

CGL2011-24768

El sistema poroso de las facies Utrillas (Cretácico Inferior).
Caracterización de sus propiedades y su influencia en los mecanismos de
atrapamiento de CO₂ en AGPs.

MODELO GEOLÓGICO 3D DE VILLAMERIEL (CUENCA DEL DUERO)

Autores: Bernat Rebolal, Manuel
Ruxandra Catalina Nita

Revisado: Rocío Campos Egea

PmaCO₂

1. INTRODUCCIÓN

Se pretende generar un modelo geológico 3D con coherencia geométrica basada en métodos de interpolación espacial de una zona que puede ser susceptible de constituir un almacén geológico de CO₂ en las facies de arenas y arcillas con conglomerados en la base del Utrillas (Cretácico).

2. ZONA DE ESTUDIO. LÍMITES

- La zona a modelizar se sitúa en la Cuenca del Duero (provincia de Palencia) en los municipios de Barcena de Campos, Castrillo de Villavega, Loma del Ucieza, Quintanilla de Onsoña, Saldaña, Villameriel, Villanuño de Valdavia y Villasila de Valdavia (Fig. 1) coincide con el área de Villameriel (CD-GF-04) del proyecto del Subsuelo “Selección y caracterización de áreas de estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ en España” (IGME, 2010). Se encuentra prácticamente en el centro de la provincia de Palencia y abarca las hojas del IGN a escala 1:50.000 de Saldaña (164), Herrera de Pisuerga (165), Carrion de los Condes (197) y Osorno (198).
- En síntesis, el dominio geológico abarca los materiales mesozoicos y cenozoicos de la Cuenca del Duero y su sustrato Paleozoico así como la prolongación de los mismos hacia el “pasillo de la Rioja” al sur de las sierras de Cantabria y montes Obarenes.
- La zona de estudio se sitúa en el área de Villameriel formada por una estructura antiformal del sustrato cretácico de la Cuenca del Duero en su sector noroeste bajo los materiales cenozoicos. Forma parte de una banda plegada con vergencia norte y limitada por fallas principalmente inversas que no suelen aflorar en superficie.

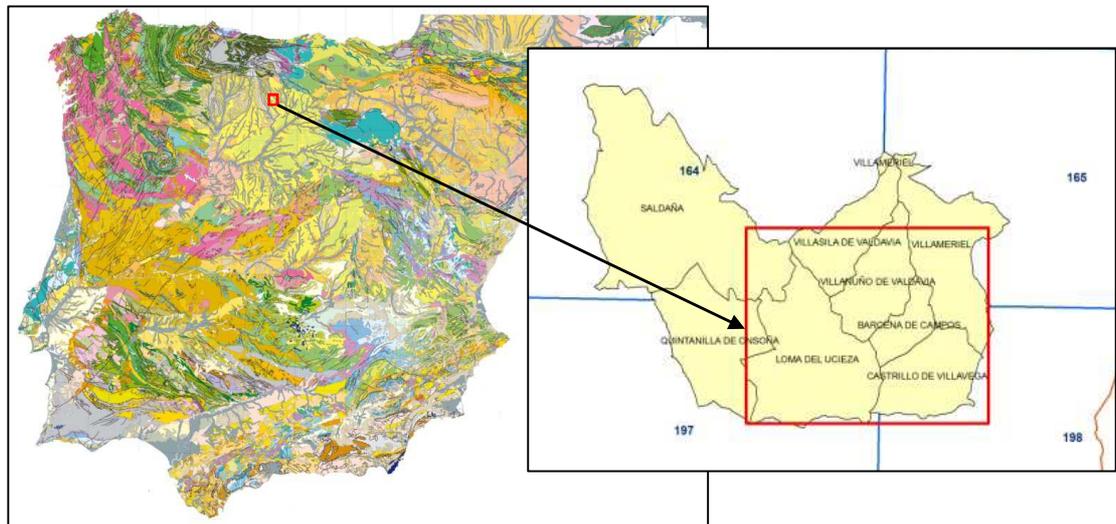


Figura 1: Zona de ubicación del área a modelizar (cuadrado en rojo)

Las coordenadas extremas geográficas y UTM (Tabla 1) del área a modelizar son:

Vértice	X UTM (m)	Y UTM (m)
A	365612.6	4712096.4
B	382737.8	4712096.4
C	382737.8	4698163.7
D	365612.6	4698163.7

Tabla 1: Coordenadas del área de estudio.

Los bordes de la zona de estudio tienen una longitud aproximada de 14 km en la dirección N-S y de 17 km en la dirección O-E, por lo que la superficie aproximada que cubriría el modelo es de aproximadamente 238 km².

3. ANÁLISIS DE LA GEOLOGÍA Y DEFINICIÓN DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS A MODELIZAR

Se realiza un análisis de la geología superficial, secciones sísmicas disponibles y la columna estratigráfica del sondeo Villameriel-1, a partir de la información de la zona Ibérica del plan GEODE (Navas Madrazo, 2006: Mapa Geológico Continuo Digital del IGME) y la documentación de la 1ª fase del proyecto del Subsuelo "Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ en España" (IGME, 2010), así como el informe final del sondeo Villameriel-1 (ELF-ERAP, 1969).

Según datos procedentes del sondeo Villameriel-1 y el proyecto ALGECO (IGME, 2010) se definen las siguientes 5 unidades geológicas de interés en la modelización 3D:

PALEOZOICO: Esquistos. Sería la base del modelo 3D.

ALBIENSE (Facies Utrillas): Alternancia de arenas y arcillas con conglomerados en la base. Con una porosidad media del 14 % y una salinidad de 60.000 ppm de ClNa-eq, constituyen una excelente **formación almacén** con una potencia media de unos 151 m.

CENOMANIENSE-TURONIENSE: Arcillas y margas de textura y constitución variada. Constituyen la **formación sello** con unos 150 m de potencia media.

SENONENSE: Complejo calcáreo cretácico con un espesor aproximado de 250 m.

GARUM (Paleoceno): Secuencia del Paleógeno inferior formada por calizas, margas, arcillas, arenas y un complejo de carbonatos y sales con una potencia de unos 690 m.

TERCIARIO Eoceno-Oligoceno-Mioceno: Incluye los dos ciclos sedimentarios denominados como Ciclo Olmos y Ciclo Dueñas y que estarían formados por arcillas carbonatadas y margas con intercalaciones de areniscas, gravas y conglomerados. Tiene una potencia media de unos 1980 m.

4. OBTENCIÓN-ELABORACIÓN DEL MDT COMO BASE PARA LA MODELIZACIÓN GEOLÓGICA 3D

Debido a que los límites del modelo no coinciden con ningún MDT disponible en el IGME se ha procedido a su elaboración a partir de las curvas de nivel a escala 1:25.000 obtenidas durante el recorte del GEODE y que proceden de las hojas topográficas a escala 1:25.000 del IGN.

El primer paso para la obtención de un MDT que pueda ser utilizado en la modelización geológica 3D es la creación de un modelo de elevaciones vectorial a partir de las curvas de nivel. En GIS se genera en primer lugar un modelo en formato TIN (Red de Triángulos Irregulares) y a partir de este, se crean varios MDT's en formato ráster (GRID). Finalmente se genera un GRID con tamaño de celda de 100 x 100 m, que servirá de modelo de elevaciones en la sección superficial.

5. TRABAJO CON GEOGRAPHIX

Ha consistido en la generación de superficies 3D de referencia mediante perfiles interpretados e información de velocidades procedentes del sondeo Villameriel.

En el proyecto de Geographix se habían interpretado una serie de horizontes sísmicos, de los cuales, aquellos que eran de interés para la modelización eran los 3 siguientes: Top_Cenomaniense, Top_Albense-Cenomaniense (Utrillas), Top Paleozoico. Para cada uno de estos horizontes, con el módulo SeisVision de Geographix, se han obtenido las superficies en tiempos y velocidades, posteriormente con los tiempos y velocidades se obtienen las profundidades de dichos horizontes. Además también se incluyen las principales fallas interpretadas y con continuidad lateral.

6. TRABAJO CON 3D-GEOMODELLER

En el entorno Geomodeler se crea un proyecto de modelización geológica en 3D, con unos *límites del modelo* que están delimitadas por las coordenadas de la tabla 1 con un eje vertical de -3200m a 1200m.

Posteriormente se realiza la *incorporación del MDT* al proyecto. Debido a que Geomodeler por defecto reduce la resolución del MDT introducido, se fuerza el número de celdas a 114 x 113, igual que el modelo original, de manera que se mantiene la resolución original de 100 x 100 m.

Se crearon un total de 14 *secciones, verticales y horizontales*, donde se introducirán los datos a interpolar procedentes de las secciones sísmicas interpretadas y de cortes geológicos.

Una vez creado el proyecto inicial se incorpora el modelo digital de elevaciones a la sección superficial y se procede a *definir la secuencia pseudoestratigráfica* que se utilizará en la modelización.

Primero se crean y definen las cuatro formaciones (unidades geológicas) más importantes que tratará el modelo 3D. Posteriormente, se establecen las relaciones (*Erode, Onlap*) entre las formaciones con el muro (*Botton*) como referencia y éstas se agrupan en una serie de similar comportamiento geológico-estructural.

Después del análisis de las secciones sísmicas, se definen 4 *fallas* con desplazamiento efectivo y se asignan *sus atributos físicos* una a una. En este proyecto no hay ninguna falla infinita que se extienda hasta los límites del modelo y cuyos atributos no haya que detallar.

Las cuatro fallas inversas aparecen bien representadas en una de las secciones horizontales, en donde se pueden observar las trazas procedentes de los shapefile con fallas definidas en el proyecto ALGECO2 (IGME, 2010) en el mapa con el techo del Utrillas realizado para esta zona de estudio.

Una vez creadas las fallas y sus atributos, se definen las *relaciones de corte entre fallas y series estratigráficas*. Tal y como se observa en las secciones sísmicas, las fallas inversas afectan a toda la serie superior a modelizar (Serie_Cretacico_Garum_Terciario).

Se indican las *relaciones de corte entre fallas* en el módulo correspondiente de Geomodeler, en este caso, la observación de las secciones sísmicas, permite establecer relaciones claramente entre las fallas, de manera que sólo hay corte entre la Falla6 con la Falla9.

En la siguiente etapa se pasa a la *digitalización de contactos y fallas en planta y secciones*. Por defecto, el modelo incluye siempre una sección horizontal que es la superficial con el relieve. Se crean a posteriori 7 secciones verticales, 4 secciones auxiliares de apoyo, y dos secciones horizontales una a cota de Z= -1785 m y otra a -1500 con las tres fallas digitalizadas. Por lo tanto, se han empleado once secciones verticales y tres horizontales, una de las cuales es la superficial con el MDT para la elaboración coherente del modelo. En las secciones **verticales** se procedió a digitalizar

sobre ellas los contactos de las formaciones y fallas. En el caso de las secciones **horizontales** sólo se han digitalizado las fallas inversas ya que era la única información disponible.

En la zona de estudio se dispone del *sondeo de hidrocarburos Villameriel-1* situado en la zona norte del modelo. Hay que destacar que el sondeo de Villameriel-1 abarca desde el Terciario hasta el Paleozoico, localizándose en el Cretácico Inferior los 151 m de la formación almacén Utrillas (Albiense) y en el Cretácico Superior los 150 m del sello (Cenomaniense-Turonense), según los datos bibliográficos del proyecto ALGECO2, IGME 2010.

Al mismo tiempo, se incorpora en forma de 3D-Interfaces la información de los contornos de isobatas de muros o techos de formaciones y de puntos de traza de fallas obtenidas de la interpretación geofísica en Geographix.

Como última etapa de la modelización se computa el modelo seleccionando las secciones, fallas y series (con sus respectivas formaciones) que deseamos tener en cuenta. Se han incluido en el cálculo únicamente la serie Cretacico_Garum_Terciario, las 13 secciones (11 verticales y 2 horizontales) y las cuatro fallas incluidas en el modelo así como la información del sondeo.

Una vez calculado el modelo geológico 3D, este se representa en 2D sobre las distintas secciones, comprobándose su coherencia, y después se procedió a obtener los elementos geológicos en 3D y representarlos sobre la vista 3D de Geomodeller.

Los volúmenes-superficies 3D tendrán mayor o menor precisión dependiendo de la resolución que se fije para la construcción de las formas. En este caso se optó por una solución intermedia, calculándose para unos pasos de celda $N_x=113$, $N_y=92$ y $N_z=29$, lo cual ofreció un resultado final con bastante buena resolución.

El resultado final obtenido es un modelo geológico 3D para los volúmenes de las formaciones y superficies de fallas que se puede ver en la [figura 2](#).

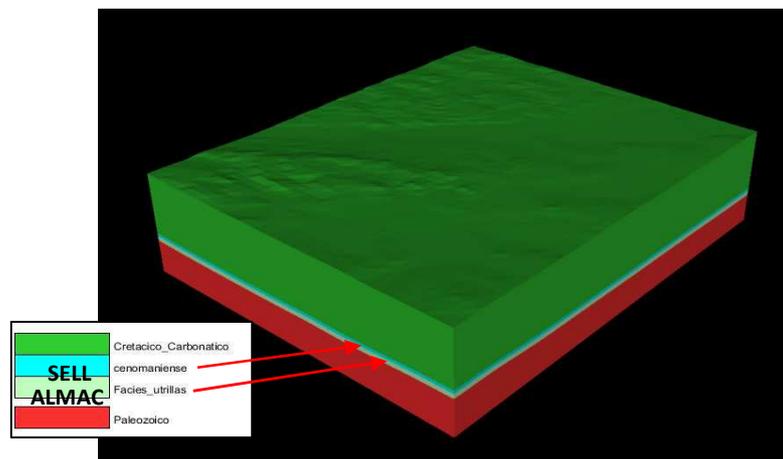


Figura 2: Vista lateral del modelo geológico 3D en detalle en cuyos laterales se aprecian todas las formaciones implicadas con sus espesores. Se expone la leyenda con las distintas formaciones. Escala vertical (Z) exagerada con factor 2.

Posteriormente se realizan diversas representaciones de la formación *Utrillas*, posible almacén de CO_2 por sus características petrofísicas y profundidad de su ubicación, analizándose su geometría junto con el sello (Cenomaniense) para obtener zonas idóneas para el almacenamiento.

7. RESULTADOS

Una vez realizado el modelo 3D, con los volúmenes de las formaciones y superficies de falla han sido exportados desde Geomodeler a formato TSURF legible desde GOCAD donde el manejo gráfico e intercambio con otros formatos es más sencillo.

A través de GOCAD, también se determina que las zonas más elevadas del almacén en Utrillas (Figs.46, 47) en los dos domos seleccionados (flechas en blanco) se sitúan en las siguientes coordenadas (Proyección ED50, Huso 30):

DOMO 1 (X, Y, Z)= (378488.763672, 4707062.64844, -1647.11).

Espesor Sello: 130 m.

Espesor Almacén: 199 m.

Zona más alta de anticlinal: 2548 m de profundidad respecto la cota topográfica.

DOMO 2 (X, Y, Z)= 369971.708984, 4702984.66797, -1576.75).

Espesor Sello: 118 m.

Espesor Almacén: 183 m.

Zona más alta de anticlinal: 2545 m de profundidad respecto la cota topográfica.

A continuación se muestra la perspectivas del modelo cargado en GOCAD de la formación almacén Utrillas el que están representadas sus isobatas respecto a la cota del nivel del mar. Se aprecia perfectamente las dos zonas más elevadas del anticlinal. En el pie de la foto se muestra la leyenda de la cota Z (m) respecto al nivel del mar. (Fig. 3).

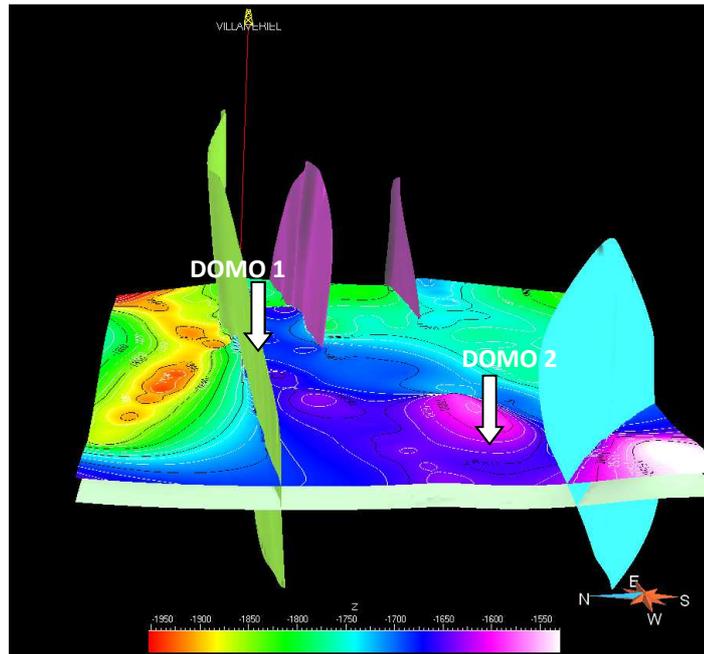


Figura 3: Perspectiva del techo de la Fm. Utrillas desde el Oeste con el sondeo Villameriel 1. Escala vertical (Z) exagerada con factor 3.

También se determina, de cara a la modelización dinámica que el techo de la formación Utrillas en las zonas más altas de los domos seleccionados están a más de 2500 m de profundidad respecto la cota topográfica más baja del MDT, es decir, la formación almacén se ubica a una profundidad favorable para el almacenamiento de CO₂ en estado supercrítico. Además, según los resultados de la modelización estática 3D, la formación almacén (Utrillas) tiene un espesor que oscila entre los 183-199 m, mientras que el sello (Cenomaniense) oscila entre los 118-130 m de espesor a lo largo de la extensión modelizada.

8. CONCLUSIONES

A partir de los datos geológicos disponibles, tanto de superficie como de subsuelo, se ha elaborado un modelo 3D estático satisfactorio de la zona de Villameriel en el Norte de la Cuenca del Duero para almacenamiento de CO₂.

Este modelo geológico 3D se ha realizado aplicando principalmente el programa Geomodeller™. Se trata por tanto de un método válido para el tipo de modelizaciones geológicas en 3D que requieren las investigaciones sobre el almacenamiento de CO₂ en el subsuelo.

Mediante el modelo obtenido, se ha podido obtener la ubicación y geometrías (espesores y superficies delimitantes) de las formaciones almacén y sello, así como los emplazamientos más favorables (Domo 1 y 2) para posibles inyecciones de CO₂, y el cálculo del volumen total de roca para cada uno de los domos. También se ha mejorado el tratamiento de los resultados finales mediante la utilización del programa GOCAD, de manera que, para cada una de las superficies, se han podido obtener los formatos digitales adecuados para realizar la simulación de inyección de CO₂ (modelo dinámico) mediante el programa PetraSim.

Los datos locales y regionales utilizados en la modelización geológica de esta zona y los resultados del modelo 3D han mostrado la continuidad y extensión de la Formación Utrillas en este área de la Cuenca del Duero. Una vez que se confirme por nuevas líneas sísmicas la ubicación de estos dos domos identificados por modelización se tienen que evaluar también las características de los parámetros petrofísicos de las formaciones almacén y sello. A priori, la Formación Utrillas presenta en esta zona un espesor que puede ofrecer una capacidad de almacenamiento a una profundidad adecuada para el proceso de inyección. Por otro lado, la porosidad (que puede llegar a 30% (B.Llamas et al., 2014) y la permeabilidad de las areniscas de Utrillas reconocidas en el sondeo Villameriel y en afloramientos son las idóneas para garantizar la inyectividad del CO₂. Por otra parte, la porosidad de las arenas de Utrillas es principalmente primaria, lo que les confiere una mayor homogeneidad y, por consiguiente, una mejor distribución del fluido inyectado; por otra parte, su naturaleza mineralógica (principalmente siliciclástica) propiciará que la roca se vea afectada en menor medida por la interacción química entre fluido-roca (B. Llamas, 2014). Todas estas características geológicas y petrofísicas convierten la formación areniscas de Utrillas en uno de los objetivos principales para el almacenamiento geológico de CO₂ en España.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Calcagno, P., Courrioux, G., Guillen, A., Fitzgerald, D., Mcinerney, P. (2006): How 3D implicit Geometric Modelling Helps To Understand Geology: The 3DGeoModeller Methodology. *Society for Mathematical Geology: XI International Congress Université de Liège – Belgium*, s14-06. 4 pp.
- Cervel, S., Bernat, M. (2013): Modelo Geológico en 3D de Torrelaguna para la divulgación del patrimonio geológico. *Patrimonio geológico un recurso para el desarrollo. Publicaciones del Instituto Geológico y minero de España*, p 505-514.
- Guillén, A., Calcagno, P., Courrioux, G., Joly A., Ledru, P. (2008): Geological modelling from field data and geological knowledge Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Volume 171, Issues 1-4, p 158-169.
- GEODE [on-line]. Sistema de Información Geológica Continua: SIGECO. IGME. Editor: J. Navas.
- Holloway, S., and Savage, D., 1993. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK. *Energy Conversion and Management*, v. 34, pp. 925-932.
- IGME (2010): Selección y caracterización de áreas de estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO2 en España. Informe confidencial. Código Dto.: 63.981.
- IGME. 2010a. “Plan de Almacenamiento geológico de CO2 del IGME – Plan ALGECO2”, Volumen I-2 Cadena Cantábrica y Cuenca del Duero-Hidrogeología. Fondo Documental del IGME.
- IGME. 2010b. “Plan de Almacenamiento geológico de CO2 del IGME – Plan ALGECO2”, Volumen V. Geología del Subsuelo. Fondo Documental del IGME.
- Llamas, B., R. Alvarez, L.F. Mazadiego, J. Loredó, A. Cámara. 2014. Estudio de afloramientos de unidades detríticas como posibles almacenes geológicos de CO2 en la cuenca del Duero (España). *Estudios geológicos*, Vol. 70, No 1 (2014)
- Lanaja, J.M. (1987). Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la Geología de España. IGME. Madrid, 465 p.
- Lajaunie, C., Courrioux, G., and Manuel, L. (1997): Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation: *Mathematical Geology*, v. 29, no. 4, p. 571-584.
- Mcinerney, P., Guillen, A., Courrioux, G., Calcagno, P., Lees, T., 2005. Building 3D geological models directly from the data? A new approach applied to Broken Hill, Australia; Digital Mapping Techniques '05; Workshop Proceedings. Open-file report – U.S. Geological Survey OF 2005-1428, p. 119–130.
- Van der Meer, L.G.H., 1993. The conditions limiting CO2 storage in aquifers. *Energy Conversion and Management*, v. 34, pp. 959-966.