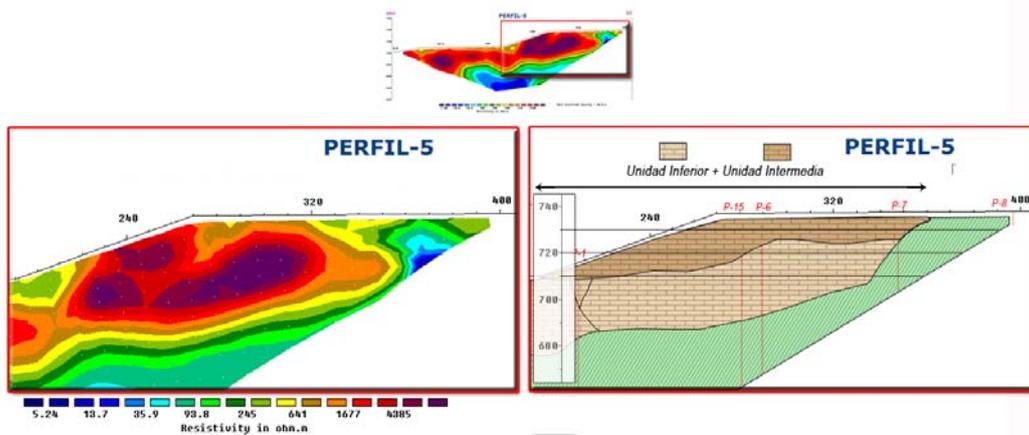


Fig. 48. Interpretación geológica detallada del contacto entre las unidades intermedia e inferior en el perfil 5.

A lo largo del **perfil 6** (Fig. 49) se ha realizado un proceso similar al descrito para el perfil anterior, observándose la existencia de un paquete inferior, con resistividades por encima de los 2,500 ohm×m, así como el contacto entre las unidades intermedia e inferior, que se sitúa, de manera bastante constante, sobre los 720-725m, obteniéndose un espesor medio para la unidad intermedia comprendido entre 10 y 20m.

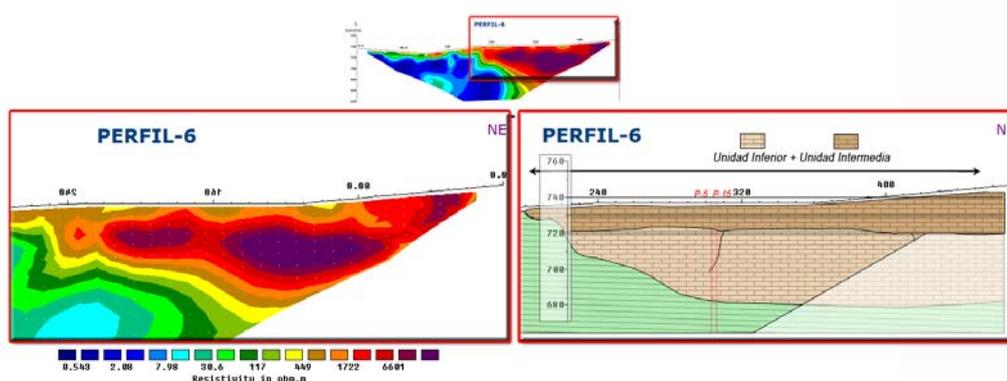


Fig. 49. Interpretación geológica detallada del contacto entre la unidad intermedia e inferior en el perfil 6.

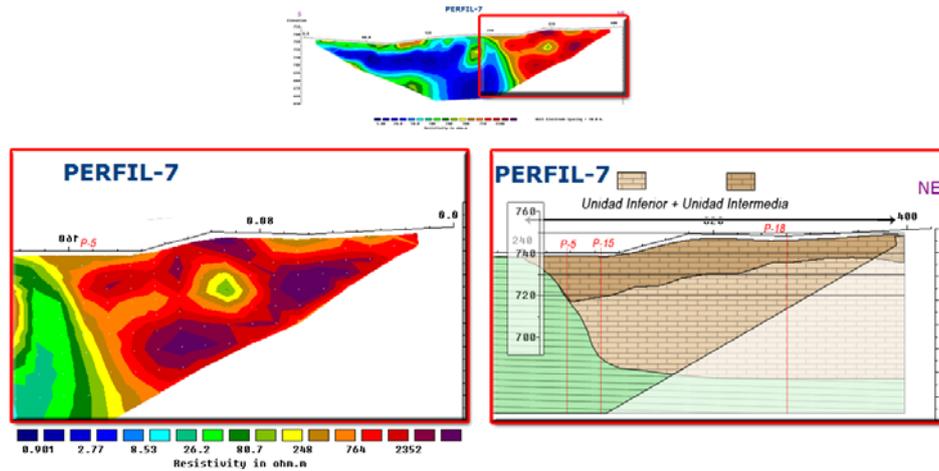


Fig. 50. Interpretación geológica detallada del contacto entre la unidad intermedia e inferior en el perfil 7.

Los **perfiles 7 y 8** se han analizado conjuntamente ya que tienen muchas analogías entre sí, por encontrarse muy próximos y tener una orientación similar, En el perfil 7 (Fig. 50) se observa muy bien la discontinuidad subhorizontal que separa ambas unidades, y que se ubica a una cota media de 730m, variando entre 720 y 735m. El espesor de la unidad intermedia en sendos perfiles varía entre 11 y 21m, estos últimos alcanzados en la zona central del perfil 8 (Fig. 51)

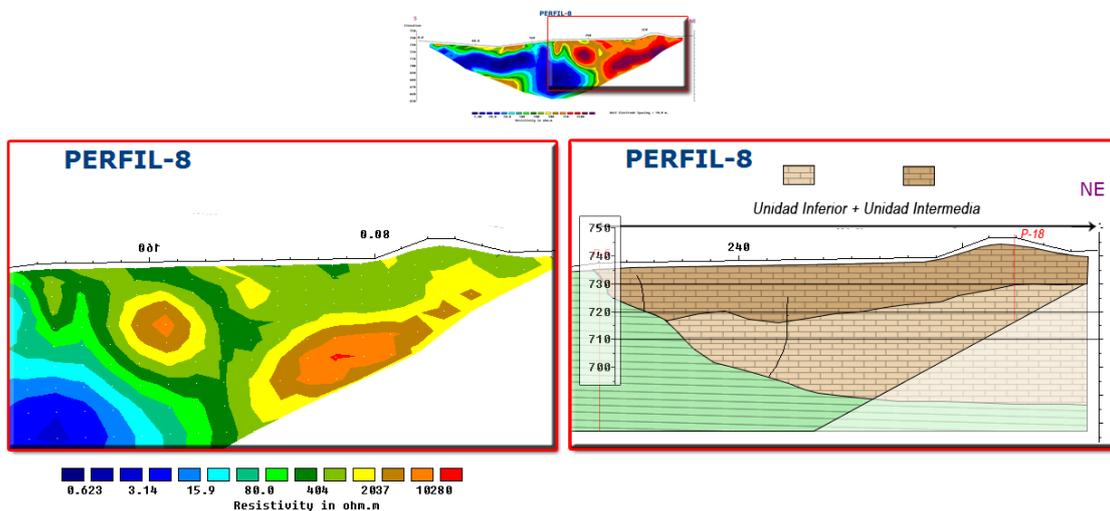


Fig. 51. Interpretación geológica detallada del contacto entre la unidad intermedia e inferior en el perfil 8.

El **perfil 15** tiene una orientación similar al 5 y atraviesa perpendicularmente las dos unidades analizadas. Después de adaptar la regleta de resistividades a los valores deseados, se observan claramente dos superficies de resistividades ligeramente diferentes, lo que permite delimitar el contacto entre ambas (Fig. 52). En este perfil la cota del contacto entre

ambas unidades varía entre 710 y 735m, y los espesores que se obtienen para la unidad intermedia son bastante constantes, alrededor de 10m.

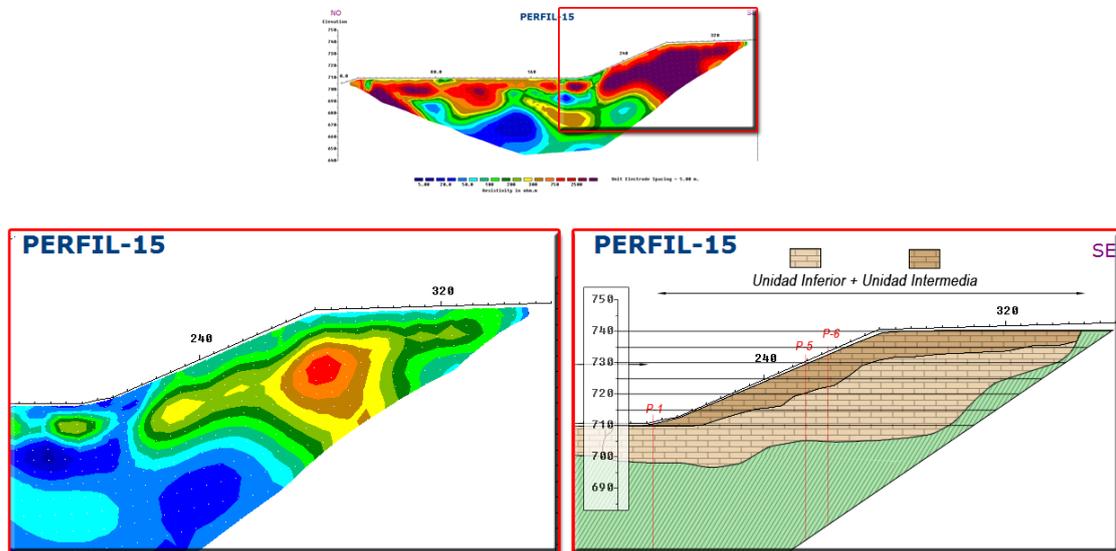


Fig. 52. Interpretación geológica detallada del contacto entre la unidad intermedia e inferior en el perfil 15.

3. 3. Análisis geoestadístico.

3. 3. 1. Análisis Geoestadístico General.

Análisis descriptivo de los datos

Al objeto de conseguir un modelo de continuidad espacial de los contactos de cada unidad de travertinos, se ha realizado un análisis geoestadístico de la distribución de la variable en estudio. En una primera fase se ha procedido al análisis estadístico descriptivo de los datos derivados de la interpretación geológica de los 21 perfiles de tomografía eléctrica.

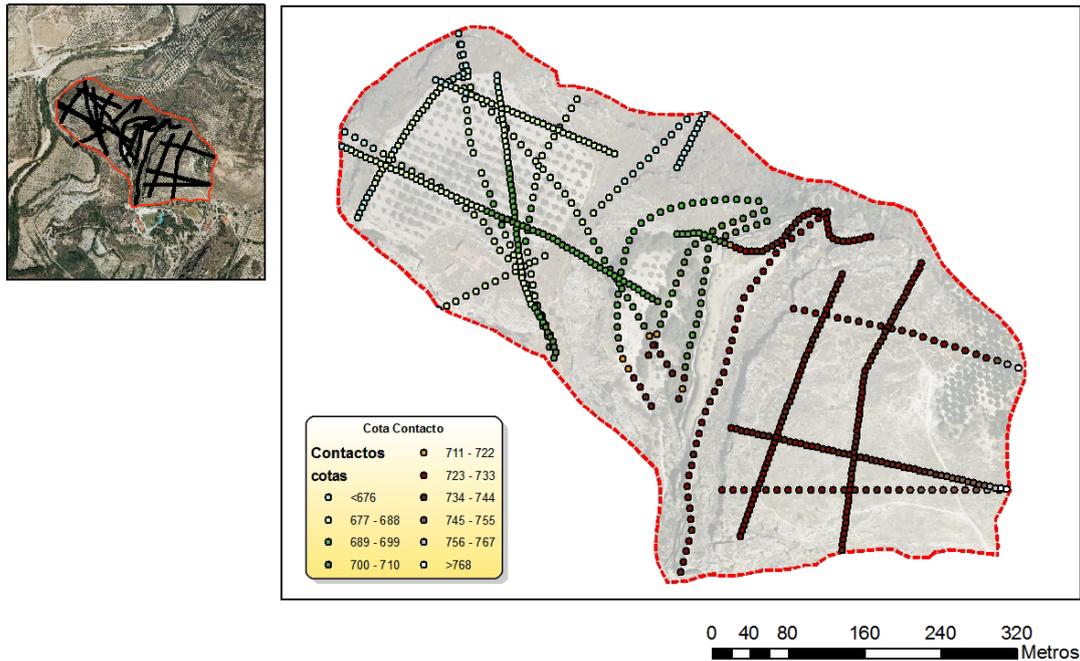
Los principales estadísticos descriptivos que permiten organizar, sintetizar y describir los resultados de la variación de la cota del contacto entre los travertinos y las margas finicretácicas se encuentran recogidos en la Tabla 1. Con los mismos objetivos se han realizado también el histograma y los diagramas de cajas y bigotes para el conjunto de todos los datos (Figs. 53 y 54).

Tabla 1. Resumen de los principales estadísticos descriptivos de la variable cota del contacto entre la formación de travertinos y las margas eocenas.

N	Válidos	710
	Perdidos	0
Media		706.37
Mediana		699.00
Desv. Típica.		25.341
Mínimo		665
Máximo		778

Como se desprende de la Tabla 1, para el estudio geoestadístico se han usado un total de 710 datos procedentes de la interpretación geológica de los perfiles de tomografía eléctrica. En ellos, la cota del contacto varía entre 665m y 778m, con un valor medio de 710m. De estos datos no se pueden extraer más conclusiones que las descritas, por lo que se ha procedido a elaborar el histograma representativo de la variable estudiada (Fig. 53). En este histograma se muestra la distribución de la cota del contacto entre la formación de travertinos con las margas eocenas. En esta distribución, que es bimodal, la cota del contacto se agrupa principalmente en torno a 2 valores, 680m y 730m. Este dato continúa siendo insuficiente para entender la distribución real de ese valor, por lo que se ha procedido a analizar los valores que adquiere la cota del contacto en función de la unidad de que se trate.

En la Fig. 54 se representa un diagrama de cajas y bigotes en el que se observa la variabilidad de la cota del contacto entre los travertinos y el substrato en cada perfil. La línea intermedia corresponde a la mediana, las superiores e inferiores a los respectivos cuartiles, el superior y el inferior, y los “bigotes” corresponden a los valores extremos de la serie de datos que se consideran normales, y que son los que, como máximo, se alejan del cuartil más próximo en 1.5 veces el recorrido intercuartílico.



Histograma

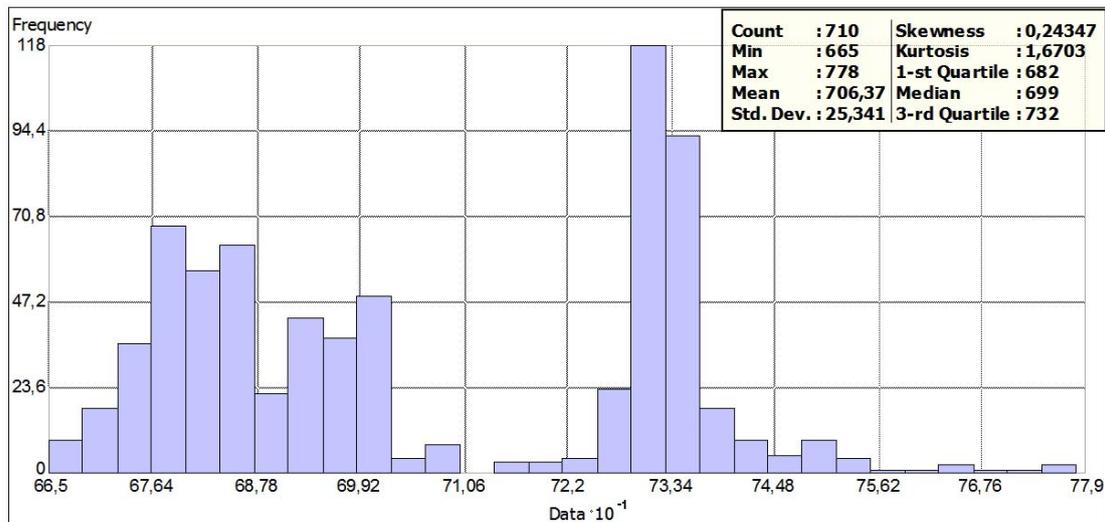


Fig. 53. Localización de los datos utilizados, histograma y tabla resumen de los principales estadísticos para todos los datos.

Este diagrama da una idea más concreta de los valores entre los que varía la variable estudiada. Así, se observa que en los perfiles 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 la cota del contacto se localiza entre 675 y 700m, mientras que en el resto se localiza entre 710 y 750m. Los primeros se corresponden con los perfiles que se localizan en las unidades inferior e intermedia, mientras que el resto son los que se localizan en la unidad superior de la formación de travertinos.

Análisis de Tendencia

Además de este análisis descriptivo inicial, se realizó un análisis de tendencia con el fin de estudiar de manera gráfica cómo se distribuye espacialmente la cota del contacto (Fig. 55). Mediante este análisis se ha podido definir una tendencia generalizada de distribución, en la que se observa que los valores de la cota aumentan progresivamente de O a E y de N a S.

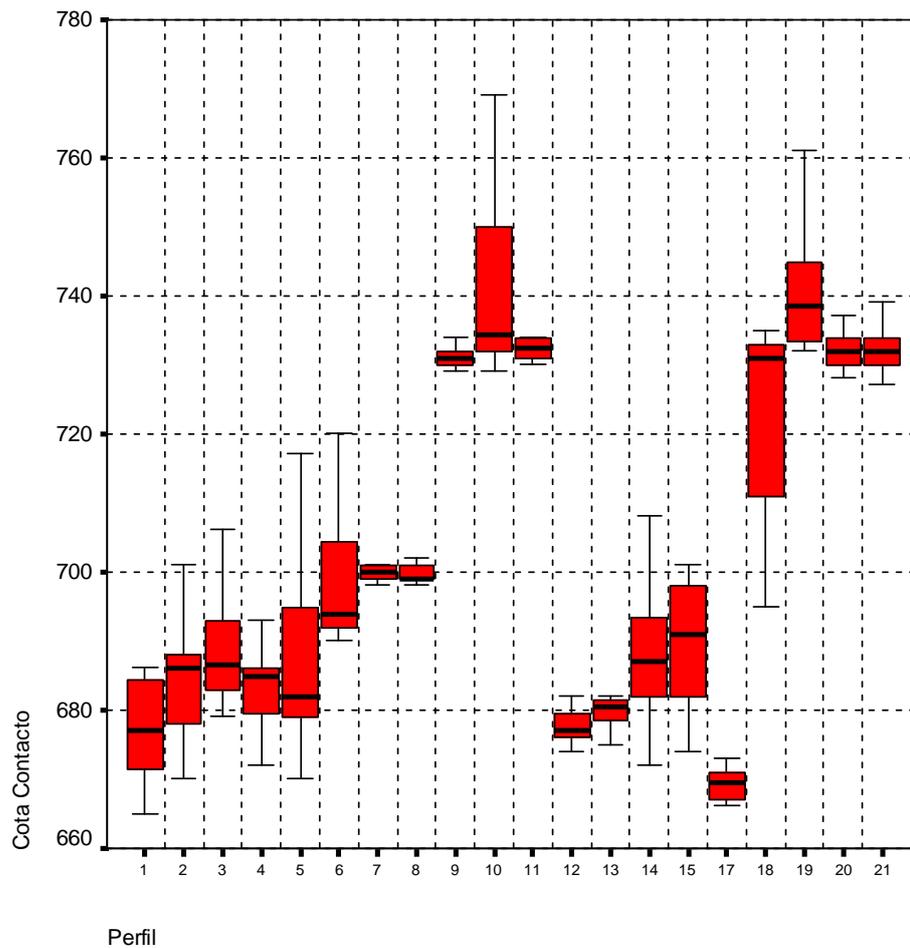
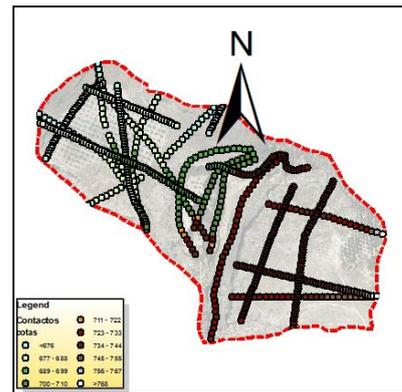


Fig. 54. Diagramas de caja para todos los perfiles analizados que representan como varía el contacto en cada uno de los perfiles.



Análisis de tendencia

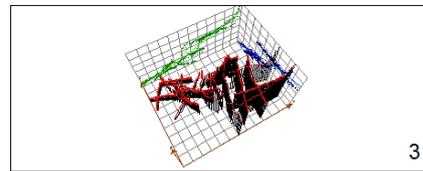
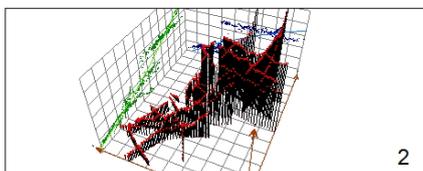
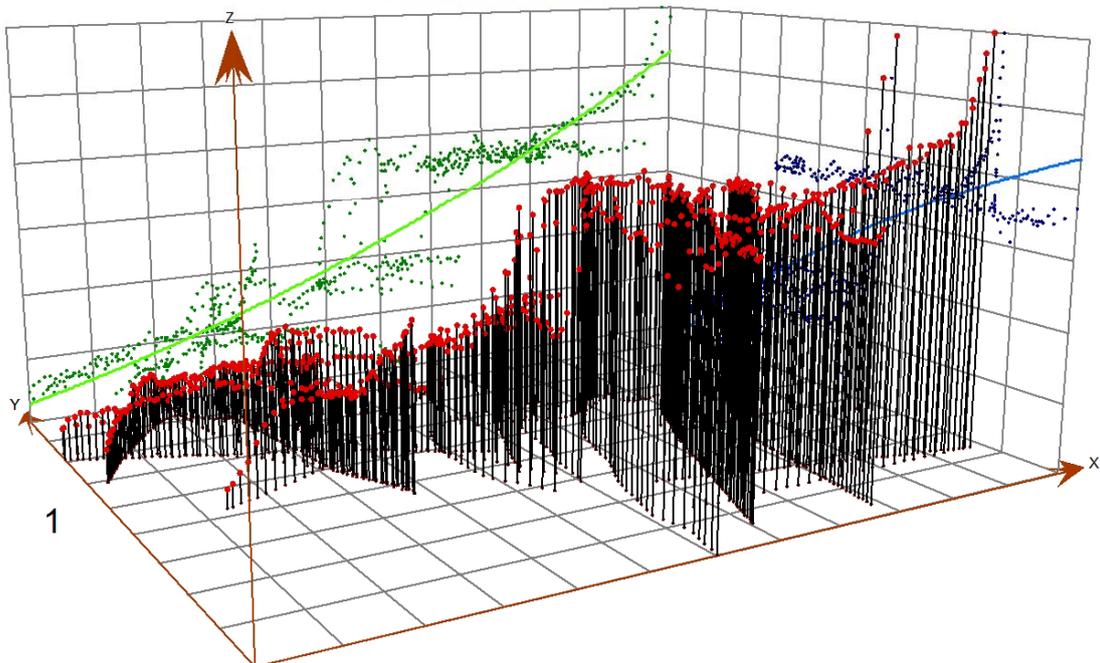
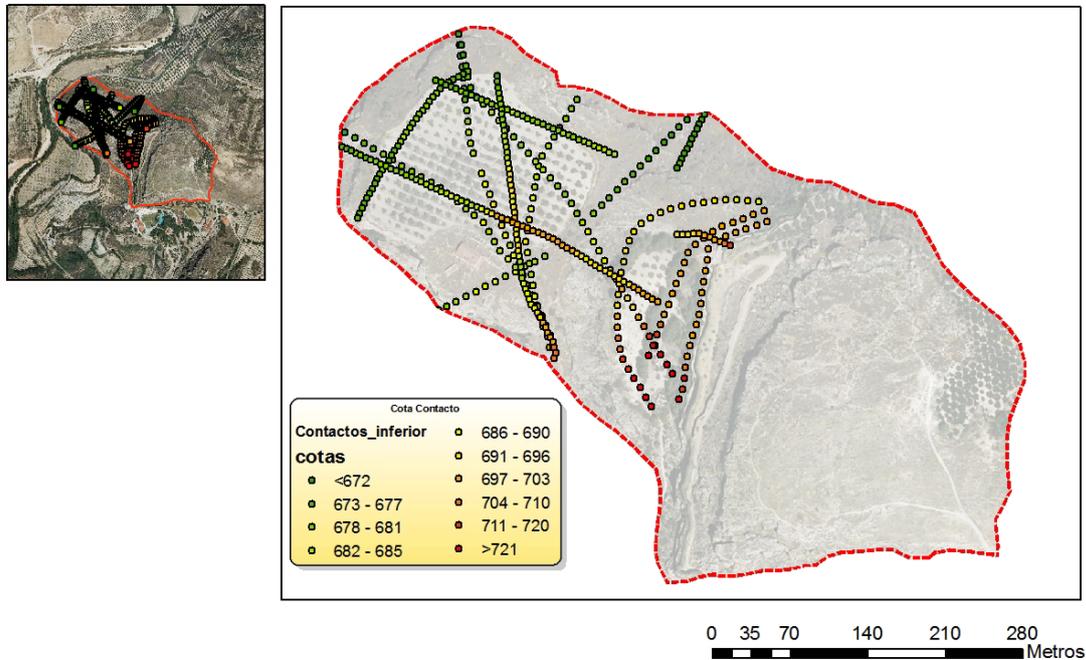


Fig. 55. Análisis de tendencia en el que se representan los valores de la cota del contacto entre la formación de travertinos y las margas subyacentes finicretácicas, tanto en el espacio (en rojo), como proyectados en los planos E-O (en verde) y en el N-S (en azul). Se muestran 3 perspectivas diferentes. El Norte se corresponde con los valores crecientes de Y, y el Este con los valores crecientes de X.

Tanto el histograma, los diagramas de cajas y bigotes como el análisis de tendencia han permitido obtener una primera conclusión, y es que el conjunto de datos analizados se distribuyen en 2 poblaciones bien diferenciadas y que, por tanto, es preferible considerarlas

separadamente. Para ello, se han independizado los datos procedentes de los perfiles situados sobre las unidades inferior e intermedia, de los ubicados sobre la unidad superior, y se han reinterpretado los diagramas obtenidos (Figs. 56, 57 y 58)



Histograma

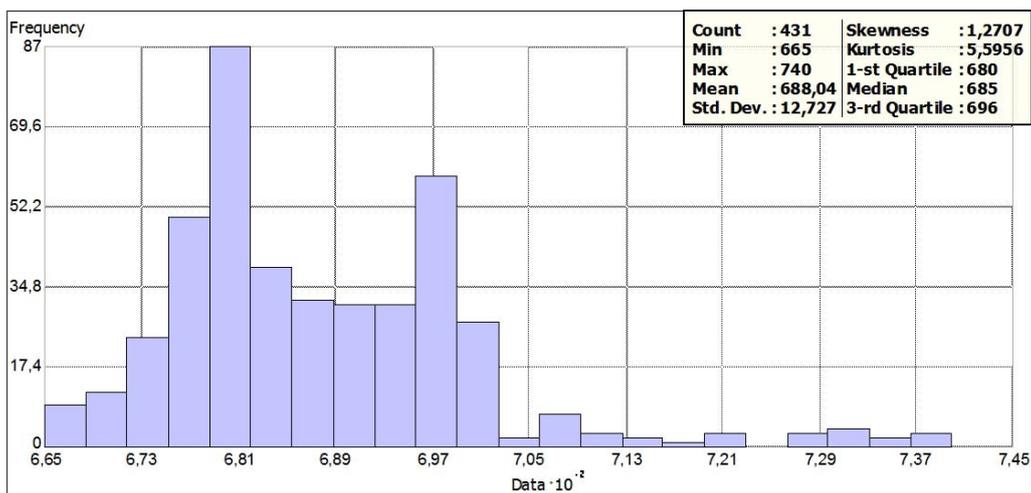
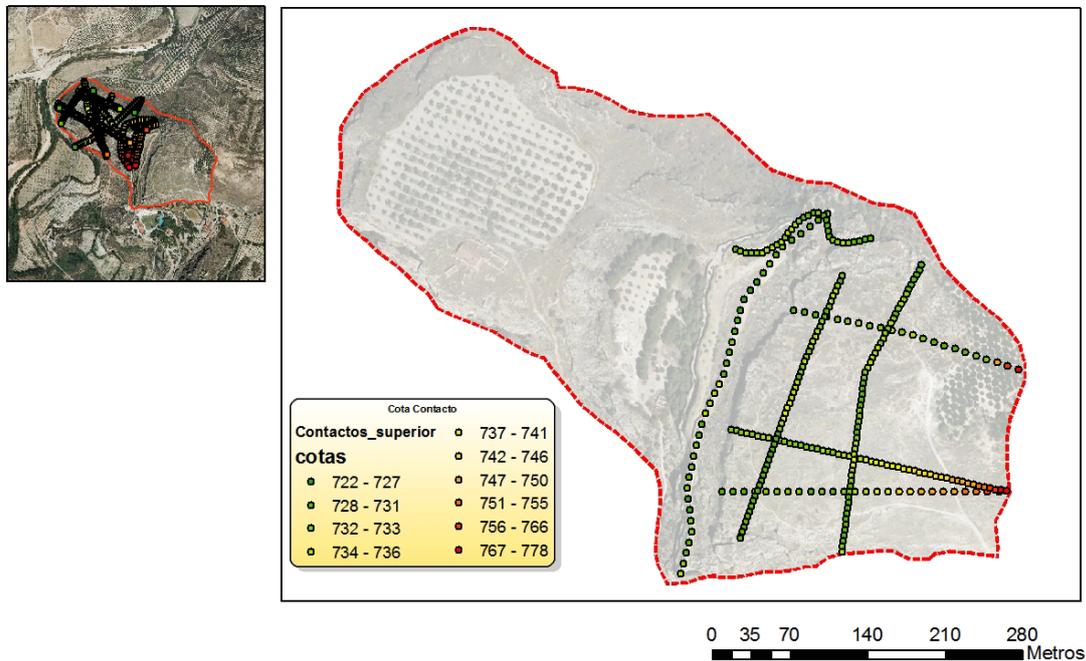


Fig. 56. Localización de los datos correspondientes a los perfiles situados sobre las unidades inferior e intermedia, histograma y tabla resumen de los principales estadísticos.

Al analizar los datos de los perfiles situados sobre las unidades inferior e intermedia se observa que la cota del contacto entre los travertinos de dichas unidades y las margas

subyacentes varía entre 665 y 740m, y que la mayoría de los datos se distribuyen entre 680 y 696m. En esta zona, la media del contacto está en 688 ± 12 m.



Histograma

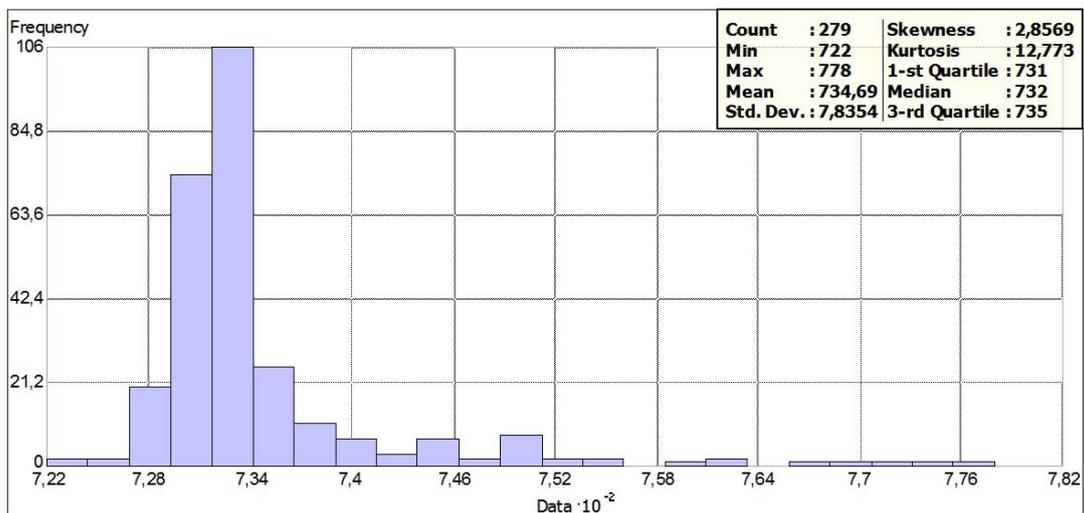


Fig. 57. Localización de los datos correspondientes a los perfiles situados sobre la unidad superior, histograma y tabla resumen de los principales estadísticos.

La cota del contacto para los perfiles situados en la plataforma superior tiene una media de 734 ± 8 m, alcanzando un valor máximo de 778m y un mínimo de 722m. De manera análoga a los datos del dominio inferior, se observa una asimetría positiva, en este caso

más exagerada, la cual es debida a los valores altos que alcanza la cota del contacto en la zona oeste (valores en rojo en la Fig. 57), pero al excluir estos casos, la mayoría de los datos se distribuyen en tan sólo 4m; es decir, entre 731 y 735m, lo que refleja que la cota del contacto entre esta unidad superior y las margas subyacentes se mantiene muy constante.

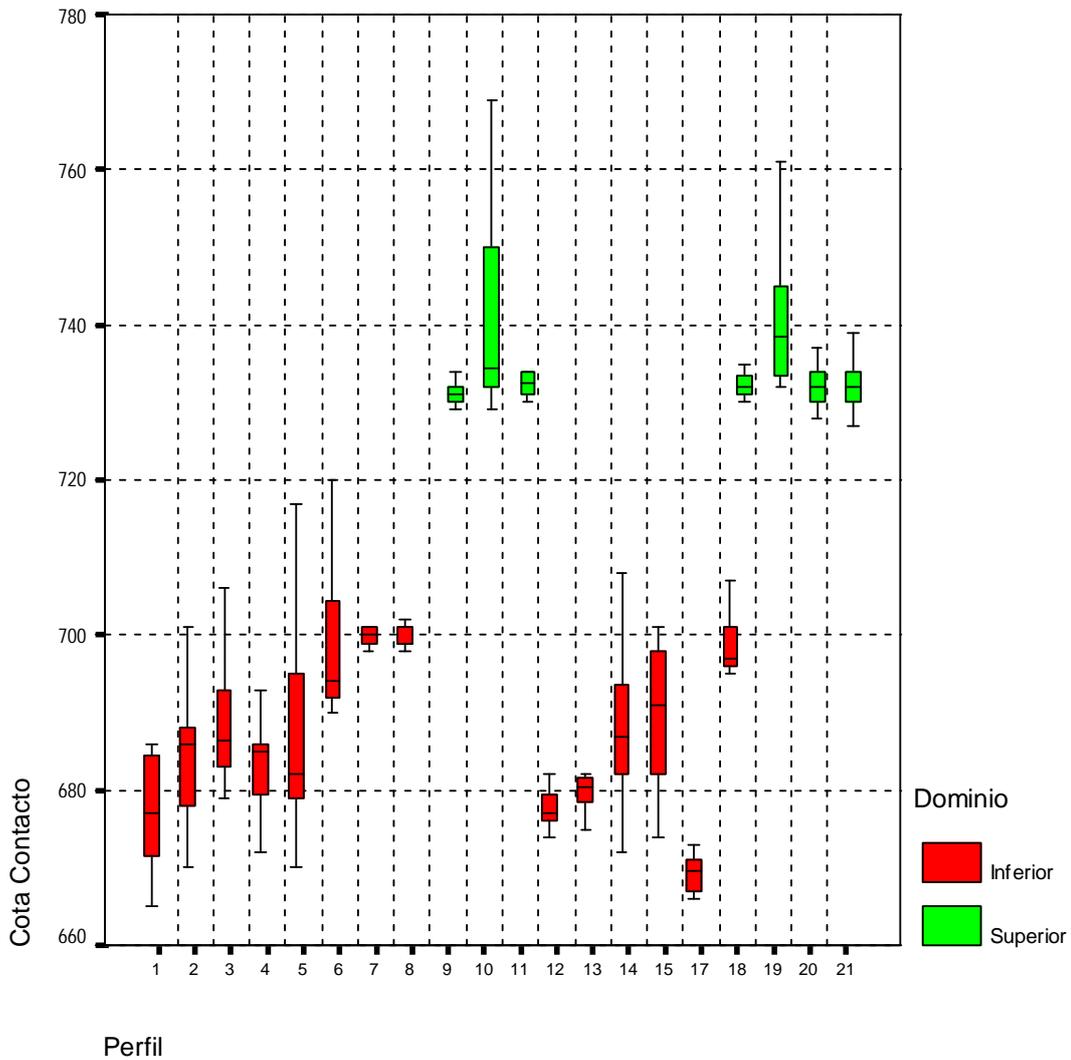


Fig. 58. Diagramas de caja para todos los perfiles analizados, agrupando los datos en dos dominios: el inferior, para aquellos pertenecientes a los perfiles situados sobre las unidades inferior e intermedia, y el superior, para los datos correspondientes a los perfiles situados sobre la unidad superior.

El diagrama de cajas y bigotes (Fig. 58) corrobora lo descrito hasta el momento; es decir, existen dos poblaciones de datos según se analicen los perfiles correspondientes al dominio inferior o al superior. En el primer caso, la cota del contacto es siempre inferior a 720m y

generalmente a 700m, mientras que en el dominio superior los valores de la cota del contacto oscilan entre 730 y 740m.

Análisis de la continuidad espacial.

Tras estos dos primeros análisis, se realizó el análisis de la correlación espacial de los datos, para lo que se elaboró la nube semivariograma (Fig. 59). En ella se representa el valor del semivariograma en el eje Y, frente a la distancia de cada pareja de datos, en el eje X.

En este diagrama cada punto representa un par de valores, comprobándose que, en general, los valores más próximos entre sí (valores cercanos al 0 en el eje X) tienen valores más bajos en el variograma. Esta tendencia general tiene algunas excepciones, las cuales están representadas en azul en la Fig. 59. Estos son los valores que, aún estando relativamente cercanos, tienen valores elevados de semivariograma. Este comportamiento es típico de valores anómalos en la medida, a no ser que pueda explicarse de algún otro modo. En este caso, dichos puntos representan parejas de valores que, a pesar de encontrarse próximos entre sí, representan cotas pertenecientes a la unidad inferior y a la superior en las cuales se alcanzan los valores topográficos más elevados.

También es de interés el estudio de la superficie semivariograma ya que, representando el valor del variograma con la dirección, se pueden obtener las direcciones de variación de las cotas principales, en este caso N125E. Esta dirección coincide con la que domina el desarrollo de las unidades de travertinos, y que es además la dirección en la que se observan las variaciones más pronunciadas es estos datos. En la dirección perpendicular, N35E, los valores de las cotas tienen mucha menor variación. Estas direcciones se corresponden con las de la tendencia analizada en la Fig. 55.

Nube semivariograma

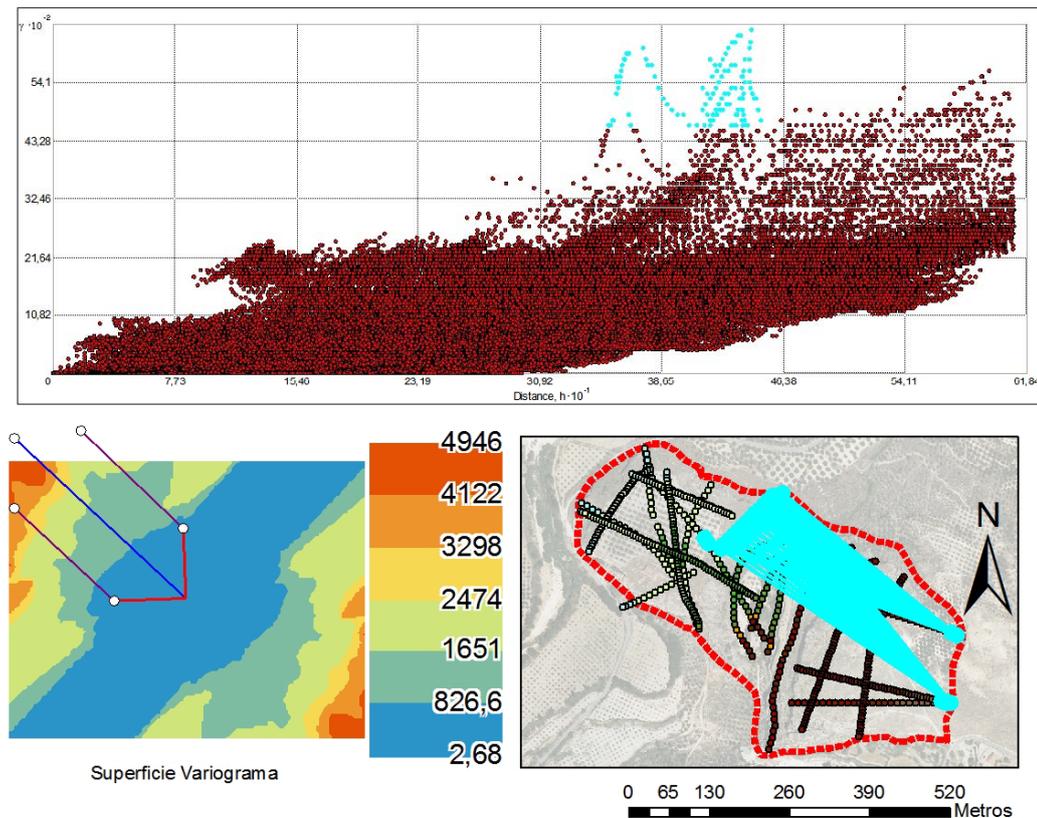


Fig. 59. Nube y superficie semivariograma. En azul aparecen resaltados las parejas de valores con valores de semivariograma más altos.

Realizado el análisis estadístico y de correlación espacial de los datos, se puede proceder a estimar los datos mediante el “*krigeado*” seleccionado. De esta manera se obtiene un mapa de elevaciones de la cota del contacto estudiado. Como se describió en el apartado de metodología, el primer paso de esta etapa consiste en elaborar el semivariograma experimental en la dirección de anisotropía y en su perpendicular.

En la fase de descripción de los datos se identificó que los valores de la cota tienen una tendencia general a aumentar progresivamente desde el oeste al este y de norte a sur (ver Fig. 55) Dicha tendencia puede ser representada matemáticamente mediante una fórmula, en este caso mediante un polinomio de primer orden, que además se representa gráficamente (Fig. 60)

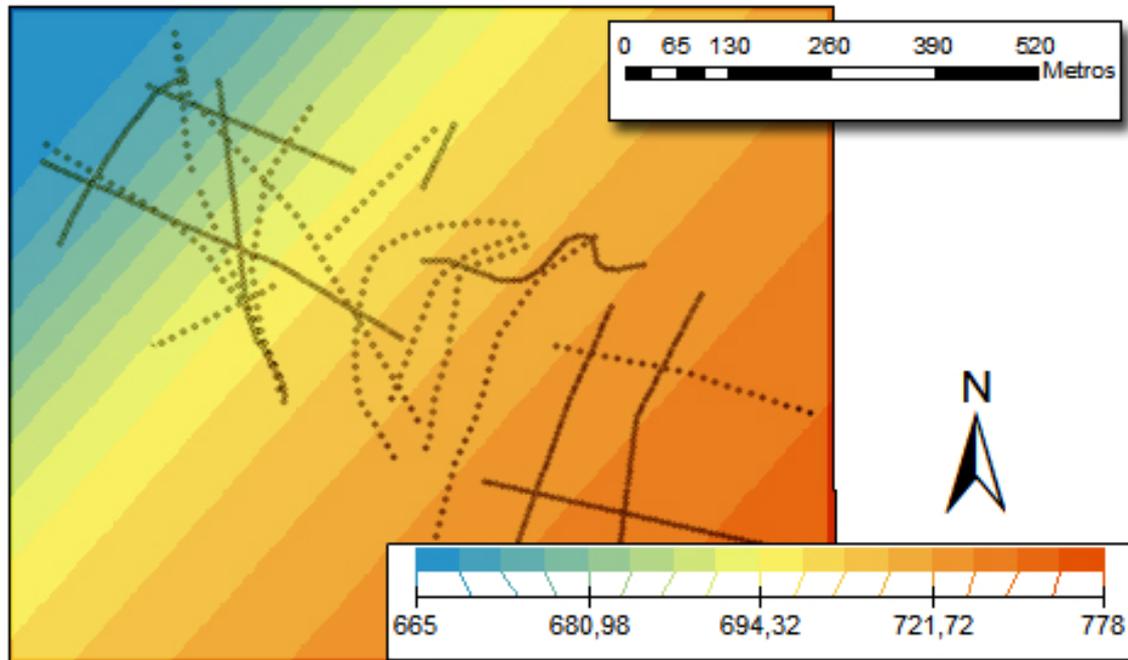


Fig. 60. Representación gráfica de la tendencia general identificada en la variabilidad de la cota del contacto entre la formación de travertinos y las margas subyacentes finicretácicas.

Una vez identificada dicha tendencia y antes de modelizar los datos, se puede eliminar temporalmente de cada valor medido dicha tendencia y así poder realizar el análisis con los valores residuales de la variable solamente. De esta manera, se obtiene un modelo más fiable. Antes de realizar la estimación final, la tendencia es añadida de nuevo a los datos para obtener valores coherentes con la variable estudiada.

Después de eliminar de los datos la tendencia general identificada, se procedió a la elaboración de los semivariogramas experimentales en las direcciones de máxima y mínima variabilidad; es decir según N125 y 35 E, respectivamente. Además, se han elaborado múltiples modelos variando los principales parámetros del semivariograma, y se ha realizado la validación cruzada para cada uno de ellos. Tras realizar la comparación entre cada uno de los modelos se seleccionó un semivariograma teórico, de tipo esférico, cuya fórmula general [10] es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[\left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ C & h > a \end{cases} \quad [10]$$

Donde: C y a representan la meseta y el alcance del semivariograma; h es la distancia de separación entre medidas (gap); y $\gamma(h)$ es el valor del semivariograma.

Los parámetros seleccionados para construir el modelo semivariograma teórico se resumen en la Tabla 2 y se representan en la Fig. 61.

Tabla 2. Resumen de los parámetros seleccionados para elaborar el modelo de semivariograma teórico.

Parámetros	
Tipo de modelo	Esférico
Alcance Mayor	233
Alcance Menor	170.12
Dirección	35
Meseta	120.14
Efecto Pepita	0
Tamaño del lag	27.44
Número de lags	12

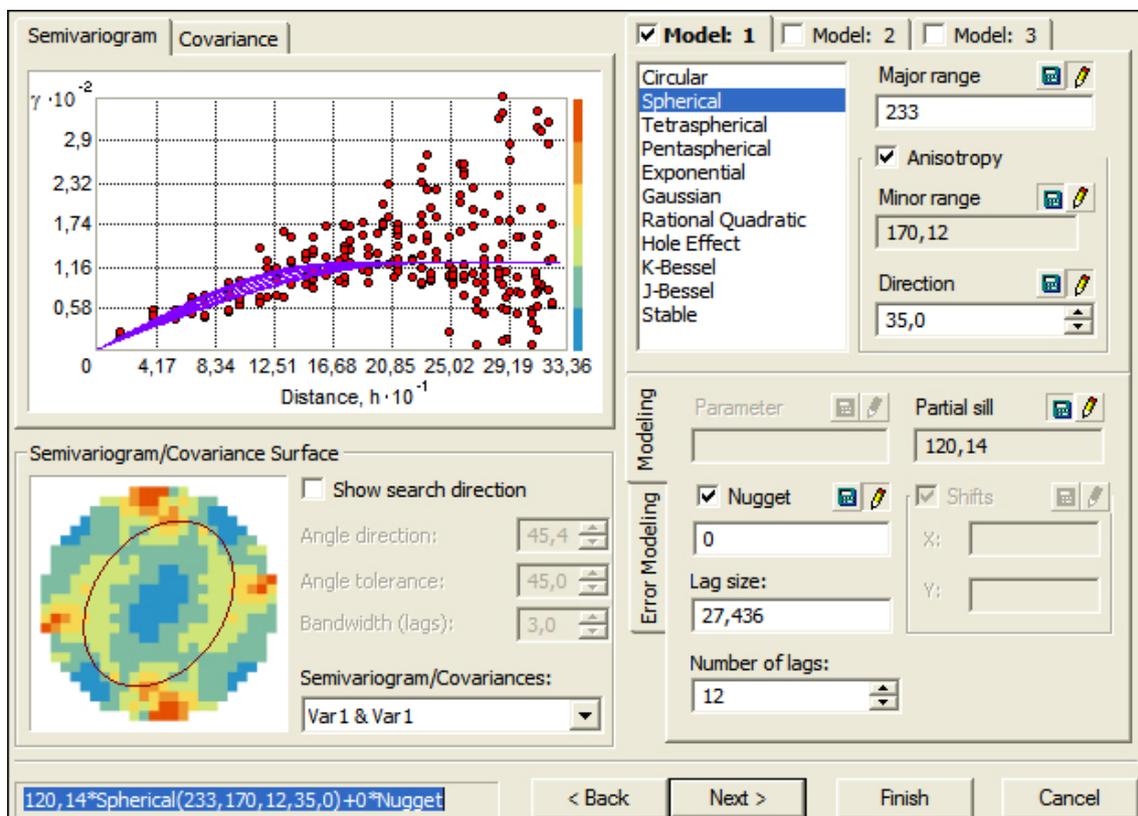


Fig. 61. Semivariograma experimental (puntos rojos), modelo teórico adaptado (líneas moradas), superficie semivariograma y parámetros del semivariograma.

Con estos parámetros, el semivariograma teórico seleccionado queda descrito mediante la expresión [11]:

$$\gamma(h) = 120.14 \text{ Spherical}(233, 170.12, 35, 0) \text{ [11]}$$

Predicción espacial.

Una vez seleccionado el modelo teórico que se adapta a los datos de este trabajo, se procedió a estimar la cota del contacto en aquellos puntos sin datos experimentales, obteniéndose así el modelo digital de elevaciones de la cota del contacto (Fig. 62)

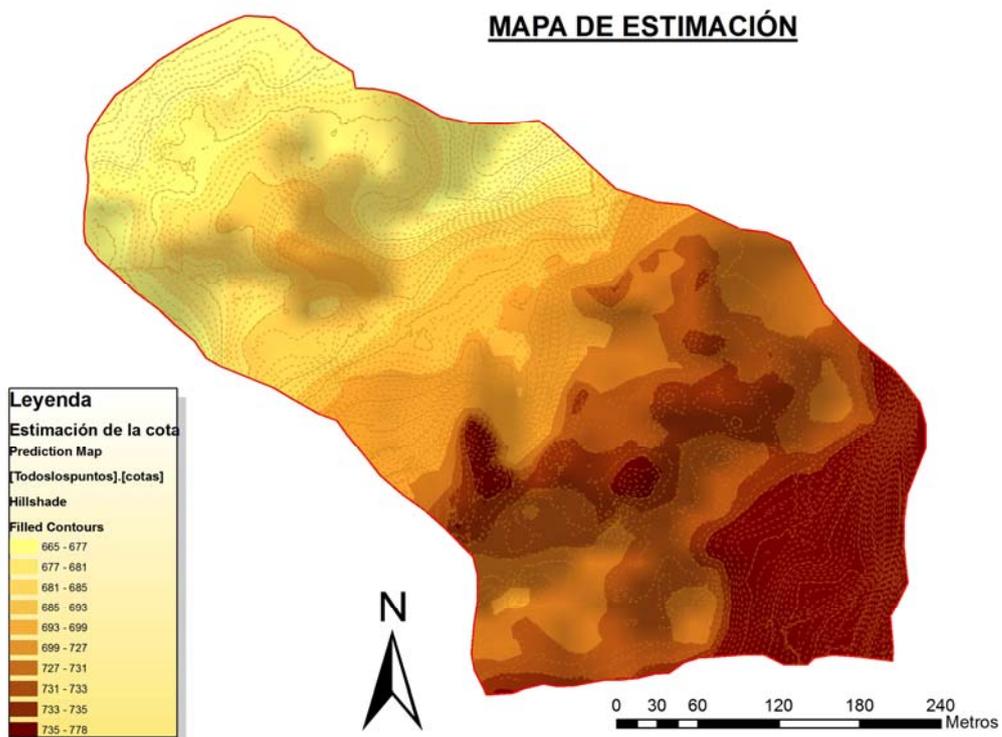
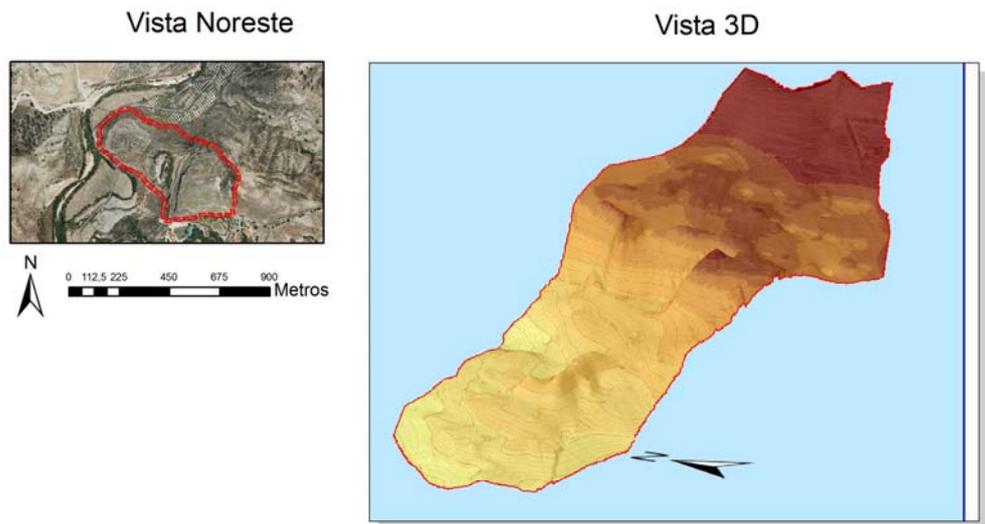


Fig. 62. Panorámica en 3D y mapa de elevaciones de la cota del contacto.

Validación del modelo.

El último paso de la metodología propuesta consiste en validar el modelo elaborado, para lo que se ha usado el método de la validación cruzada, ya descrito en el apartado de metodología. Así, después de comparar los valores estimados con los reales se obtuvieron una serie de estadísticos (Tablas 3 y 4) y gráficos (Fig. 63) que permitieron evaluar la calidad de la predicción realizada.

Tabla 3. Fórmulas de los principales estadísticos calculados en la validación cruzada

Error Medio	Error medio estandarizado
$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)}{n}$
Raíz cuadrada del error cuadrático medio estandarizado	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)]^2}{n}}$
Error estándar medio estimado	
$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}(s_i)}{n}}$	Donde: $Z(s_i)$ es el Valor $Z(s_i)$ el valor observado $\sigma(s_i)$ el error estandar en s_i

Tabla 4. Principales estadísticos extraídos del análisis de la validación cruzada

Estadísticos	Valor
Error medio	4.84E ⁻³
Error medio estandarizado	-6.2E ⁻⁴
Raíz cuadrada del error cuadrático medio	1.87
Raíz cuadrada del error cuadrático medio estandarizado	0.88
Error estándar medio	2.36

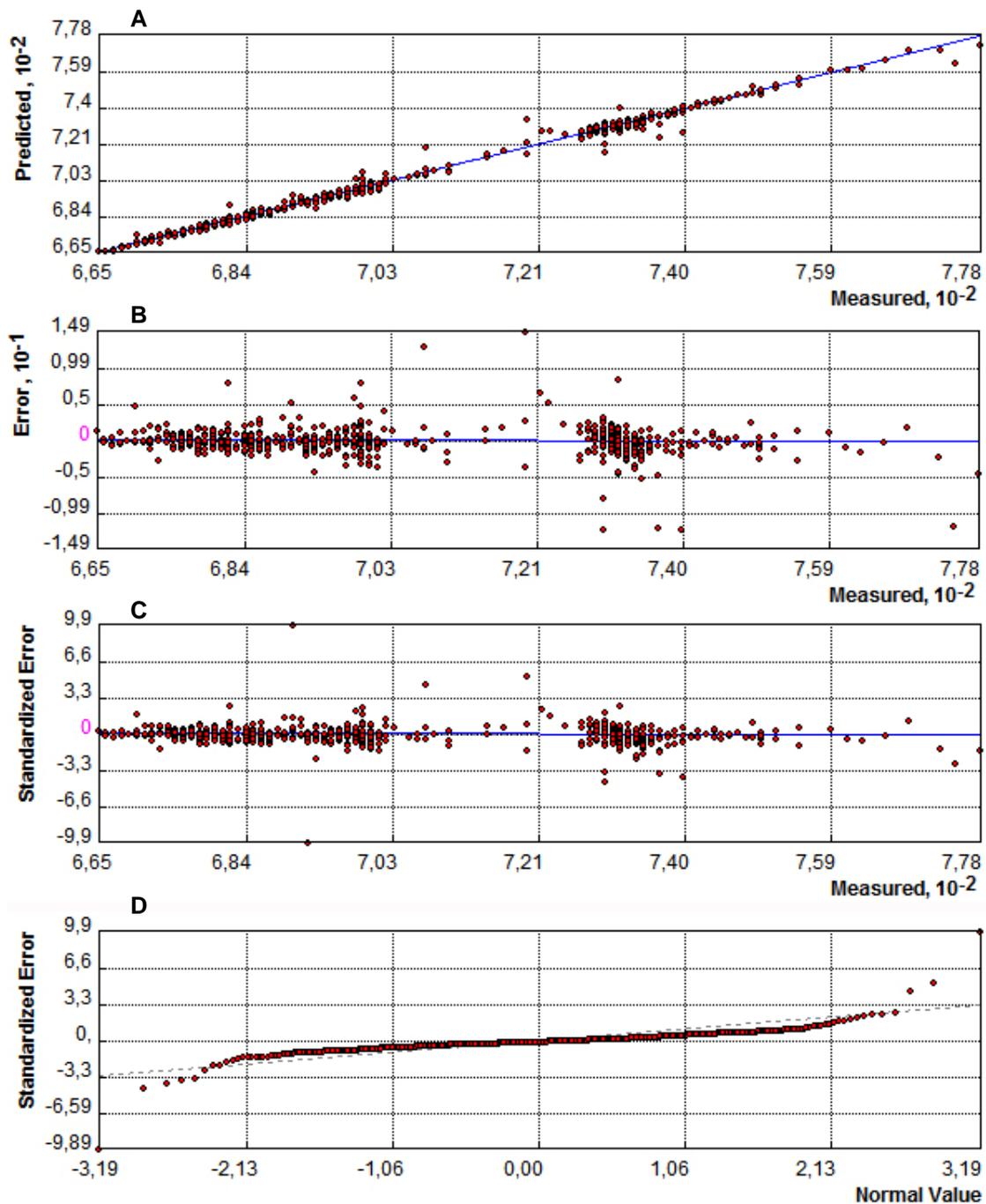


Fig. 63. Gráficos obtenidos mediante el proceso de validación cruzada. A) Valor estimado. B) Valor del error. C) Valor del error estandarizado. D) Gráfico de cuantiles del error.

Analizando los valores obtenidos en la validación cruzada se observa que tanto el error medio cometido como el estandarizado están muy cercanos a 0. También se observa en la Fig. 63A, gráfico de valores estimados, que los puntos se distribuyen según una recta de pendiente próxima a la unidad, lo que significa que los valores estimados son muy aproximados a los medidos. Los mayores errores se producen entre los valores de 720 y

740m, lo que es debido a que corresponden a la zona del substrato con mayor pendiente y, por lo tanto, donde los errores cometidos son mayores.

Una vez evaluado el modelo espacial elaborado, para realizar la interpolación de los datos se ha realizado un mapa del error estándar asociado a la estimación (Fig. 64), el cual proporciona una idea de la incertidumbre local de la previsión realizada. En este mapa se observa que el error aumenta al alejarse de los puntos en los que no existen datos experimentales.

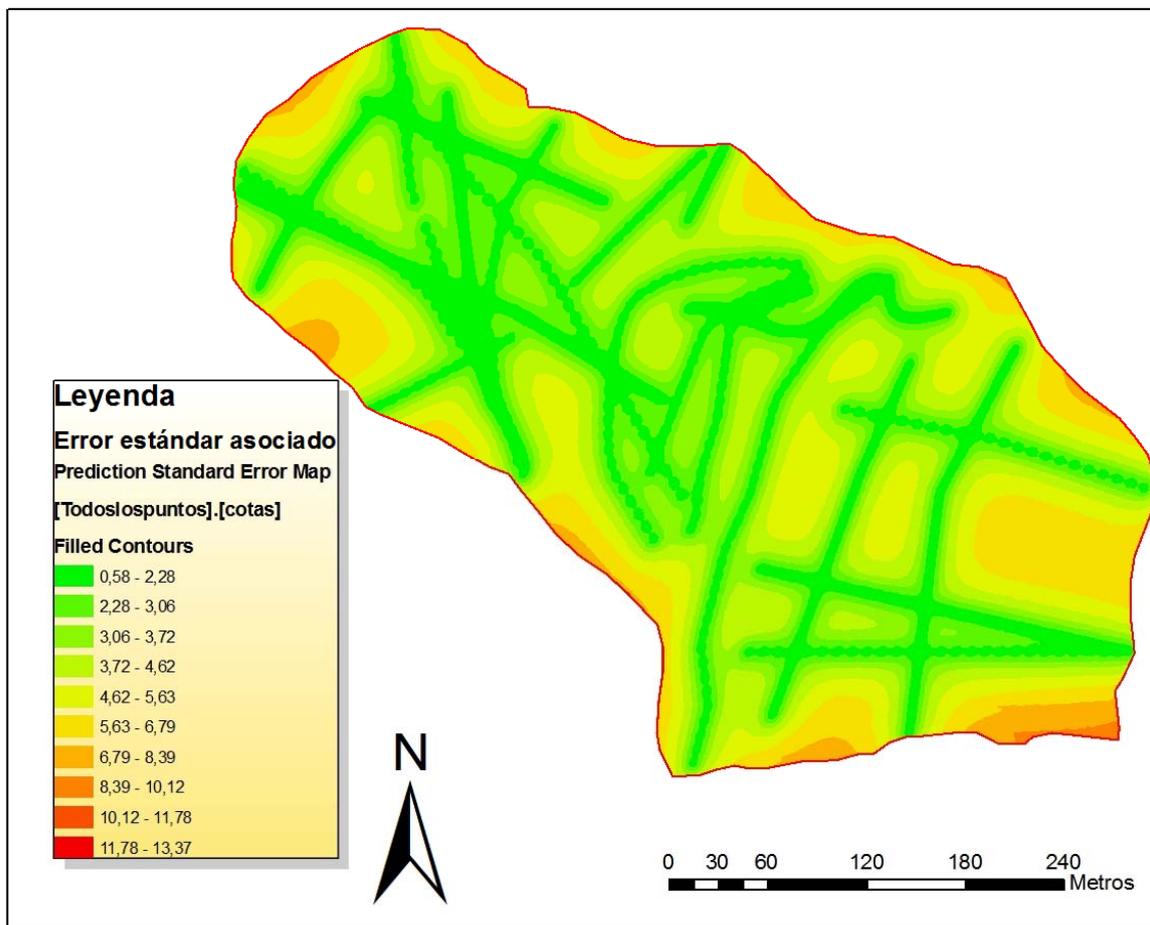


Fig. 64. Mapa de evaluación del error estándar asociado al krigado.

Una vez realizado el modelo de elevaciones de la cota del contacto estudiado, se procedió a realizar el mapa de isopacas de la formación problema (Fig. 65)

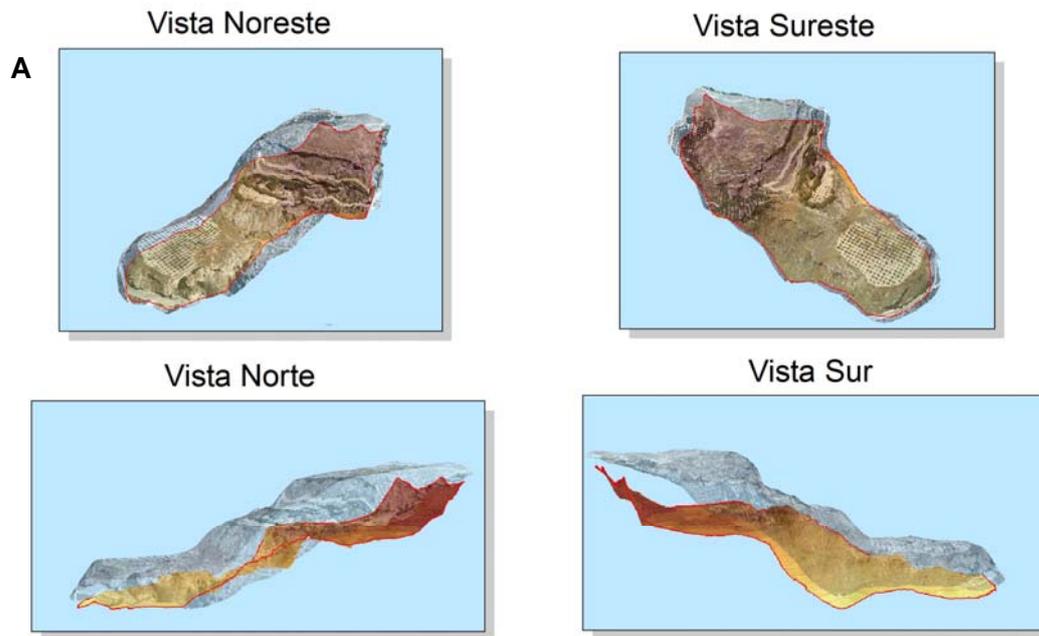
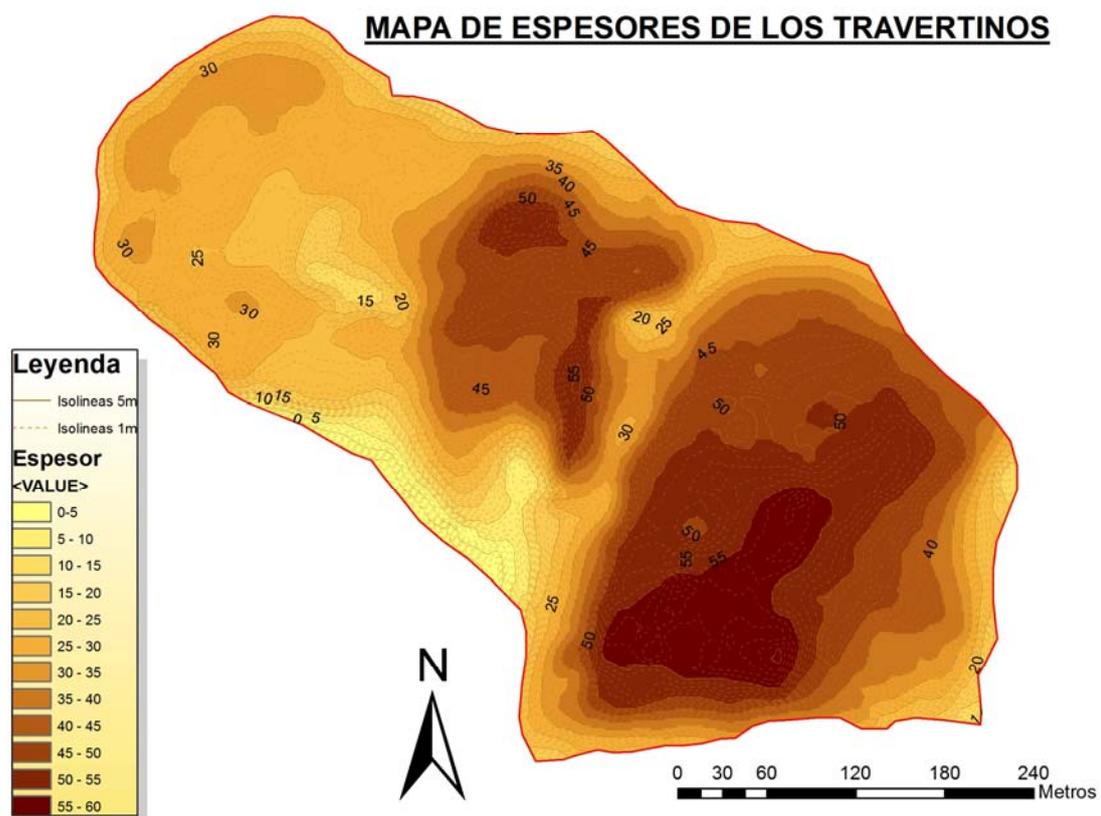
**B**

Fig. 65. a) Perspectivas en 3D del modelo digital de elevaciones y de la superficie topográfica, y b) mapa de isopacas de la formación de travertinos.

En el mapa de isopacas se observa que en la formación de travertinos existen dos zonas en las que se alcanzan los mayores espesores, aproximadamente 50m, que se corresponden,

por un lado, con la zona central de la formación, en la que coinciden las unidades inferior e intermedia, y por otro, con la zona de desarrollo de la unidad superior, que es la más potente de las 3 unidades y con espesores que superan los 50m.

3. 3. 2. Análisis Geoestadístico de Detalle.

Análisis descriptivo de los datos.

Después de la elaboración del modelo digital de elevaciones, que representa el contacto entre los travertinos y las margas del substrato, y partiendo de los datos obtenidos en la etapa de interpretación de detalle de los perfiles 5, 6, 7, 8 y 15, se procedió, de manera análoga, a realizar la estimación de la superficie de la cota del contacto entre las unidades inferior e intermedia con el fin de elaborar una superficie que refleje la morfología de dicho contacto. De esta forma se ha podido calcular el volumen de travertinos de cada unidad independientemente. Para ello, se comenzó con la etapa estadístico-descriptiva que permitió analizar la distribución de los datos (Fig. 66 a y b), así como la posible existencia de tendencias y valores anómalos.

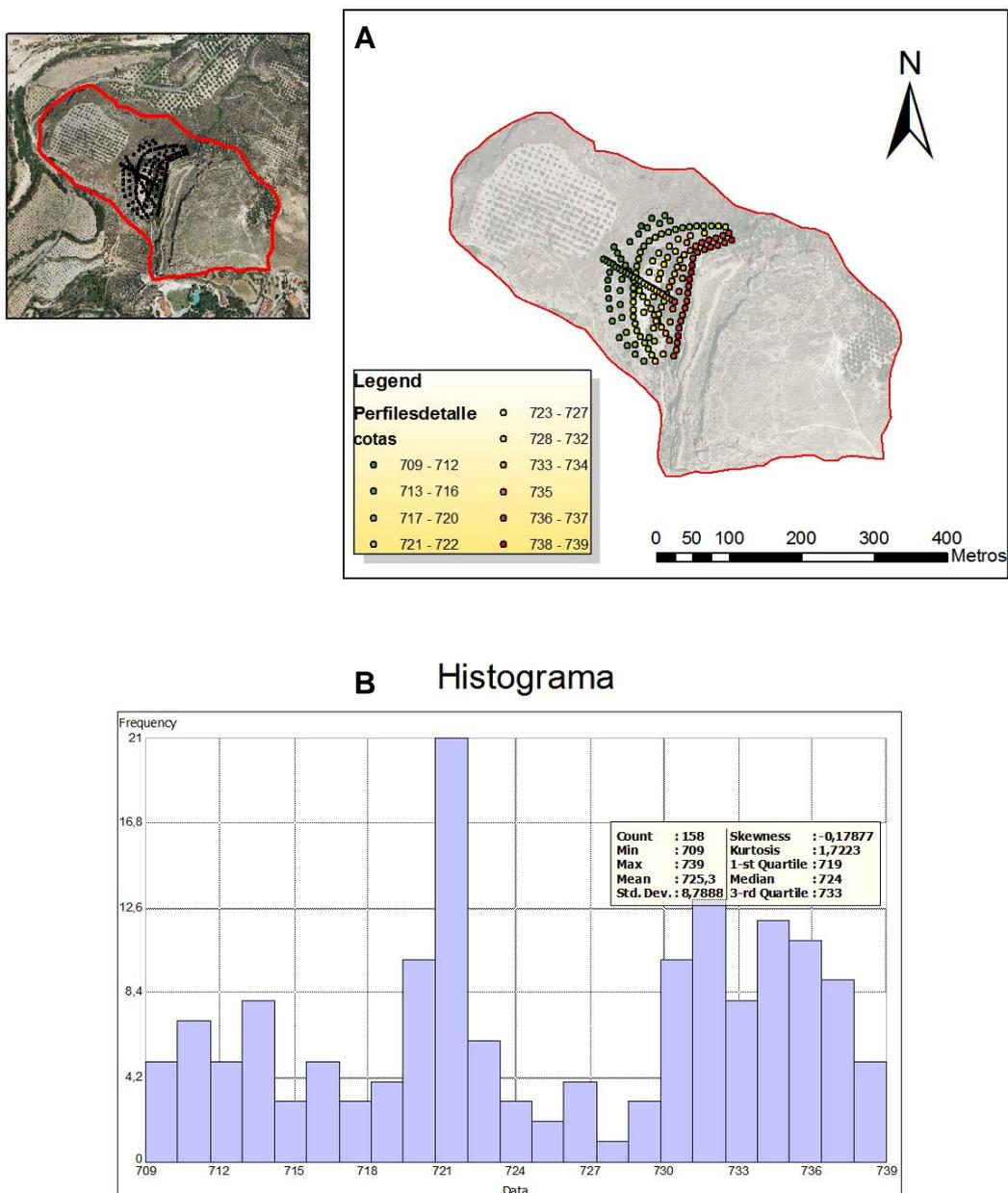


Fig. 66. A) Localización de los datos utilizados; B) histograma y tabla resumen de los principales estadísticos para los valores del contacto entre las unidades intermedia e inferior.

A partir del histograma (ver Fig. 66 B), que representa la distribución de los valores, así como del cuadro resumen con los principales estadísticos, se deduce que el valor medio de la cota del contacto es de aproximadamente 725m y que los valores presentan una gran dispersión.

En el análisis de tendencia (Fig. 67) se observa una variación continua de los valores hacia el E, mientras que en el plano N-S se mantienen bastante homogéneos. Esta tendencia

general puede eliminarse del proceso de “krigeado”, al igual que se hizo al tratar el contacto entre los travertinos y los materiales finicretácicos subyacentes.

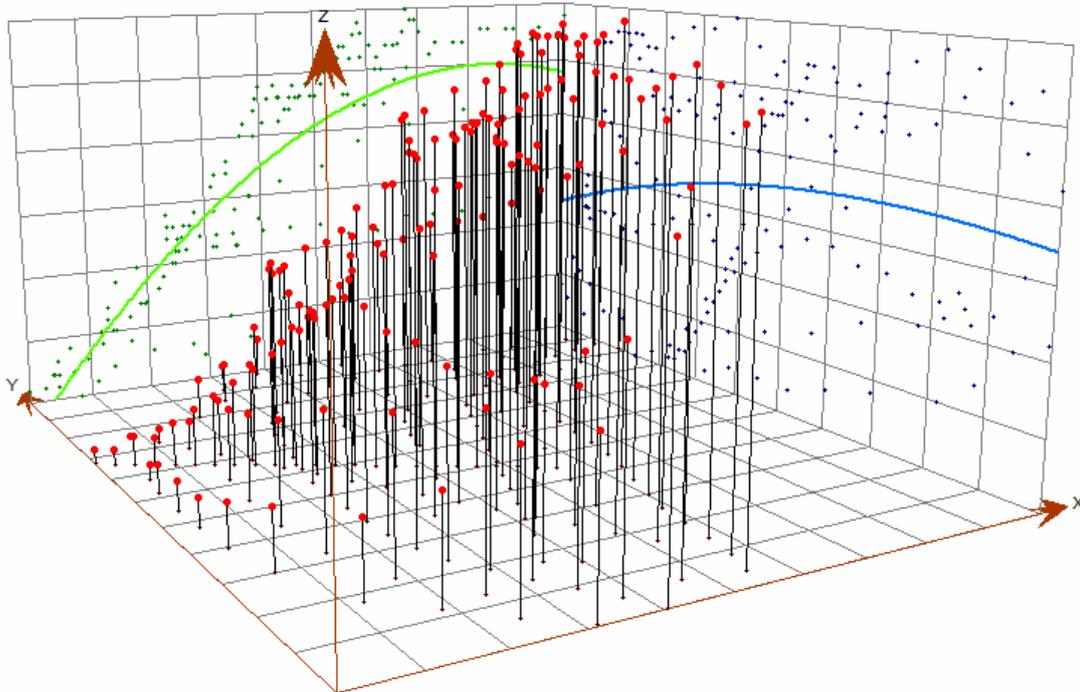


Fig. 66. Análisis de tendencia en el que se representan los valores de la cota del contacto tanto en el espacio (en rojo), como proyectados sobre los planos E-O (en verde) y N-S (en azul). El N se corresponde con los valores crecientes de Y, y el E con los valores crecientes de X.

Análisis de la continuidad espacial.

Los parámetros seleccionados para construir el modelo semivariograma teórico para este conjunto de valores están recogidos Tabla 5 y representados en la Fig. 68.

Tabla 5. Parámetros seleccionados para elaborar el modelo de semivariograma teórico.

	Parámetros
Tipo de modelo	Esférico
Alcance Mayor	140
Alcance Menor	125
Dirección	40
Meseta	35
Efecto Pepita	0
Tamaño del lag	10
Número de lags	20

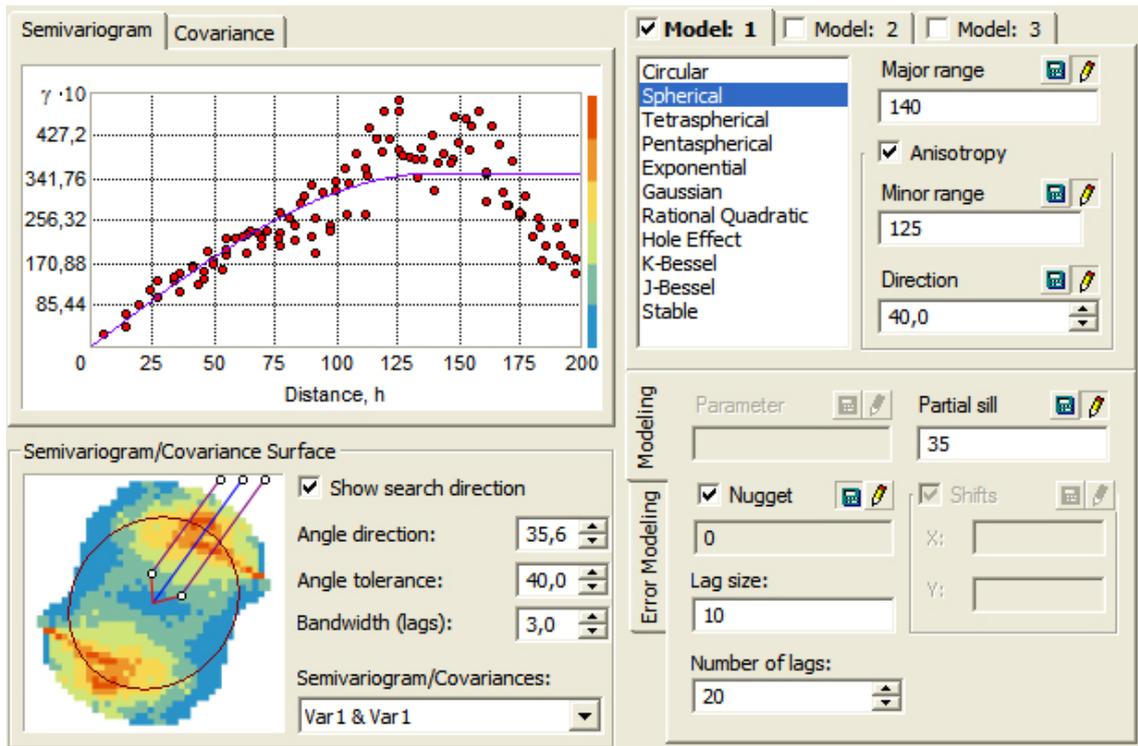


Fig. 68. Semivariograma experimental (puntos rojos), modelo teórico adaptado (líneas moradas), superficie semivariograma y parámetros usados en la construcción del semivariograma (ver Tabla 5).

Con estos parámetros, el semivariograma teórico seleccionado queda descrito mediante la expresión [9]:

$$\gamma(h) = 35 \text{ Spherical} (140, 125, 40, 0) [9]$$

Predicción espacial.

Una vez seleccionado el modelo teórico que se adapta a los datos de este trabajo, se procedió a estimar los valores de la cota del contacto en los puntos de los que no se tenían datos experimentales (Fig. 69)

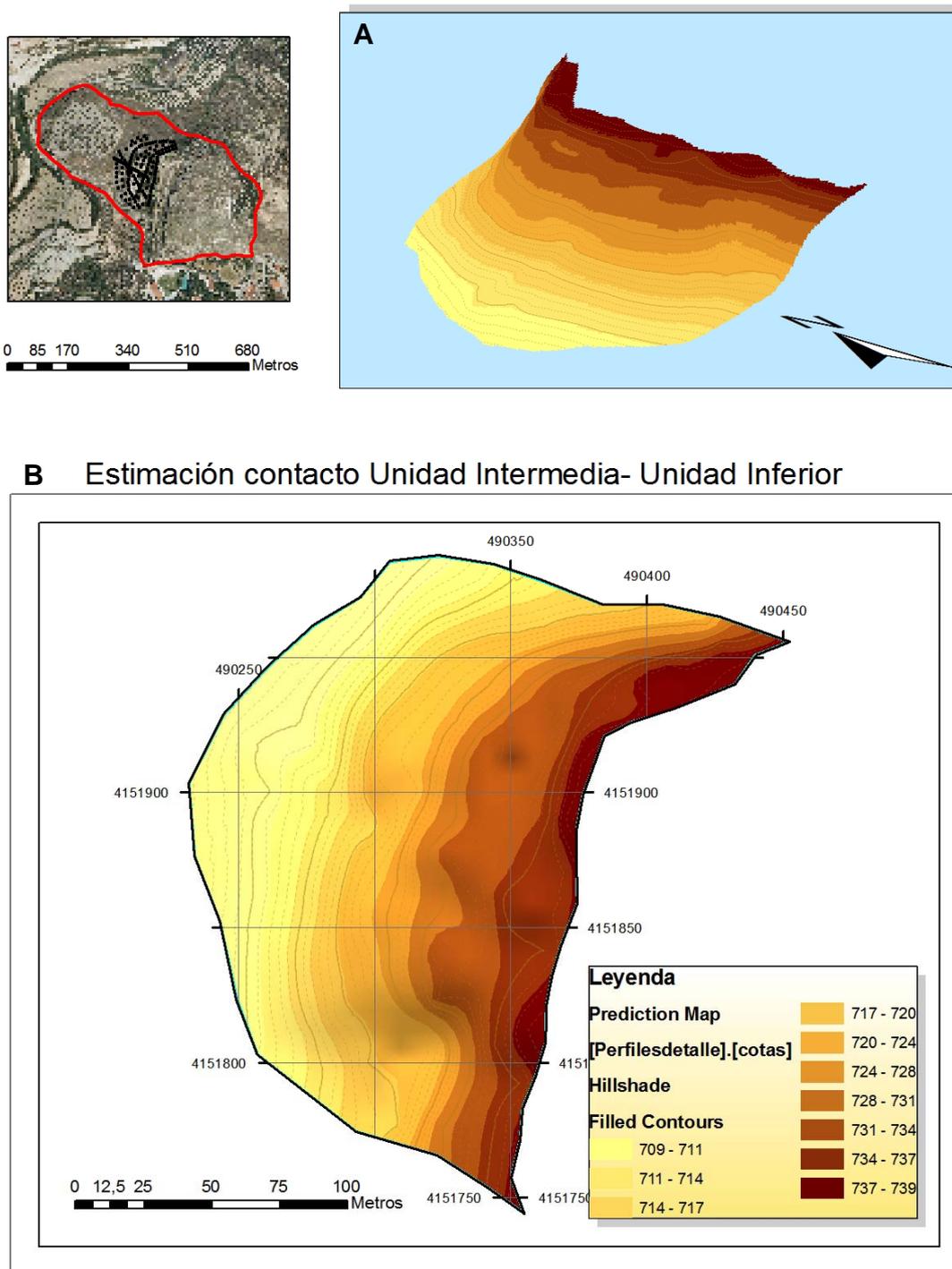


Fig. 69. A) Vista en 3D y B) planta del modelo de elevaciones para el contacto entre las unidades intermedia e inferior de la formación de travertinos.

Validación del modelo.

Tras la realización de la estimación anterior, se procedió a validar el modelo seleccionado, para lo que se dedujeron los estadísticos recogidos en la Tabla 6. De ellos se deduce que el

error medio estandarizado es prácticamente inexistente, y el error medio cometido es del orden del centímetro, por lo que el modelo seleccionado puede considerarse válido.

Tabla 6. Principales estadísticos calculados y seleccionados del análisis de la validación cruzada.

Estadístico	Valor
Error medio	0.021
Error medio estandarizado	0.002
Raíz cuadrada del error cuadrático medio	1.18
Raíz cuadrada del error cuadrático medio estandarizado	0.61
Error estándar medio	1.88

4. CÁLCULO DEL VOLUMEN Y LA MASA DE TRAVERTINOS

Para finalizar con los objetivos que se plantearon en la realización de la tomografía eléctrica de la formación de travertinos de Alicún de las Torres se procedió a calcular el volumen de dicha formación utilizando la extensión Spatial analyst de ArcGIS®, la cual calcula el área de la superficie a analizar proyectada sobre un plano de referencia y a una cota determinada, para después calcular el espacio entre este plano y la superficie en cada punto. En este trabajo, el plano de referencia empleado está situado a una cota de 800m, ya que dicho plano se encuentra por encima del punto más alto de la superficie topográfica en la zona de estudio (Fig. 70).

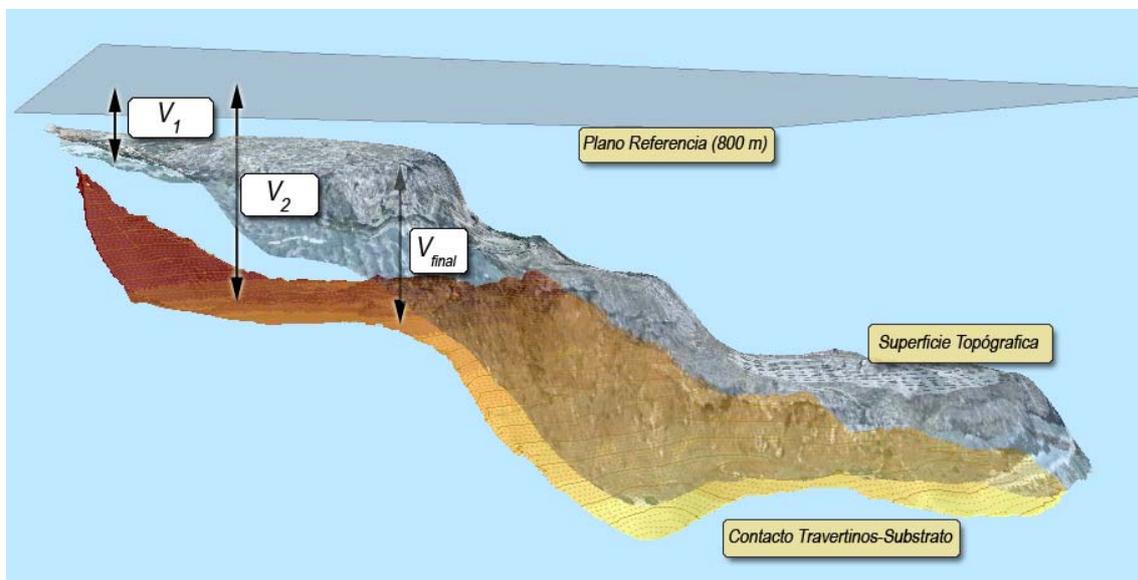


Fig. 70. Esquema explicativo de la metodología usada para calcular el volumen de la formación de travertinos, donde: V_1 : es el volumen comprendido entre la superficie topográfica y el plano usado como referencia; V_2 : el volumen comprendido entre la superficie del contacto formación de travertinos-materiales subyacentes y el plano de referencia; y V_f : el volumen final que ocupan los travertinos.

Además, para calcular el volumen de cada unidad independientemente, se han aislado las superficies previamente elaboradas de cada unidad (Fig. 71)

Límite de las unidades.

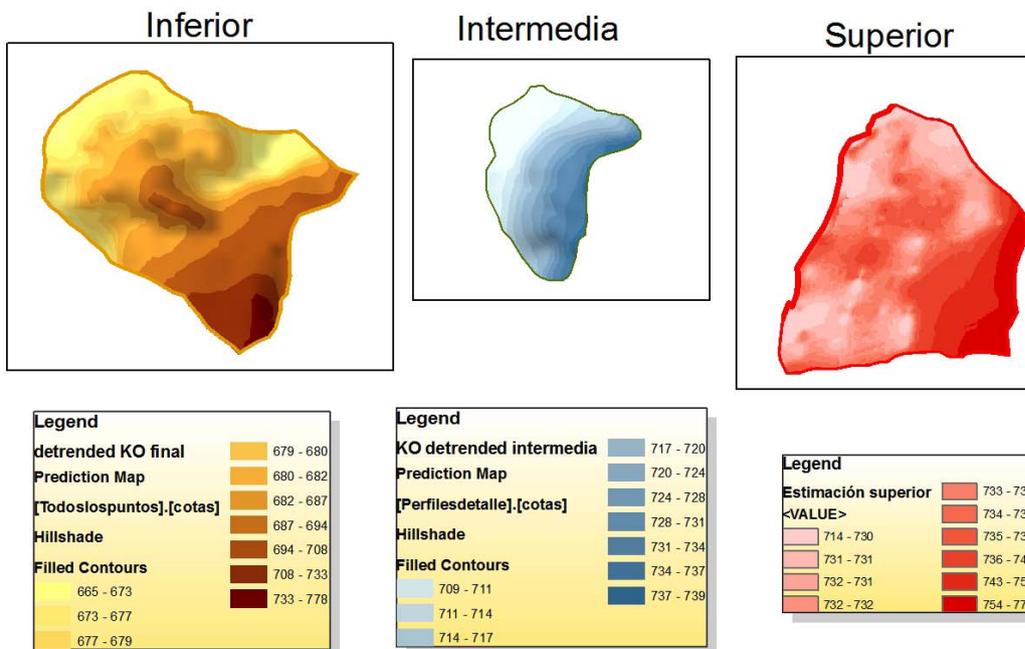
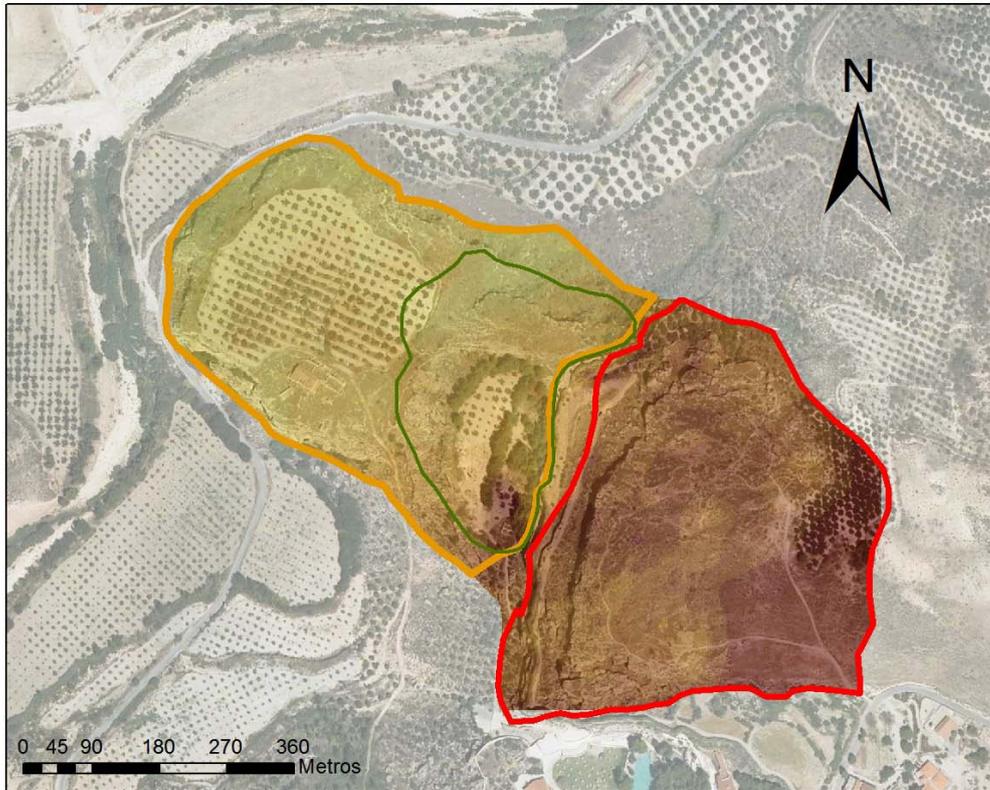


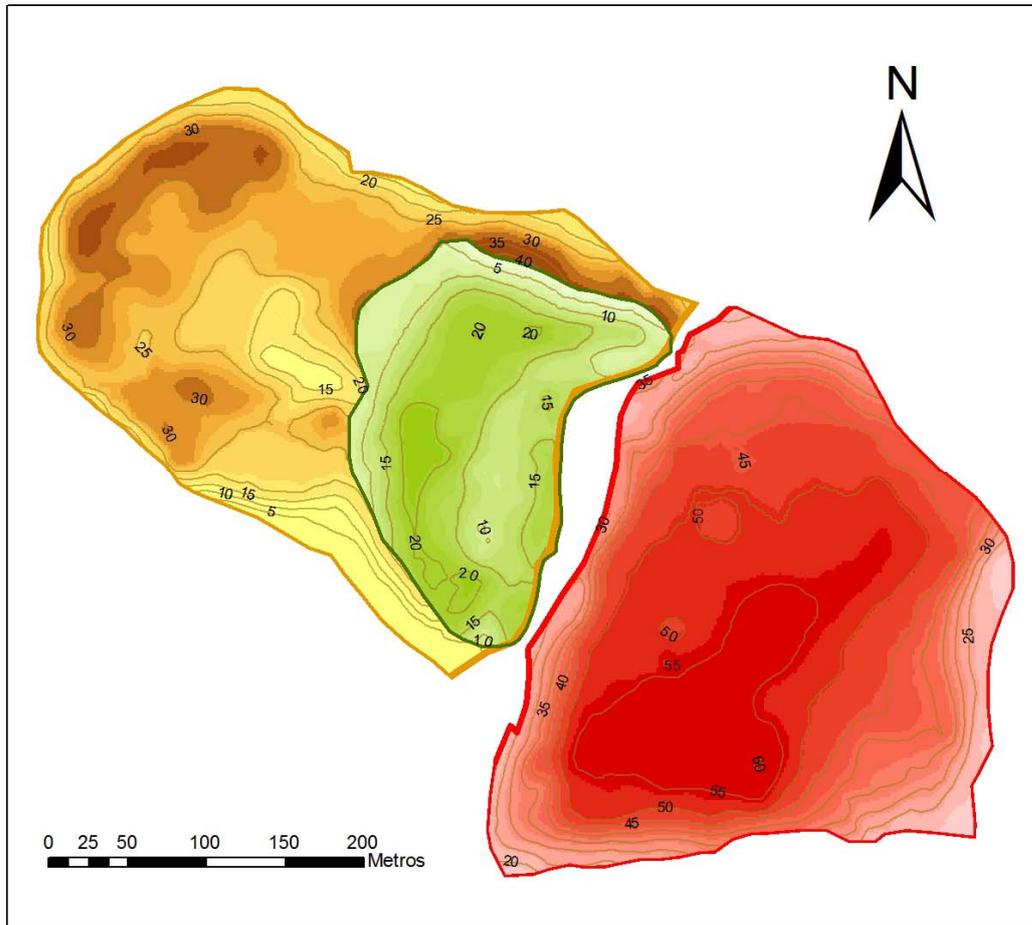
Fig. 71. Esquema en el que se muestran las 3 unidades de travertinos independizadas y que han sido las utilizadas para calcular el volumen de travertinos de cada una de ellas.

A continuación se calcularon los volúmenes con respecto al plano de referencia, tanto para la superficie topográfica (V_1) como para cada superficie de contacto (V_2). De esta manera se calcularon los volúmenes de travertino (Tabla 7) y elaborado los mapas de isopacas (Fig. 72) para cada unidad.

Tabla 7. Cálculo de áreas y volúmenes entre el plano de referencia (800m) y las superficies de estudio (topográfica y de contacto). En ella aparecen los datos correspondientes a las áreas y volúmenes calculados para la superficie topográfica y para el contacto entre la formación de travertinos y el substrato para cada unidad de dicha formación. Como se ha explicado en el texto, V_1 representa el volumen existente entre la superficie topográfica y el plano de referencia, y V_2 entre la superficie de contacto y el mismo plano. El total de volumen (V_2-V_1) representa, por tanto, el volumen que ocupan los travertinos en cada unidad.

	UNIDAD INFERIOR	UNIDAD INTERMEDIA	UNIDAD SUPERIOR	TOTAL
Superficie analizada	Topográfica	Topográfica	Topográfica	Topográfica
Área 3D	95,176 m ²	33,264 m ²	88,307 m ²	216,747 m ²
Volumen Relieve-Plano (V_1)	5,657,766 m ³	1,981,009 m ³	1,692,268 m ³	9,331,043 m ³
Superficie analizada	Contacto	Contacto	Contacto	Contacto
Área 3D	98,290 m ²	32,172 m ²	87,277 m ²	217,739 m ²
% Área 3D	45.14 %	14.78 %	40.08 %	100 %
Volumen Contacto-Plano (V_2)	7,680,042 m ³	2,418,718 m ³	5,312,770 m ³	15,411,530 m ³
Total Volumen (V_2-V_1)	2,022,276 m³	437,709 m³	3,620,502 m³	6,080,487 m³
% Volumen	33.26%	7.20%	59.54%	100%

MAPA DE ISOPACAS



LEYENDA

Espesores Unidad Inferior <VALUE>	Espesor unidad intermedia <VALUE>	Espesores unidad superior <VALUE>
0 - 15	0 - 3	0 - 18
16 - 22	4 - 6	19 - 24
23 - 25	7 - 9	25 - 28
26 - 27	10 - 11	29 - 33
28 - 28	12 - 13	34 - 37
29 - 30	14 - 14	38 - 41
31 - 33	15 - 16	42 - 46
34 - 43	17 - 18	47 - 50
44 - 47	19 - 21	51 - 54
48 - 55	22 - 24	55 - 60

Fig. 72. Mapas de isopacas de las 3 unidades de travertinos: A: superior; B: intermedia; C.: inferior

Dado que los travertinos en general son rocas muy porosas, para calcular la masa real de travertinos en Alicún de las Torres fue necesario medir la porosidad de estos materiales en cada una de las tres unidades diferenciadas. Por ello, las 26 muestras medidas pertenecen a 6 perfiles verticales que representan la mayor parte de las 3 unidades. Los principales parámetros determinados en dichas muestras: porosidad (%), radio y longitud medios de poro (μm) y área total de poros (m^2/g), están recogidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Porosidad (%), radio y longitud medios de poro (μm) y área total de poros (m^2/g) de las muestras analizadas.

Unidad	Muestra	Porosidad (%)	Radio medio de poro (μm)	Longitud media de poro (μm)	Área total de poros (m^2/g)	
Superior	S1-10	10.6627	0.1482	49.6842	0.057	
	S1-90	18.0077	0.0189	9.0832	0.712	
	S1-230	12.0328	0.1600	18.0963	0.050	
	S1-330	26.3983	0.0758	34.2180	0.124	
	S5-50	16.7853	0.0182	3.8044	0.309	
	S5-250	9.3354	0.0417	20.9854	1.119	
	S5-450	15.3888	0.0233	31.8832	1.862	
	S5-600	6.5541	0.1084	9.4668	0.110	
	S6-50	10.2348	0.0139	32.6659	0.188	
	S6-150	18.2231	0.0368	32.0805	0.364	
	S6-250	5.5041	0.0060	32.0794	2.051	
	S6-500	18.1896	0.0793	18.3090	0.672	
		MEDIA	13.94			
Intermedia	M1-0	5.0500	0.0684	0.1827	0.068	
	M1-150	8.9113	0.0264	5.8635	0.901	
	M1-350	11.9064	0.0314	16.6780	0.769	
	M1-400	11.0738	0.0575	34.3900	0.393	
		MEDIA	10.11			
Inferior	I2-0	11.2135	0.0413	11.9335	0.422	
	I2-100	7.3887	0.0080	18.6020	1.101	
	I2-250	17.0179	0.0628	17.5042	0.216	
	I2-450	18.5311	0.2083	30.2954	0.054	
	I3-0	7.6838	0.1079	32.6698	0.036	
	I3-100	4.5666	0.0205	23.6360	0.164	
	I3-200	8.5753	0.0334	23.2307	0.173	
	I3-350	5.9231	0.0214	33.8986	0.441	
		MEDIA	9.24	0.0214	33.8986	0.441

De acuerdo con dichos datos, la porosidad de las muestras presentan un valor mínimo de 4.57% y máximo de 26.40% (ver tabla 8), por lo que se puede inferir que la porosidad de estos materiales es muy variable.

Por otra parte, el valor medio de la porosidad de toda la formación de travertinos es de 11.88%, valor que varía de una unidad a otra, de manera que en la unidad superior el valor es de 13.94%, en la intermedia es de 9.24%, mientras que en la unidad inferior es de 10.11%. En consecuencia, se observa una tendencia hacia valores menores de porosidad en las muestras más recientes, que son las que pertenecen a la unidad intermedia (Fig. 73)

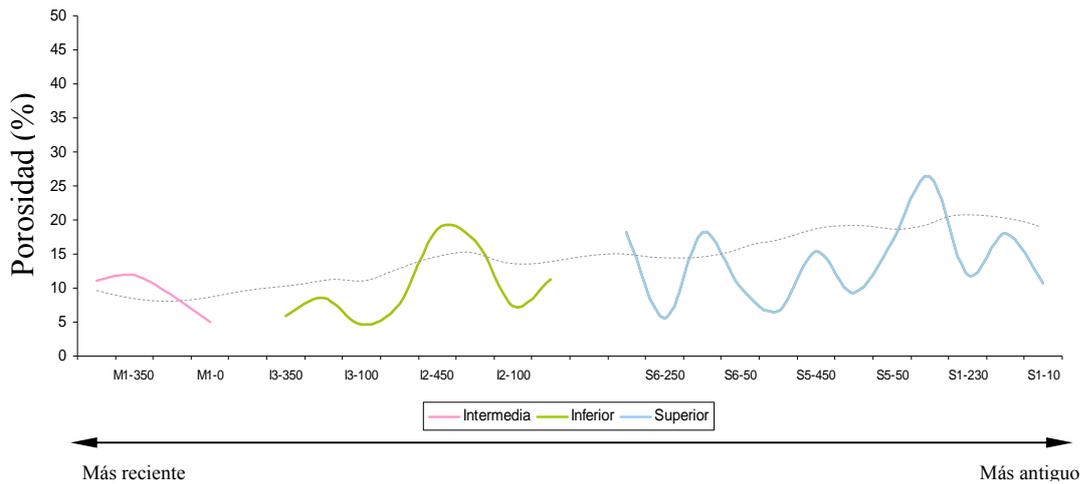


Fig. 73. Evolución de la porosidad en cada una de las unidades de travertinos de Alicún de las Torres.

Además, la longitud y el radio medios de los poros ($22.5\mu\text{m}$ y $0.06\mu\text{m}$ respectivamente) muestran que éstos tienen formas generalmente cilíndricas y muy irregulares, característica que es también típica de los travertinos, y que es debida fundamentalmente al bandeado de los mismos y a los procesos de disolución que generan porosidad tipo *Vug*, que es de morfología muy irregular.

Teniendo en cuenta los volúmenes calculados para cada unidad (ver Tabla 7) y los valores medios de la porosidad para cada una de estas unidades, se procedió a calcular el volumen real de travertinos del Sistema de Alicún de las Torres (Tabla 9)

Tabla 9. Parámetros usados para el cálculo de volumen de travertinos en cada unidad.

Unidad	Volumen calculado (m^3)	Porosidad media (%)	Volumen de Poros (m^3)	Volumen de travertinos (m^3)
Superior	3,620,502	13.94	504,698	3,115,804
Inferior	2,022,276	10.11	204,452	1,817,824
Intermedia	437,709	9.24	40,444	397,265

Por lo tanto, el volumen real de travertinos de la unidad superior es de 3,115,804 m³; el de la inferior es de 1,817,824 m³; y el de la intermedia de 397,265 m³.

Para calcular la cantidad de C secuestrado en forma de travertinos se ha estimado la masa CaCO₃ precipitada, teniendo en cuenta que el contenido medio en calcita de estos travertinos, calculado por Difracción de Rayos X y Análisis Termogravimétrico, es aproximadamente el 95%, que la densidad de este carbonato es de 2.71 gr/cm³, y que está constituido por un 12 % en peso de C. De esta manera, el total de C retenido por cada unidad de travertinos está recogido en la Tabla 10. En consecuencia, se puede decir que en la unidad superior se han retenido casi 10⁶t de C, que en la inferior se atraparon unas 600,000t, mientras que en la intermedia sólo se retuvieron 120,000t. De este modo, se puede concluir que desde que empezó a funcionar el Sistema Termal de Alicún de las Torres se han precipitado en forma mineral (CaCO₃) casi 1.7Mt de C.

Tabla 10. Parámetros usados para el cálculo de masa de travertinos y de carbono en cada unidad.

Unidad	Volumen de travertinos (m³)	Mineralogía (% de CaCO₃)	Volumen de calcita (m³)	Masa de calcita (t)	Masa de carbono (t)
Superior	3,115,804	95.19	2,966,073	8,038,057	964,567
Inferior	1,817,824	95.70	1,739,595	4,714,302	565,716
Intermedia	397,265	95.14	377,941	1,024,221	122,907
TOTAL	5,330,893	95.34	5,083,609	13,776,580	1,653,190

5. CONCLUSIONES

1ª Las tres unidades diferenciadas en la formación de travertinos asociada al Sistema Termal de Alicún de las Torres se caracterizan por ocupar un área de 98,000 m² (%) (Superior), 87,000 m² (Inferior) y 32,000 m² (Intermedia), que representan el 45, 41 y el 14% del total, respectivamente.

2ª La unidad inferior tiene espesores comprendidos entre 10m, en su zona central, y 40m en la noroccidental. La cota del muro de esta unidad está entre 670 y 700 m.s.n.m., mientras que la del techo es bastante constante y situado a 710 m.s.n.m. En la unidad intermedia se han registrado espesores inferiores, alcanzando un máximo de 25m en su zona central, y un mínimo de 2m en sus bordes. La cota del contacto con esta unidad de travertinos se sitúa entre los 700m y los 740m aproximadamente, cota que se alcanza en la parte más oriental de la unidad. El espesor de la unidad superior llega a alcanzar cerca de los 60m y varía normalmente entre los 40 y 50m. En su parte occidental aparece una franja menos potente en la que los espesores medios varían entre 10 y 15m. Destaca la existencia de una zona superficial de unos 5m, bastante carstificada, y causante de los valores más bajos de resistividad en los perfiles geoelectricos correspondientes. La cota del contacto entre esta unidad y las margas del sustrato se sitúa sobre los 730m, mientras que el techo se localiza sobre los 775m.

3ª En cuanto al volumen real; es decir sin tener en cuenta la porosidad de estos materiales, la formación de travertinos ocupa aproximadamente 5,330,893, de los cuales, aproximadamente 3,115,804m³ pertenecen a la unidad superior; 1,817,824m³ a la inferior; y 397,265 m³ a la intermedia.

4ª Por lo que se refiere a la cantidad de C retenido en forma mineral y por lo tanto estable por dicha formación de travertinos, se ha estimado que el total secuestrado es de 1,653,190t, total que se reparte de la siguiente manera: 964,567t en la unidad superior; 565,716t en la inferior; 122,907t en la intermedia.

6. REFERENCIAS

Armstrong, M.; Carignan, J. (1997) *Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier*. École de Mines de Paris, France, 112 p

Chica, M. (1997) *Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 387 pp.

Cressie, N.; Noel A.C. (1993) *Statistics for Spatial Data Revised Edition*. John Wiley y Sons eds. Inc. 900 pp.

Journel, A.G.; Huijbregts, Ch. J. (1978) *Mining Geoestatistic.*; Ed. Academic Press, 600 pp.

Díaz-Hernández, J. L.; Juliá, R. (2006) Geochronological position of badlands and geomorphological patterns in the Guadix–Baza basin (SE Spain) *Quaternary Research* 65, 467–477.

Díaz-Hernández, J. L.; Martín, M.; Juliá, R. (2000) Depósitos travertínicos de Alicún (Depresión de Guadix, Granada, SE de España) *Geogaceta* 28, 97–100.

Frykman, P; Rogon, T. A. (1993) Anisotropy in pore networks analyzed with 2-D autocorrelation (variomaps). *Computers & Geosciences*, 19:7, 887-930.

Goovaerts. P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation By Pierre Goovaerts*, Oxford University Press, *Applied Geostatistics Series*, 1997, 483 pp.

Homand-Etienne F.; Belem T.; Sabbadini S.; Shtuka A.; Royer J. J. (1995) Analysis of the evolution of rock joints morphology with 2D autocorrelation (variomaps). Proc. 7th Int. Conf. on Appl. Stat. and Proba, Paris, Lemaire, Favre y Mébarki (eds), Balkema, Rotterdam, 1229-1236. 285.

Isaaks, E. H.; Srivastava, R.M. (1989) *Applied Geostatistics*, New York Oxford, Oxford University Press, 561 pp.

Isaaks, E. H. (1999) *SAGE2001, A Spatial and Geostatistical Environment for Variography*, San Mateo, California, 67 pp.

Krajewski, S. A.; Gibbs, B.L. (1993) *A Variogram Primer*, Gibbs Associates, 93 pp.

Lamorey, G. y Jacobsom, E. (1995) Estimation of Semivariogram Parameters and Evaluation of the Effects of Data Sparsity, *Mathematical Geology*, Vol.27,3, 327-358.

Pannatier, Y. (1993) Ms-Windows Program for exploratory variography and variogram modelling in 2D, International Workshop on Statistics of Spatial Processes-Theory and Applications, Bari, Italy 27-30 September 1993.

Pérez- Peña, J. V.; Azañón, J. M.; Azor, A.; Tuccimei, P.; Della Seta, M.; Soligo, M. (2009) Quaternary landscape evolution and erosion rates for an intramontane Neogene basin (Guadix-Baza basin, SE Spain) *Geomorphology*, 106, 3-4, 206-218

Pentecost, A.; Viles, H. A. (1994) A review and reassessment of travertine clasification. *Geographie physique et Quaternaire*, 48, 305-314.

Sahin, A.; Hassan, H.M. (1998) Enhancement of Permeability Variograms Using Outcrop Data, *The Arabian Journal for Sciences and Engineering*, 23, 1C, 137-144.

Stein. M. L. (1999) Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging: Springer, New York, 247 pp.

Genton, M.G. (1998a) Highly Robust Variograms Estimation, *Mathematical Geology*, 30, 2.

Wackernagel, H. (1998) Notas del curso Geoestadística Multivariada, en el CFSG "Ciclo de Formación Especializada en Geoestadística", Curso 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.

Weerts, H.J.T.; Bierkens, M.F.P. (1993) Geostatistical Analysis of Over Bank Deposits of Anatomising and Meandering Fluvial Systems; Rhine-Meuse Delta, The Netherlands, *Sedimentary Geology*, 85, 221-232.

Xie, T. y Myers, D.E. (1995a) Fitting Matrix-Valued Variogram Models by Simultaneous Diagonalization (Part I: Theory), *Mathematical Geology*, 27, 7, 867-875.

Xie, T.; Myers, D.E. (1995b) Fitting Matrix-Valued Variogram Models by Simultaneous Diagonalization (Part II: Application), *Mathematical Geology*, 27, 7, 877-888