



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



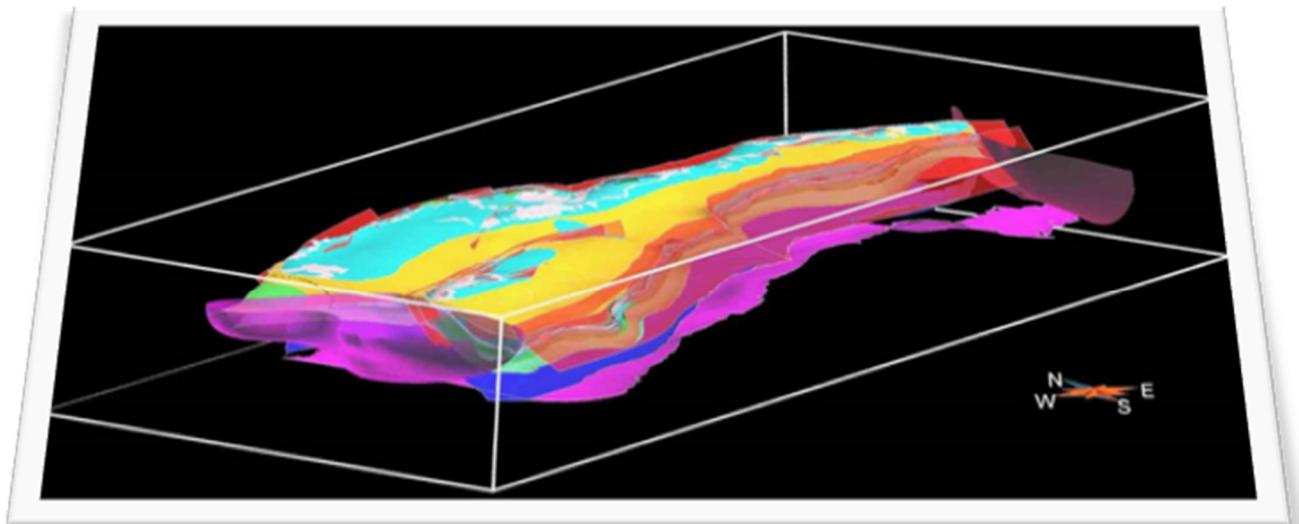
Instituto Geológico  
y Minero de España



DIPUTACIÓN  
DE ALICANTE

## DESARROLLOS METODOLÓGICOS EN GEOLOGÍA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS PROFUNDOS DE LA PROVINCIA DE ALICANTE (HIDROPROAL)

### MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE SOLANA-ONTENIENTE-VOLCADORES Y EVALUACIÓN DE LAS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA



Septiembre de 2013

Carlos Marín Lechado  
Sergio Martos Rosillo  
José Luís García Lobón  
Ana Ruiz Constan  
Pedro Ignacio Ibarra Torre  
María del Carmen Rey Moral  
Concepción Fernández Leyva



# ÍNDICE

RESUMEN .....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Justificación del estudio y antecedentes .....	9
1.2 Localización .....	10
1.3 Objetivos .....	11
2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.....	13
2.1 Geología .....	13
2.1.1 Encuadre geológico.....	13
2.1.2 Estratigrafía .....	14
2.1.3 Estructura .....	16
2.2 Hidrogeología .....	17
2.2.1 Acuífero de Solana .....	17
2.2.2 Acuíferos de Volcadores y de Onteniente .....	20
3. METODOLOGÍA .....	23
3.1 Modelización 3D .....	23
3.1.1 Elementos del modelo. Superficies de Referencia y Fallas.....	23
3.1.2 Métodos y proceso de datos.....	26
3.2 Caracterización del sistema poroso.....	41
3.2.1 Estudio petrográfico .....	42
3.2.2 Porosidad abierta.....	42
3.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas .....	42
4. RESULTADOS .....	45
4.1 Modelización 3D .....	45
4.2 Sistema poroso .....	63
4.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas .....	65
4.4 Implicaciones hidrogeológicas del modelo .....	68
5. CONCLUSIONES.....	71
6. REFERENCIAS.....	73
ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL ENTREGADA .....	79
1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL.....	79
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE .....	80
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO SOLANA.....	82
4. LISTADO DE FICHEROS .....	84
ANEXO II. ESTUDIO PETROGRÁFICO .....	85
ANEXO III. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. Con línea azul se indican los límites de los acuíferos estudiados, definidos por la DPA (DPA, 2007). Base: mapa topográfico a escala 1:200.000 del Instituto Geográfico Nacional. 10

Figura 2. Mapa geológico del área estudiada. Fuente: Mapa geológico de la Comunidad de Valencia E. 1:200.000. (IGME). Límites de los acuíferos estudiados en azul. 13

Figura 3. Columna estratigráfica del área estudiada. Los círculos amarillos denotan los límites estratigráficos que conforman las superficies de referencia reconstruidas en el modelo 3D del acuífero. 15

Figura 4. Evolución del nivel piezométrico en el sondeo 2832-6-0010 del acuífero de Solana (DPA-IGME; 2013, in prep.). 20

Figura 5. Distribución de datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores. Se han utilizado 84 sondeos mecánicos, 4 líneas sísmicas, 68 SEV, 1600 puntos de gravimetría, 22 sondeos magnetotelúricos e información cartográfica de superficie. 25

Figura 6. Diagrama de flujo del procesado de los datos para la realización del modelo geológico 3D. 29

Figura 7. Perfiles sísmicos SG-91 y RV-81 en formato digital SEG-Y convertidos a profundidad. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos. La posición de los perfiles se indica en la figura 5. 30

Figura 8. Esquema de componentes de un equipo de prospección magnetotelúrica. 31

Figura 9. Distribución de los sondeos MT y de los perfiles de resistividad calculados. 32

Figura 10. Modelos de resistividad para los perfiles 1 y 2 obtenidos a partir de la inversión de los sondeos magnetotelúricos. 33

Figura 11. Transformación realizada en las curvas con el programa RSLW.exe. 34

Figura 12. Vista 3D de los SEV y el modelo de resistividades de cada sondeo con el programa Gocad. 34

Figura 13. Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Solana. 36

Figura 14. a) Mapa de anomalía de Bouguer a densidad 2.6 g/cm<sup>3</sup>. Con puntos negros se representan las estaciones gravimétricas; b) Mapa de Anomalía regional procedente del ajuste de la superficie polinómica de grado 2; c) Mapa residual de anomalías de Bouguer, procedente de la sustracción de la anomalía regional a la anomalía de Bouguer. Para los tres mapas la escala está en mGal y las coordenadas en UTM (ED50) huso 30 N. 38

Figura 15. Resultados de las anomalías calculadas y misfit con el Forward modelling 3D y la Inversión 3D. A) Anomalía residual observada a partir de las estaciones de campo tras restar la anomalía regional a la anomalía de Bouguer (figura 14); B) Anomalía residual teórica calculada a partir del modelo geológico 3D inicial y las densidades de la tabla 3; C) Diferencia entre la anomalía A y B; D) Anomalía teórica residual del modelo geológico 3D ligeramente modificado para obtener un mejor encaje (forward modelling); E) Diferencia entre la anomalía A y D; F) Anomalías residual teórica obtenida a partir de la inversión 3D en el que se modifica iterativamente el modelo 3D y las densidades; G) Diferencia entre la anomalía A y F. 39

Figura 16. Modelo voxel de salida de la inversión 3D en Geomodeller. Cada celda tiene un atributo litológico. 40

Figura 17. Vista 3D del Modelo geológico 3D del Acuífero de Solana-Volcadores-Onteniente. 45

Figura 18. Cortes geológicos realizados al modelo 3D generado en el proyecto. La posición de los cortes se muestra en la figura 19. 47

Figura 19. Mapa de isobatas del muro de la unidad Neógena. Localización de los cortes de la figura 18 del modelo 3D. 49

Figura 20. Mapa de isobatas del muro de la unidad C4 (metros sobre el nivel del mar). 53

Figura 21. Mapa de isobatas del muro de la unidad C3 (metros sobre el nivel del mar). 54

Figura 22. Mapa de isobatas del muro de la unidad C2 (metros sobre el nivel del mar). 55

Figura 23. Mapa de isobatas del muro de la unidad C1 (metros sobre el nivel del mar). 56

Figura 24. Mapa de isobatas del techo de la Unidad Jurásica (metros sobre el nivel del mar). 59

Figura 25. Mapa de isobatas del techo de la Unidad Triásica (metros sobre el nivel del mar). En gris se representan los diapiros. 60

Figura 26. Mapa de isobatas del muro de la Unidad triásica (metros sobre el nivel del mar). 61

Figura 27. Histograma de los valores de porosidad abierta de las muestras recogidas en el acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores. 63

Figura 28. Distribución de porosidades abiertas por formaciones. 64

Figura 29. Histograma de los valores de porosidad abierta agrupados según la clasificación de Lucia (1995). 64

Figura 30. A) Curva de reservas del acuífero de Solana obtenido a partir del modelo 3D. B) Vista 3D del modelo 3D del acuífero cortado por la superficie topográfica en régimen permanente. La sucesiva depresión de la superficie piezométrica permite calcular los volúmenes de reservas correspondientes a cada nivel de depresión del nivel piezométrico. 66

Figura 31. Curvas de explotación del Acuífero Solana desde el sondeo Las Ánimas obtenidas a partir del modelo 3D del mismo. 67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Correlación entre la serie estratigráfica, unidades acuíferas y unidades geológicas modelizadas. 16

Tabla 2. Datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores. 23

Tabla 3. Valores de densidad y desviación típica utilizados en la modelización gravimétrica 3D. 37

Tabla 4: Datos incorporados al modelo 3D para cada unidad modelizada. 46

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la porosidad abierta en las principales formaciones carbonáticas del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores. 63



## RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la modelización geológica 3D de la estructura que alberga a los acuíferos de Solana, Volcadores y Onteniente, situada en el sector noroccidental de la provincia de Alicante y en el sur de la de Valencia. Además, se ha realizado una evaluación de las reservas totales del acuífero de Solana. El conjunto Solana-Volcadores-Onteniente tiene una extensión de 361 km<sup>2</sup>, si bien la suma de afloramientos permeables es de 130 km<sup>2</sup>. Por su parte, el acuífero de Solana, según los límites descritos por la Diputación Provincial de Alicante en 2007, en el Mapa Provincial del Agua, dispone de 275 km<sup>2</sup> de los que 69 km<sup>2</sup> son afloramientos con permeabilidad alta a muy alta. Debe subrayarse que el acuífero de Solana constituye una de las principales fuentes de suministro de agua potable y de riego de la comarca del Alto Vinalopó. De este acuífero se explota un 12% del total de los recursos hídricos subterráneos bombeados en la provincia. Los acuíferos de Solana, Onteniente y Volcadores los forman calizas y dolomías de edades comprendidas entre el Cenomaniense y el Senonense, con un espesor medio del orden de 625 m. Los recursos medios renovables del acuífero de Solana y Vocadores son de 34 y 0.9 hm<sup>3</sup>/año respectivamente.

En este informe se presentan los desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo y resultados del modelo geológico 3D del acuífero Solana-Onteniente-Volcadores realizado con los códigos *3D Geomodeller* y *Gocad*. Este modelo se ha construido con los objetivos de conocer el volumen total de reservas de agua almacenada en el acuífero de Solana y de establecer las relaciones geométricas entre las diferentes unidades acuíferas diferenciadas previamente. En el modelo geológico 3D se definen 9 unidades geológicas y 16 fallas primarias y secundarias. La consideración de datos geofísicos de exploración petrolera, entre los que cabe destacar los perfiles de sismica de reflexión SG-91, RV-79 y RV-81, la recopilación de 84 columnas litológicas de sondeos de investigación hidrogeológica, la reinterpretación de 68 sondeos eléctricos verticales, de una campaña gravimétrica (1.600 estaciones) y la información estructural generada con motivo de este proyecto, han contribuido a conseguir un nuevo avance en el conocimiento geológico e hidrogeológico de este acuífero.

El acuífero de Solana-Volcadores-Onteniente presenta una estructura geológica de relativa complejidad, afectada por pliegues de dirección N58E, cortados por fallas inversas y de salto en dirección. Está confinado en el 45 % de su extensión, en concreto bajo los valles de Benejama, Biar y Agrés.

La media de la porosidad abierta de las formaciones acuíferas muestreadas es del 6%, su mediana del 4%, mientras que los percentiles 25 y 75 de la muestra estadística considerada son 2 y 7%, respectivamente. Si se consideran como representativos los valores de los percentiles 25 y 75 y los coeficientes de almacenamiento elásticos considerados, las reservas totales de agua en el acuífero de Solana están comprendidas entre 3.300 y 10.400 hm<sup>3</sup>. Del mismo modo, las reservas dinámicas, las que quedaban por encima de la cota de drenaje de los principales puntos de descarga cuando el acuífero funcionaba en régimen natural, quedarían comprendidas entre 49 y 145 hm<sup>3</sup>.

Los nuevos datos geológicos y geofísicos integrados en el modelo geológico 3D del acuífero de Solana-Volcadores-Onteniente, además de proporcionar unos valores aproximados de reservas totales de agua en el acuífero de Solana, permiten a los gestores y planificadores del agua disponer de un mejor conocimiento de la estructura del acuífero. El modelo 3D generado no concuerda con la estructura de pliegues en

champiñón sugerida en algunos trabajos previos, e indica que es muy posible la conexión lateral entre los tres acuíferos modelados, sugiriendo la revisión de las divisorias laterales entre esos acuíferos. En este sentido, se entiende que a la vista de la nueva estructura definida por el modelo geológico 3D, se debería hacer un nuevo análisis de la abundante información piezométrica disponible, agrupando estas medidas según las formaciones hidrogeológicas captadas por cada sondeo. Todo parece indicar que existen diferencias de potencial hidráulico entre las formaciones acuíferas del Turoniense-Senonense y del Cenomaniense inferior-medio debido al efecto semiconfinante de la formación margosa del Cenomaniense superior (Formación Franco). Por otro lado, las capas de información georeferenciadas de techo y muro de las distintas unidades acuíferas del modelo 3D serán de gran utilidad para poder construir nuevos modelos matemáticos de flujo y transporte, con los que evaluar las reservas potencialmente explotables, además de para conocer los sectores más favorables para la captación de reservas de agua en situaciones de emergencia.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación del estudio y antecedentes

Desde la elaboración del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) durante la década de los años setenta y ochenta del anterior siglo, el IGME realiza, en Convenio con la Diputación Provincial de Alicante (DPA), estudios encaminados a mejorar el conocimiento hidrogeológico del agua subterránea en dicha provincia.

El aumento de la demanda y la repercusión que el cambio climático está teniendo en la disponibilidad de recursos hídricos en zonas semiáridas, como las que nos ocupa (UNESCO, 1979), ha obligado a dar un giro en la política de gestión del agua. La planificación del agua subterránea en estas regiones tiene que hacer un mayor énfasis en la evaluación de las reservas, sin dejar de mejorar la evaluación de la recarga a los acuíferos (Martos-Rosillo et al., 2013). No es posible gestionar bien un recurso si no se sabe de cuanto se dispone. La DPA entendió años atrás esta situación, por lo que inició una línea de investigación encaminada a mejorar el conocimiento de las reservas de agua subterránea en la provincia de Alicante. En este sentido, se han realizado evaluaciones de reservas de agua en más de treinta acuíferos de la provincia. Todo este esfuerzo ha contribuido, sin duda, a que ésta sea una de las provincias españolas en las que más se ha avanzado en este sentido (DPA, 2009).

Con todo, la DPA ha querido dar un paso más en la mejora del conocimiento hidrogeológico del subsuelo alicantino y en el marco del Convenio de cooperación de cooperación 2010-2013, en materia de aguas subterráneas, entre el IGME y la DPA ha financiado la actividad **Desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo para la caracterización de recursos hidrogeológicos profundos de Alicante**, dedicada a la evaluación de reservas hídricas ante la previsión de fenómenos extremos, cuyos resultados parciales se presentan en esta Memoria.

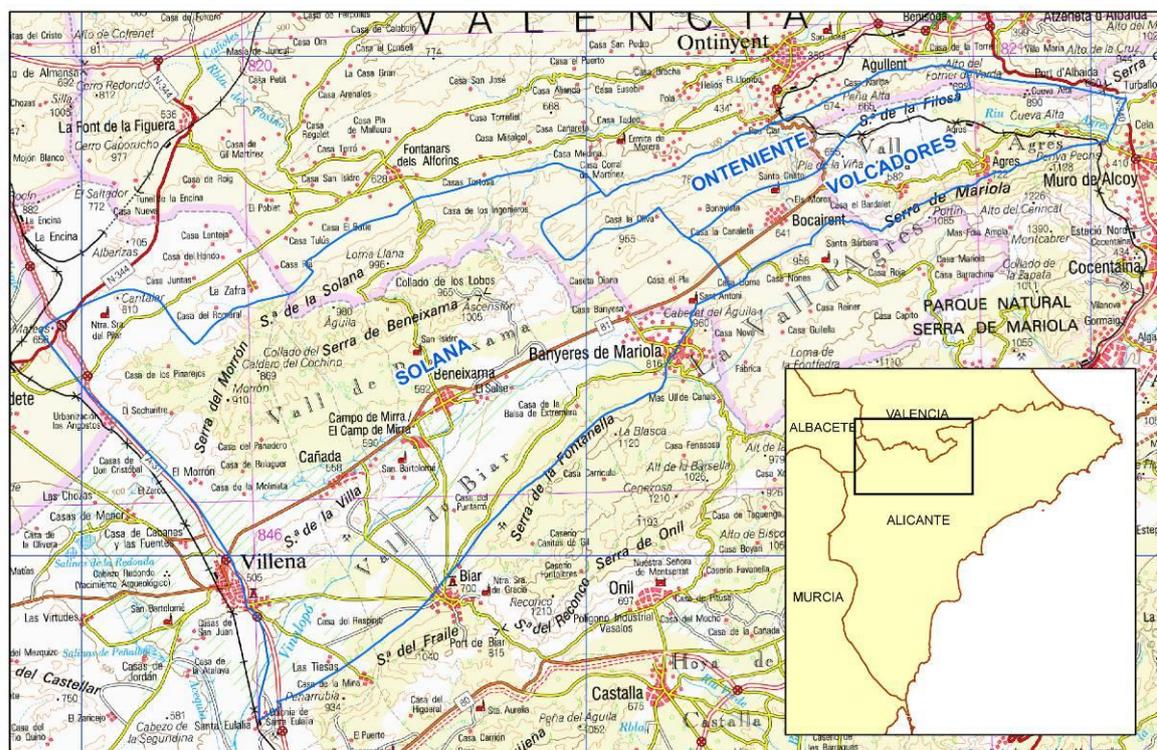
En este trabajo se describe y aplica un procedimiento metodológico para la modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas totales de agua subterránea en acuíferos profundos. Para alcanzar estos objetivos se han aprovechado los recientes y notables avances en la modelación matemática de reservorios geológicos profundos integrando la información geológica, de sondeos y geofísica existente (sísmica, SEVs, MT y gravimetría). Durante los 30 últimos años los métodos y la tecnología en la investigación de formaciones geológicas profundas, y en especial la de naturaleza carbonática, han avanzado drásticamente gracias a la industria petrolera (Ahr 2008, Lucia 1999). En este sentido, la reciente incorporación de los modelos geológicos 3D en la investigación hidrogeológica ha contribuido a conseguir un notable avance en el conocimiento de los acuíferos en sus tres dimensiones. De este modo, desde la realización del *First Australian 3D Hydrogeology Workshop*, celebrado en Canberra, en 2009, ha crecido el número de publicaciones en las que se presentan modelizaciones geológicas 3D de acuíferos encaminadas a la mejora en la evaluación y la gestión de los recursos hídricos subterráneos (Gill et al. 2011, Robins et al. 2004, Ross et al. 2005, Wu et al. 2008). En relación con lo anterior, debe destacarse la notable experiencia y la mejora del conocimiento del subsuelo profundo de la provincia de Alicante adquiridas por el IGME gracias a los proyectos de investigación realizados con motivo de la búsqueda y caracterización de estructuras geológicas para almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> (García Lobón, et al. 2011).

Para aplicar la metodología propuesta, en coordinación con el Departamento del Ciclo Hídrico de la DPA, se han elegido diferentes acuíferos. Su selección ha intentado cubrir cierto espectro de posibilidades referentes a la disponibilidad de información para la elaboración de modelos geológicos 3D.

En esta Memoria se presenta la metodología para la evaluación de reservas y los resultados de su aplicación en la región de la Sierra de Solana, que comprende los acuíferos de Solana, Onteniente y Volcadores según están definidos por la DPA (DPA, 2007). Desde el punto de vista metodológico, el área investigada representa a diferentes acuíferos alicantinos en los que existe abundante información geofísica de distinto tipo (sísmica, sondeos eléctricos verticales y gravimetría) y limitada información geológica de superficie, ya que la exposición del acuífero es sólo parcial al estar gran parte del mismo confinado bajo los sedimentos neógenos y cuaternarios.

## 1.2 Localización

La región estudiada se sitúa entre las provincias de Alicante y Valencia y ocupa un área de 360 km<sup>2</sup>. En esta zona están presentes los acuíferos de Solana, Onteniente y Volcadores que se sitúan sobre las sierras de Morrón, de Solana, de la Villa, de Benejama y Sierra de la Filosa (figura 1). El relieve de estas sierras alcanza alturas que superan los 900 m, destacando el pico de la Ascensión (1.004 m) y el del Carrascalet (955 m). Hacia el sureste, los valles que se incluyen en la zona de estudio son los Valles de Benajama, de Biar y de Agrés con una cota topográfica media de 550 metros. El Río Vinalopó discurre por la zona occidental del Acuífero de Solana, mientras que por la zona oriental, discurre el Río Agrés. Las poblaciones más significativas incluidas dentro del área de estudio son, de oeste a este, Villena, Benejama, Bocairent y Agrés.



**Figura 1.** Localización geográfica del área de estudio. Con línea azul se indican los límites de los acuíferos estudiados, definidos por la DPA (DPA, 2007). Base: mapa topográfico a escala 1:200.000 del Instituto Geográfico Nacional.

### 1.3 Objetivos

Dos son los objetivos fundamentales de este trabajo. El primero consiste en establecer una metodología para la modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas hídricas de acuíferos profundos, y el segundo, en aplicar esta metodología a los acuíferos de Solana-Onteniente-Volcadores.

El subsuelo de esta región se caracteriza por haber sido estudiado con diferentes métodos geofísicos: sísmica de reflexión, sondeos eléctricos verticales, gravimetría y para este trabajo se ha realizado una campaña de sondeos magnetoteléuticos. Además, existen numerosos sondeos mecánicos de investigación hidrogeológica. La integración de esta información junto con la obtenida en superficie a partir de cartografías geológicas y fotointerpretación ha permitido realizar un análisis 3D y conseguir unos objetivos secundarios, pero no por ello menos importantes. Entre éstos cabe citar: i) la obtención de capas georeferenciadas de techo y muro de formaciones geológicas exportables a modelos de flujo y transporte de aguas subterráneas y ii) la posible utilización del modelo 3D como una herramienta de soporte de decisiones para emplazar nuevas captaciones de agua subterránea.

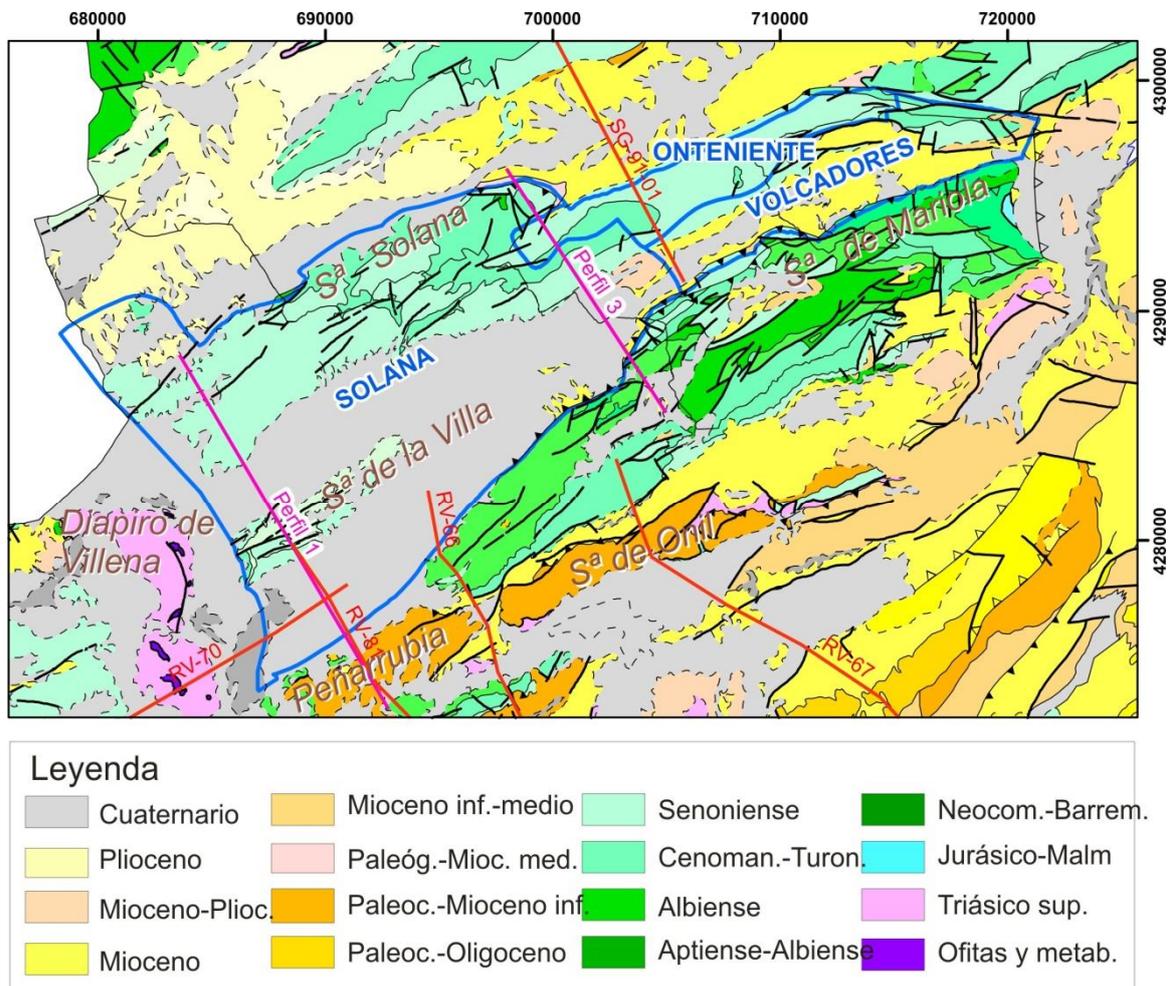


## 2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

### Geología

#### 2.1.1 Encuadre geológico

Los acuíferos de Solana-Onteniente-Volcadores (figura 2) se localizan en el Prebético externo de las Zonas Externas de la Cordillera Bética. El Prebético se ha dividido tradicionalmente en dos áreas: el Prebético interno y el externo (De Ruig, 1992). El Prebético interno está situado hacia el interior de la cuenca e incluye una plataforma abierta con facies de talud y un aumento progresivo en la potencia de las secuencias jurásicas y cretácicas hacia el SE. En el Prebético interno, la sedimentación marina continuó durante el Paleógeno y el Mioceno inferior.



**Figura 2.** Mapa geológico del área estudiada. Fuente: Mapa geológico de la Comunidad de Valencia E. 1:200.000. (IGME). Límites de los acuíferos estudiados en azul.

El Prebético externo, donde se localiza el área de estudio, está localizado cerca del antepaís y lo forman depósitos continentales Jurásicos y Cretácicos en transición a plataformas internas someras, con sedimentación mixta carbonatada-siliciclástica (Martín-Chivelet et al., 2002).

El Prebético se presenta estructurado en un cinturón de pliegues y cabalgamientos de dirección principal ENE-OSO a NE-SO que deforma la cobertera mesozoica-cenozoica. Esta cobertera se encuentra despegada sobre las evaporitas y arcillas triásicas.

El área de estudio no es una región geológicamente compleja y muestra una dirección estructural principal SO-NE pasando a ser E-O en su terminación oriental (figura 2). La zona de estudio está formada por pliegues suaves de vergencia noroeste y generalmente fallas inversas en el flanco NO de los anticlinales. Las alineaciones montañosas corresponden a los anticlinales en los que afloran rocas cretácicas mientras que los valles corresponden a sinclinales rellenos por sedimentos neógenos.

El diapiro triásico del Vinalopó aflora en el extremo occidental del área de estudio y corta a los pliegues de dirección SO-NE. El diapiro del Vinalopó parece corresponder a un accidente tectónico mayor (Rodríguez-Estrella, 1977, Sanz de Galdeano, 1983 y De Ruig, 1992) a favor del cual se ha inyectado el Keuper, que ha manifestado un comportamiento diapírico en los distintos momentos de deformación del Prebético.

## 2.1.2 Estratigrafía

La sucesión estratigráfica en el sector estudiado comprende rocas de edad triásica a cuaternaria (figura 3).

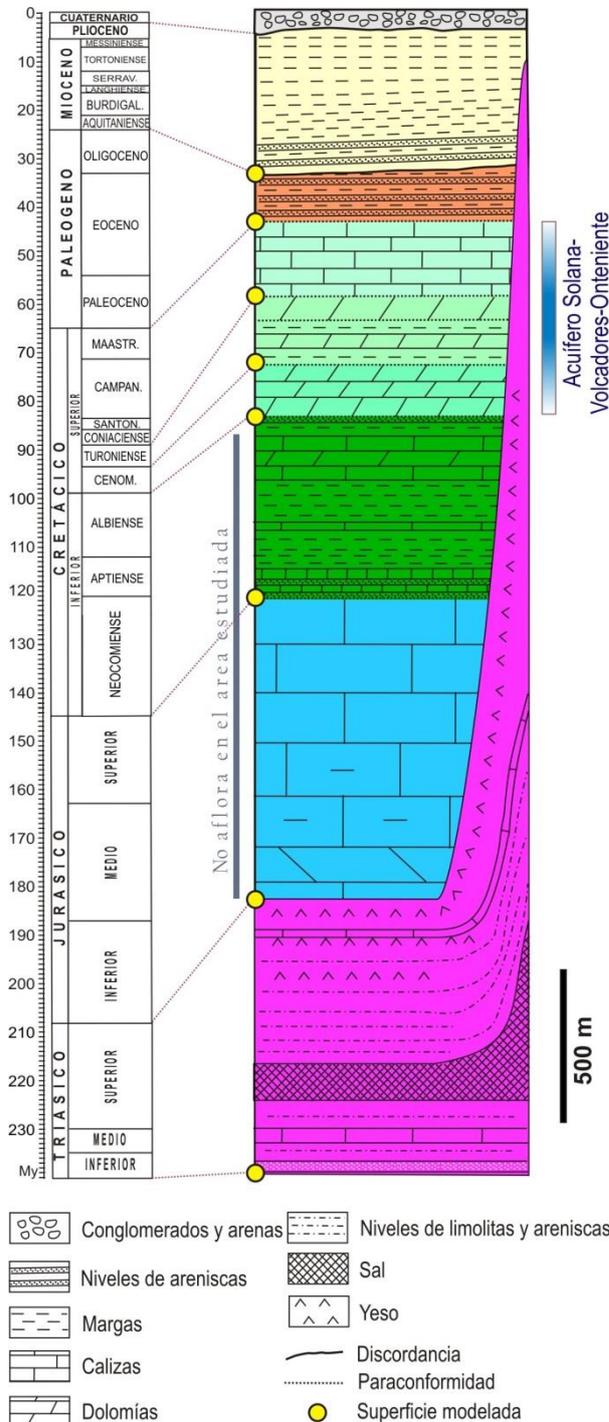
Las rocas **triásicas** están formadas principalmente por evaporitas y arcillas aunque también incluyen niveles de dolomías. Estas facies del Keuper, afloran en la alienación NO-SE del Río Vinalopó al este de Villena. Las facies están formadas por margas y arcillas con niveles de yesos en los que también se observan niveles de dolomías tableadas grises. No se puede conocer el espesor de esta unidad a partir de sus afloramientos en superficie por lo que es necesario utilizar métodos geofísicos indirectos.

Las rocas de edad **jurásica** no afloran en el área estudiada aunque sí en zonas adyacentes. En el núcleo anticlinal de la Sierra de Mariola al este de la población de Muro de Alcoy afloran calizas micríticas parcialmente dolomitizadas de edad Kimmeridgiense-Portlandiense con más de 500 metros de potencia. También existe un afloramiento importante de rocas jurásicas al oeste de la zona estudiada formado por dolomías, calizas y margocalizas de edad Kimmeridgiense, en el núcleo anticlinal de la Sierra de Oliva. En ninguno de los dos afloramientos aparece el muro del Jurásico, por lo que no es posible conocer de forma directa la potencia del Jurásico en esta zona.

El **Cretácico inferior** aflora en el núcleo anticlinal del Alto del Corzo y en la ladera norte del Alto de la Zafra, en la Sierra de Solana. Corresponden a arenas y arcillas en cambio lateral de facies a calizas y margas ocreas, en unas facies de tipo Utrillas de edad Albiense superior. La potencia máxima alcanzada por estos afloramientos es de unos 30 metros. Sin embargo, el Cretácico inferior sí aflora ampliamente con una potencia media de 850 metros en las sierras de Mariola y la Fontanella situadas en el límite sureste de la zona estudiada. La serie estratigráfica en estos afloramientos para el Cretácico inferior es la siguiente:

- Facies Utrillas (Albiense superior). Permeabilidad muy baja.
- Alternancia de calizas y dolomías con escasas intercalaciones margosas (400 m), Barremiense-Albiense. Permeabilidad media a alta.

- Margas grises con intercalaciones de calizas arenosas (300 m), Valanginiense. Barremiense inf. (Neocomiense). Permeabilidad muy baja a baja.
- Calcarenitas oolíticas y areniscas ferruginosas (150 m), Berriasiense . Valanginiense inf. (Neocomiense). Permeabilidad media.



El **Cretácico superior** aflora ampliamente en la Sierra de Solana y en la Sierra de la Villa. Comienza con la denominada trilogía dolomítica de edad Cenomaniense-Turonense y continúa con calizas de edad Senonense. Se han definido las siguientes formaciones en la región de estudio:

- Calizas y calcarenitas. Senonense. Permeabilidad alta.
- Formación Benejama: Dolomías. Turonense. Permeabilidad alta.
- Formación Franco: Dolomías margosas y margas dolomíticas. Cenomaniense superior. Permeabilidad baja.
- Formación Quesada: Dolomías. Cenomaniense inferior y medio. Permeabilidad alta.

El **Paleógeno** no aflora en el área modelizada, pero sí en su límite sur, en la sierras del Fraile, Reconco y Onil o también denominado Peñarubia donde aflora toda una serie paleógena de unos 500 metros de espesor. Los sedimentos corresponden a unas arcillas verdes, calizas y dolomías. En este sector se sitúa la denominada **Franja Anómala** propuesta por Martínez del Olmo (1982) que se corresponde con una estrecha franja donde empezaría la sedimentación paleógena y en la que el Prebético daría paso a facies de plataforma abierta, talud o cuenca hacia el sureste. Se desconoce si bajo el Neógeno del área estudiada existen sedimentos de edad paleógena.

La serie **neógena** se sitúa en posición discordante sobre el Cretácico superior de la Sierra de Solana y de la Villa. Cercano al pueblo de Bocairente afloran 25 metros de areniscas,

calcarenitas y margas de edad Serravalliense. Por encima de estos sedimentos, aflora un potente grupo de margas de edad Tortoniense-Messiniense.

La serie estratigráfica de la región culmina con el **Cuaternario** que se extiende por todo el Valle de Villena-Benejama, recubriendo los niveles más modernos del Neógeno. La potencia de los sedimentos cuaternarios generalmente no es superior a los 30 metros. La litología es principalmente detrítica con proporciones variables de distintas granulometrías.

Una vez descrita la serie estratigráfica de la región se indica en la tabla 1 el comportamiento acuífero de la serie y la unidades geológicas que se han modelizado.

Sistema-Serie	Piso	Unidad estratigráfica	Unidad acuífera	Unidad modelo 3D
Neógeno				Neógeno
Paleógeno			Acuitardo	Paleógeno
Cretácico sup.	Senonense		Acuífero	C4
	Turonense	Fm. Benejama		C3
	Cenomaniense sup.	Fm. Franco	Acuitardo	C2
	Cenomaniense inf.-medio	Fm. Quesada	Acuífero	C1
Cretácico inf.	Albiense superior	Fm. Utrillas	Acuitardo	
	Barremiense-Albiense		Acuífero?	Cretácico inferior
	Neocomiense		Acuitardo	
Jurásico			Acuífero?	Jurásico
Triásico			Acuicludo	Triásico

Tabla 1. Correlación entre la serie estratigráfica, unidades acuíferas y unidades geológicas modelizadas.

### 2.1.3 Estructura

La zona estudiada se encuentra ubicada en el denominado Prebético externo tanto por las facies de plataforma que afloran como por el estilo estructural típico de un cinturón de cabalgamiento y plegamiento cercano al *foreland*. La dirección estructural es N58E y pasa a N64E en la terminación oriental. Los pliegues son paralelos y cilíndricos con buzamientos suaves y vergencia noroeste. En el flanco noroeste de los pliegues se desarrollan fallas inversas lístricas de traza recta, que en profundidad posiblemente despegan sobre las arcillas triásicas de facies Keuper. El plegamiento afecta a los sedimentos miocenos, por lo que se puede concluir que el plegamiento debido a la compresión bética NO-SE funcionó hasta esta edad.

Las alineaciones montañosas se desarrollan en las charnelas de los anticlinales mientras que los sinclinales desarrollan valles planos con sedimentación neógena y cuaternaria. Existen dos pliegues anticlinales principales: el anticlinal de Sierra de Solana con una de longitud del eje del pliegue de 40 km y el anticlinal de la Sierra de la Villa de unos 11 km de longitud. El sinclinal adyacente al SE de la Sierra de Solana y la Sierra de la Villa está cobijado bajo la falla inversa de la Sierra de Mariola. La falla inversa que limita la Sierra de Solana cobija a su vez al sinclinal de Fontaneres-Onteniente situado al NO. Las trazas de las fallas son bastante rectilíneas con una longitud media unos 15 km y generalmente cortan la superficie topográfica aunque también se han modelizado fallas inversas ciegas. Se observan también fallas normales de dirección OSO-ENE.

Los pliegues de Sierra de Solana y Sierra de La Villa han sido descritos por Martínez et al. (1975) como pliegues de tipo "hampiñón", es decir, con ambos flancos verticales e incluso invertidos. Sin embargo, no existe ninguna evidencia de esta geometría de pliegues en el área, ya que la estratificación del flanco largo del pliegue buza suavemente hacia el SE en todos los afloramientos. Además la interpretación de los sondeos mecánicos y los sondeos eléctricos verticales tampoco indican ese particular tipo de geometría. El pozo Lloma Les Cabres corta una inusual potencia de 214 m de la Formación Franco que podría atribuirse a la repetición de la serie por una falla inversa.

La región más meridional está caracterizada por la denominada "Franja Anómala" (Martínez del Olmo, 1982) accidente sinsedimentario muy importante en la paleogeografía del Cretácico superior y del Paleógeno. No se conoce bien la presencia de sedimentos paleógenos bajo el Neógeno en la zona estudiada, pero no es descartable.

El Prebético se caracteriza por la presencia de numerosos diapiros triásicos y sus emplazamientos actuales están íntimamente ligados a la etapa compresiva final aunque en su origen tuvieron lugar durante la extensión de la plataforma cretácica. En el área de estudio aflora el diapiro del Vinalopó o de Villena en el extremo occidental e interrumpe a los pliegues. El diapiro del Vinalopó parece corresponder a un accidente tectónico mayor (Rodríguez-Estrella, 1977, Sanz de Galdeano, 1983 y De Ruig, 1992) a favor del cual se inyectó el Keuper, que ha manifestado un comportamiento diapírico en las distintas fases de deformación. El diapiro del Vinalopó, es una zona rectilínea, larga y deprimida con afloramientos grandes y caóticos de rocas triásicas. Está cubierto por abanicos aluviales del Pleistoceno que descienden del relieve de Sierra de Solana.

## 2.2 Hidrogeología

El área modelizada en este trabajo incluye a los acuíferos de Solana, Onteniente y Volcadores, según los límites descritos por la DPA (2007), dado que en el modelo geológico que se presenta, se considera que existe continuidad geológica en toda la estructura plegada que configura a los citados acuíferos. Las principales características hidrogeológicas de los acuíferos considerados se describen a continuación.

### 2.2.1 Acuífero de Solana

El acuífero de Solana se sitúa en el borde noroccidental de la provincia de Alicante, en la comarca del Alto Vinalopó. Consiste en uno de los acuíferos más importantes de la provincia de Alicante, un 12,2% de la explotación de agua subterránea de la provincia, lo que equivalente a 30 hm<sup>3</sup>/año, se extrae del acuífero de Solana (DPA, 2010).

El acuífero Solana se define por el IGME en 1978, si bien sus límites han sido modificados en estudios posteriores. Los principales estudios hidrogeológicos realizados se han centrado en la evaluación de sus recursos y en la elaboración de diferentes propuestas de normas de explotación (DPA-IGME, 1992) así como en la evaluación de sus reservas (DPA-IGME, 2003b). Asimismo, existen diferentes trabajos que han consistido en la elaboración de distintos modelos de flujo calibrados en régimen permanente y transitorio (IGME, 1986; DPA-IGME, 2006; DPA, 2010).

El clima de la zona donde se ubica el acuífero de Solana es de tipo mediterráneo seco con carácter continental cálido. La precipitación media anual está comprendida entre 350 y 700 mm/año. La temperatura media anual es de 14°C y la evapotranspiración

potencial, calculada con la expresión de Thornwaithe, de 750 mm/año (DPA-IGME, 2013, in prep.).

Desde el punto de vista geológico, está formado por materiales pertenecientes al Dominio Prebético Externo y materiales neógenos y pliocuaternarios superpuestos sobre los anteriores. El acuífero cuenta con una extensión total de unos 280 km<sup>2</sup> y una superficie permeable aflorante de unos 128 km<sup>2</sup>, por lo que se encuentra confinado en buena parte de su extensión (DPA, 2010).

El muro del acuífero, descrito en trabajos anteriores (IGME, 1986), lo definiría el límite de las rocas carbonáticas sobre el Cretácico inferior de la formación Utrillas, que en conjunto la constituyen margas, arcillas y arenas. El Cenomaniense que constituiría la formación acuífera más profunda, lo forman unos 170 m de dolomías grises, muy fracturadas (formación Quesada), a las que se superponen 135 m de dolomías arcillosas y margas dolomíticas que presentan comportamiento de acuitardo, de edad Cenomaniense superior (Fm. Franco). Sobre este conjunto se depositaron unos 70 m de dolomías de edad Turoniense (Fm. Benejama) y finalmente 250 m de rocas carbonáticas, fundamentalmente calizas de edad Senonense. Esta serie constituye el principal tramo permeable del acuífero de Solana.

Por otro lado, los valles de Biar y Benejama, desarrollados sobre dos estructuras sinclinales, en las que los materiales permeables cretácicos quedan confinados, están rellenos por un potente conjunto margoso que presenta sedimentos con edades comprendidas entre el Mioceno y el Cuaternario. Los materiales de menor edad del relleno mioceno-pliocuaternario están compuestos por una alternancia de gravas, arenas y arcillas, que en la zona de Caudete. Villena adquieren un carácter más arcilloso en profundidad. La potencia de estos materiales de cierta permeabilidad es muy variable, desde 650 m, en el eje de los sinclinales, hasta desaparecer debido a la erosión en superficie.

Los límites laterales del acuífero se consideran cerrados al flujo subterráneo, si bien existe cierta controversia respecto al carácter del límite oriental. Al norte el acuífero limita, mediante el cabalgamiento frontal de la Sierra de Solana, con los materiales margosos del relleno del sinclinal Fontanares-Onteniente (IGME, 1986). El límite meridional corresponde al cabalgamiento que enfrenta los materiales carbonáticos de la Sierra de Mariola con las margas de la sinforma de Villena-Bocairente. Por su parte, el acuífero de Solana limita al oeste con las arcillas y margas triásicas del diapiro de Villena. Por último, el límite oriental se definió en base a datos hidrogeológicos (DPA-IGME, 2003b) y se señaló como causa de la existencia de la divisoria, el probable levantamiento del impermeable de base en el Alto del Corzo. Ese levantamiento del Cretácico inferior en la estructura anticlinal podría provocar la formación de un límite parcialmente cerrado entre los acuíferos de Solana, Volcadores y Onteniente. En este sentido, en el informe DPA-IGME (2003b) se puso de manifiesto la conveniencia de estudiar el carácter de este límite mediante sondeos mecánicos, dado que con la actual explotación del acuífero de Solana, se podría estar provocando la llamada lateral de recursos hídricos de los acuíferos de Volcadores y de Onteniente.

En lo que se refiere a los parámetros hidráulicos del acuífero, la reinterpretación de 11 ensayos de bombeo permitió comprobar que la transmisividad de los sondeos que captan materiales carbonáticos se ajusta bien a una distribución log-normal con una mediana 467 m<sup>2</sup>/día y un fondo hidrogeológico comprendido entre 89 y 2442 m<sup>2</sup>/día (DPA-IGME, 2006).

En relación con los parámetros hidráulicos del acuífero, se debe indicar que en el modelo de flujo realizado en 2006 (DPA-IGME, 2006) se definieron dos capas: la

primera, que incluía el acuífero detrítico y la parte libre de los materiales carbonáticos, y la segunda, que consideraba las rocas carbonáticas confinadas. Este modelo se calibró con permeabilidades del orden de 0,75 m/día en el caso de las rocas carbonáticas confinadas. En ese sentido, si se consideraba un espesor medio del acuífero de 550 m, la transmisividad que resultó, 400 m<sup>2</sup>/día, sería coherente con la que se desprende de la reinterpretación de los ensayos de bombeo. No obstante, en el citado modelo, la permeabilidad fue mayor en algunos sectores, dado que quedó comprendida entre 11 m/día, en la Sierra de Solana, y 46 m/día, en la Sierra de la Villa (DPA-IGME, 2006). Además, las calibraciones conseguidas en régimen transitorio en el informe DPA-IGME (2006) requieren coeficientes de almacenamiento S de 0,028 en el detrítico y de  $1 \times 10^{-4}$  en la zona confinada de los materiales carbonáticos. Por otro lado, la migración del modelo realizado, en 2006, con el código *Visual Modflow*, al código MOFA (DPA, 2010), requirió una nueva calibración del modelo. En esta ocasión se consideraron seis capas. Las tres primeras se correspondían con el relleno Mioceno-Cuaternario, a las que se les asignó una permeabilidad de 20 m/día, un coeficiente de almacenamiento libre del 1% y uno elástico de  $1 \times 10^{-4}$ . En las capas permeables de las rocas carbonáticas la permeabilidad considerada fue de 5 m/día, el S libre de 0,4% y el S elástico de  $1 \times 10^{-6}$ . En el acuitardo correspondiente a la formación Franco, capa 5, se consideró una permeabilidad de 1 m/día, un S libre de 0,2 % y un S elástico de  $5 \cdot 10^{-7}$ .

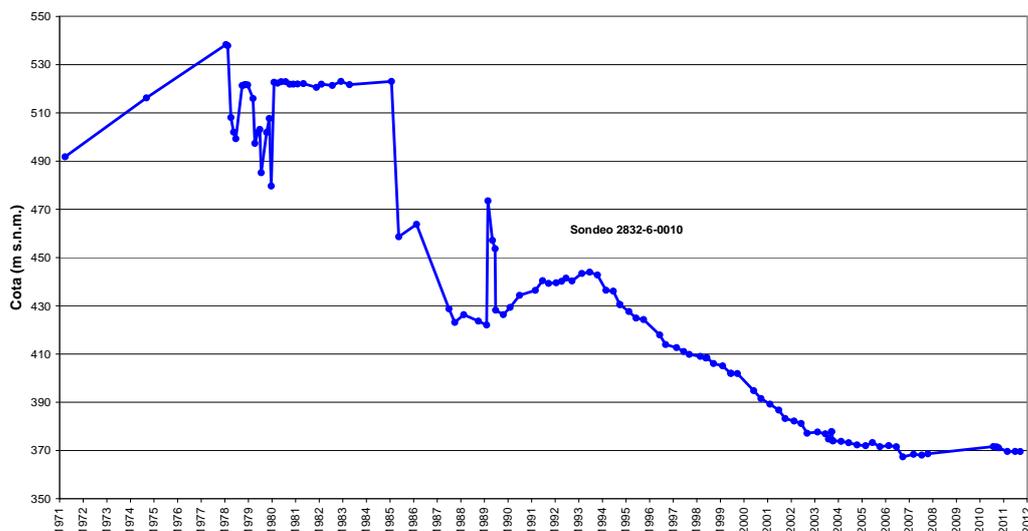
Este acuífero, actualmente sometido a un consumo continuado de reservas, descargaba sus recursos, cuando funcionaba en régimen natural, por una serie de manantiales localizados en las inmediaciones de Villena (Cuartel, Chorros y Bordoño o Losilla). Estos manantiales presentaban un caudal medio que en conjunto superaba los 300 l/s (IGME, 1986) y estaban situados a una cota topográfica de 502 m.s.n.m. En estas condiciones, el flujo subterráneo se dirigía del noreste al suroeste, desde una cota de unos 525 m.s.n.m., en el área donde se define la divisoria con los acuíferos de Onteniente y Volcadores, y los 502 m de altitud a los que manaban los manantiales, con un gradiente hidráulico medio del 1‰ .

En la actualidad el flujo sigue la misma dirección, dado que la mayoría de las explotaciones se localizan en el sector oriental del acuífero. En este sentido, en DPA-IGME (2013, in prep.) se indica que, con datos piezométricos de 2010, el flujo subterráneo sigue presentando una dirección NE-SO, con las cotas piezométricas comprendidas entre 390 y 340 m.s.n.m.

Por tanto, la intensa explotación a la que ha sido sometido este acuífero desde los años 60 del anterior siglo ha provocado la desaparición de los manantiales y un descenso acumulado del nivel piezométrico de 122 m en 40 años, lo que equivaldría a un descenso medio de unos 3 m/año (ver Figura 4). En DPA-IGME (2013, in prep.) se especifica que el consumo de reservas de este acuífero ha sido de unos 315 hm<sup>3</sup>, con ritmos de vaciado anuales del orden de 8 a 9 hm<sup>3</sup>/año, en el periodo 1958-2008, y que en la actualidad han pasado a un ritmo de 1 hm<sup>3</sup>/año.

En la actualidad, la recarga de este acuífero se produce fundamentalmente por la infiltración de lluvia aunque también por retornos de riego y, en menor medida, por la recarga que procede de los materiales cuaternarios asociados al río Vinalopó, en periodos de lluvias intensas. Por su parte, las salidas se producen mediante la explotación de los numerosos pozos de bombeo que se destinan al regadío y abastecimiento urbano de las poblaciones de Benejama, Campo de Mirra, Cañada, Villena, además de la exportación de agua para abastecimiento a las comarca del Medio Vinalopó y La Alacantí.

**EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA DOMINIO HIDROGEOLÓGICO Nº 11. SOLANA**  
- Acuífero Solana -



**Figura 4.** Evolución del nivel piezométrico en el sondeo 2832-6-0010 del acuífero de Solana (DPA-IGME, 2013, in prep.).

El balance medio del acuífero, con las explotaciones actuales (DPA-IGME, 2013, in prep.), es el siguiente:

**Entradas (hm<sup>3</sup>/año)**

-Infiltración de lluvia	30,0
-Cauces y retornos	4,0
Total entradas	34,0

**Salidas (hm<sup>3</sup>/año)**

-Bombeos urbanos y agrícolas	35,0
Total salidas	35,0

En Pérez-Bielsa y Lambán (2006) se indica que el agua subterránea del acuífero de Solana presenta una facies hidroquímica muy homogénea y baja mineralización. Se trata, fundamentalmente, de aguas bicarbonatadas cálcico magnésicas con contenidos variables en sulfato, calcio y magnesio, si bien algunos puntos presentan aguas de tipo bicarbonato sulfatado cálcico magnésicas, con mayores contenidos en nitratos que en el resto, y clorurado sódicas. Por otro lado, los contenidos en deuterio y oxígeno-18 han permitido construir una curva altitudinal que indicaría una cota de recarga del agua de lluvia comprendida entre 600 y 950 m.s.n.m., que coincide con la de los afloramientos carbonáticos de las estructuras anticlinales.

### 2.2.2 Acuíferos de Volcadores y de Onteniente

Al este del acuífero de Solana fueron descritos en DPA (2007) los acuíferos de Onteniente y de Volcadores. Los límites y el funcionamiento hidrogeológico de ambos acuíferos presentan ciertas discrepancias y a fecha de hoy no están totalmente consensuados.

En el caso del acuífero de Onteniente, según la actual definición de los límites hecha por la DPA (2007), presenta una superficie de 33 km<sup>2</sup>, de los que 28 km<sup>2</sup> corresponden a afloramientos permeables. En la vertical los materiales que constituyen el acuífero son los mismos que los de la serie Cretácica del acuífero de Solana, con el que tiene continuidad estructural. De igual modo, el acuífero de Volcadores con una extensión de 53 km<sup>2</sup> y 17 km<sup>2</sup> de afloramientos permeables (DPA, 2007), presenta los mismos materiales acuíferos que el acuífero de Onteniente y Solana.

La geometría del acuífero de Onteniente está definida por un anticlinal suave de dirección NNO-SSE. Al norte la estructura está interrumpida por la falla inversa de la Sierra de Solana, definiendo un límite de flujo nulo. Hacia el sur, el flanco meridional del anticlinal se hunde bajo el relleno Mioceno-Cuaternario y da lugar al acuífero de Volcadores, en donde los afloramientos carbonáticos se sitúan en los márgenes noroeste y noreste. La prolongación del flanco hacia el sureste culmina en la falla inversa de la Sierra de Mariola. Hacia el este, el límite viene marcado por la falla que pasa por el Puerto de Albaida de la autovía A7. Hacia el oeste, el límite de los acuíferos de Volcadores y de Onteniente coincide con la divisoria hidrogeológica con el acuífero de Solana. En relación con este límite y como se desprende de este trabajo se debe indicar que no existe ningún accidente geológico que lo justifique. No obstante el levantamiento del acuitardo de la formación Franco podría justificar la existencia de las diferentes cotas piezométricas que se registran en este sector.

En régimen natural el principal punto de descarga del acuífero de Onteniente consistía en el manantial del Pou Clar, situado a 385 m.s.n.m. y en el que se citan caudales medios de drenaje, cuando éste estaba activo, de 320 l/s (IGME, 1986). Actualmente este manantial se encuentra seco como consecuencia de la importante explotación a la que se encuentra sometido este acuífero. Por otro lado, las piezometrías realizadas en varios trabajos previos presentan gradientes hidráulicos mayores del 3% (DPA-IGME, 2003b), que no son coherentes con el tipo de litología y con la permeabilidad que se supone en el entorno de un manantial kárstico. En relación con lo anterior todo parece apuntar hacia la posibilidad de que los niveles margosos de la formación Franco delimiten en la vertical dos acuíferos con diferentes potenciales hidráulicos, de manera que el Pou Clar podría constituir el principal punto de descarga de la formación Quesada (Cenomaniense), a través de la falla inversa sobre la que se localiza, mientras que los pozos del entorno, con mayores cotas piezométricas, explotarían fundamentalmente los tramos productivos del conjunto Turoniense-Senonense.

En lo que se refiere al funcionamiento hidrogeológico del acuífero de Volcadores, en DPA (2003) se dice que sus salidas, en régimen natural, se producían, fundamentalmente, a través del manantial del Balneario de Agrés, con una cota de surgencia a 475 m.s.n.m. El caudal drenado por este manantial, en 1970, alcanzaba los 17 l/s. Asimismo, el agua presentaba una temperatura media de 28°C. En este sentido se debe indicar que el carácter termal de esta descarga debe estar asociado a la presencia de la falla inversa del Puerto de Albaida, que delimita el acuífero por su parte noreste, y que permitiría el drenaje de un flujo de relativa profundidad.

La alimentación del acuífero de Volcadores se cifró en DPA (2007) en 0,9 hm<sup>3</sup>/año, y los bombeos en unos 0,7 hm<sup>3</sup>/año. El resto se descarga hacia el río Agrés.



### 3. METODOLOGÍA

Para el cálculo del volumen de reservas totales de los acuíferos de Solana-Onteniente-Volcadores se ha realizado un detallado modelo geológico 3D. Se han utilizado los códigos *Gocad* y *3D GeoModeller*, donde se ha integrado información cartográfica y estructural de detalle, geofísica (sísmica de reflexión, sondeos eléctricos verticales, sondeos magnetotelúricos y gravimetría), información litológica procedente de sondeos mecánicos y datos de la porosidad de la matriz, de muestras tomadas en campo para este proyecto. Cada uno de los dos grandes apartados metodológicos (modelización 3D y evaluación de la porosidad abierta y cálculo del volumen total de reservas) se explican con mayor detalle a continuación.

#### 3.1 Modelización 3D

##### 3.1.1 Elementos del modelo. Superficies de Referencia y Fallas

El primer paso, y más importante, en la construcción de un modelo geológico 3D es la definición de sus elementos básicos: superficies de techo y muro de las unidades a modelar y fallas principales que las afectan, que configuran la arquitectura del volumen a construir.

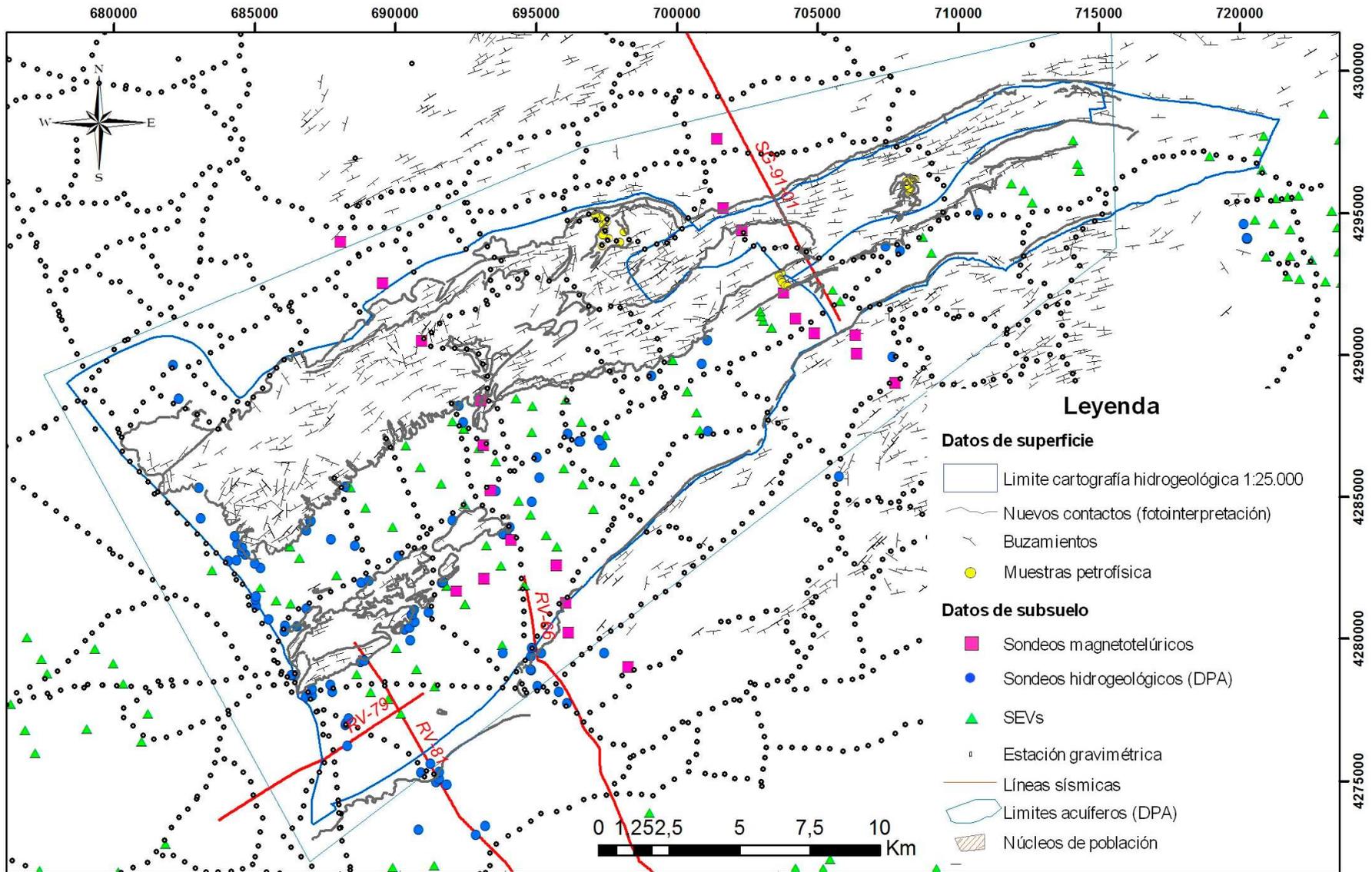
El análisis de datos geológicos de superficie y de subsuelo disponibles en la región del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores, ha permitido reconstruir 9 superficies geológicas y 16 fallas que limitan a 9 unidades geológicas del modelo 3D (tabla 2). El tipo de datos utilizados para la construcción del modelo 3D se resume en la tabla 2 y se describe en los siguientes párrafos.

Tipo	Datos	Descripción	Fuente
Superficie	Cartografía geológica	Hojas MAGNA: 819-Caudete, 820-Onteniente 821-Alcoy, 845-Yecla, 846-Castalla, Mapa hidrogeológico 1:25.000	Cartografía Magna, DPA-IGME (2003b), fotointerpretación
	Datos estructurales	756 medidas de dirección y buzamiento estratificación	Cartografía geológica y fotointerpretación
	Ortofotografías MDT	Ortofotografías y MDT de Google Earth	Google Earth
Subsuelo	Sondeos	84 sondeos	DPA
	Líneas sísmicas	RV-66, RV-79, RV-81 y SG-91-01 47 km de líneas a interpretar.	Repsol
	Gravimetría	1600 estaciones gravimétricas	IGME
	Sondeos eléctricos verticales	68 SEVs	IGME
	Sondeos Magnetotelúricos	22 sondeos MT	Campaña IGME para este proyecto

**Tabla 2.** Datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores.

Los datos de superficie corresponden principalmente a los contactos litológicos entre las formaciones y los contactos de falla. Estos contactos provienen en su mayor parte de la cartografía geológica previa del IGME y de la cartografía 1:25.000 (DPA-IGME, 2003b), aunque localmente se han modificado algunos de ellos a partir de las

observaciones realizadas mediante fotointerpretación. También se han incorporado al modelo 3D medidas de la orientación de la estratificación. Los datos de dirección y buzamiento de la estratificación provienen de la cartografía geológica previa y de nuevos datos adquiridos a partir de fotointerpretación. El total de datos de buzamiento incorporado al modelo es de 756.



**Figura 5.** Distribución de datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores. Se han utilizado 84 sondeos mecánicos, 4 líneas sísmicas, 68 SEV, 1600 puntos de gravimetría, 22 sondeos magnetotélúricos e información cartográfica de superficie.

Para la construcción del modelo geológico 3D se han utilizado las columnas litológicas de 84 sondeos mecánicos. Esta información proviene de la base de datos del grupo de Ciclo Hidrológico de la DPA. Los sondeos se han suministrado en una hoja Excel donde se describen las litologías atravesadas y en algún caso se asignan edades a las litologías. No todos los sondeos registrados tienen interpretación litológica en la totalidad de la columna perforada. La profundidad media de los sondeos es de 295 metros siendo el sondeo Prisas-Bis el más profundo con 875 metros.

También se han incorporado al modelo geológico 3D los horizontes sísmicos interpretados y convertidos a profundidad de las líneas RV-66, RV-79, RV-81 y SG-91-01. Estas líneas se encuentran en formato digital SEG-Y y han sido cedidas por la compañía Repsol. Se han interpretado unos 47 kilómetros de líneas sísmicas.

Otro de los datos de subsuelo utilizados en este proyecto son los datos gravimétricos, con un total de 1600 estaciones obtenidas de la base de datos del IGME y procesadas mediante inversión gravimétrica 3D para investigar la posición del Triásico y Jurásico bajo el subsuelo del acuífero.

En todo el valle con relleno cuaternario y terciario situado entre las alineaciones montañosas de Solana al NO y Peñarubia y Mariola al SE, se realizaron campañas de sondeos eléctricos verticales o SEVs. Se han utilizado los modelos de capas de las curvas de resistividad (IGME 1999).

La distribución de los datos de superficie y subsuelo que han permitido construir el modelo 3D se representan en la figura 5. Es importante conocer esta distribución porque informa de la calidad del modelo en diferentes áreas. Zonas con una mayor densidad de datos y de diferentes tipos suponen un mayor parecido del modelo con la realidad.

### **3.1.2 Métodos y proceso de datos**

Para la construcción del modelo geológico 3D se han utilizado numerosos programas. A continuación se describen brevemente las características y utilidad de cada uno de ellos.

#### *3D Geomodeller*

*3D Geomodeller* es un software que permite la construcción de modelos geológicos complejos en 3D (fallas, pliegues, estratos invertidos, intrusiones, etc.). Para ello utiliza datos geológicos de superficie y subsuelo y luego aplica un algoritmo geoestadístico para obtener una solución satisfactoria. *3D Geomodeller* considera que la estratificación y las fallas corresponden a superficies en el espacio 3D análogas a las de los campos potenciales. Mientras que los contactos son isovalores del campo potencial, los buzamientos son gradientes de ese campo. El algoritmo de interpolación de este programa es el *cokriging*. El *cokriging* equipotencial (puntos de contacto de las unidades geológicas) y sus derivadas (datos de orientación) proporcionan una función espacial 3D de la superficie que se quiere modelizar (Lajaunie et al., 1997). También se utiliza este programa para la aplicación de la inversión gravimétrica 3D a un modelo geológico 3D previo.

### Gocad

El programa *Gocad* (*Geological Objects Computer Aided Design*) es un programa de modelización geológica 3D. Este código presenta numerosos módulos para la modelización de propiedades petrofísicas y facies. También permite la incorporación de líneas sísmicas, sondeos y logs en el proceso de construcción del modelo 3D. *Gocad* se ha utilizado en este proyecto para mejorar el modelo obtenido en *3D Geomodeller* y editar las superficies obtenidas. También se ha utilizado para construir la malla 3D del modelo geológico a la que se le asignan valores de porosidad eficaz para el cálculo de las reservas totales de agua subterránea.

### ArcGis

*ArcGis* es un sistema de información geográfica orientado a la gestión y explotación de la información espacial. En este proyecto se ha utilizado *ArcGis* para la gestión de la información geográfica (sondeos, cartografía geológica, posición de puntos de adquisición geofísica, etc.) y para la exportación de los contactos geológicos y buzamientos como datos de entrada al modelo en el programa *3D Geomodeller*.

### SMT Kingdom Suite

*Kingdom Suite* es un programa de interpretación sísmica y se ha utilizado para la interpretación de los horizontes sísmicos de las líneas estudiadas y la transformación tiempo-profundidad. Los horizontes sísmicos interpretados han sido exportados como datos de entrada al modelo en *3D Geomodeller*.

### Global Mapper:

*Global Mapper* es un programa de visualización cartográfica, con herramientas básicas de edición y visualización 3D aunque no tiene herramientas avanzadas de análisis SIG. La ventaja de este programa es su gran versatilidad para importar y exportar todo tipo de ficheros vectoriales y raster. Además, la visualización 3D es muy rápida y consume pocos recursos. En este proyecto se ha utilizado para la exportación del MDT al formato xyz requerido por *3D Geomodeller*.

### Google Earth

*Google Earth* es un globo virtual que permite visualizar el relieve, fotografías aéreas e información geográfica variada en un entorno 3D. Es un programa libre y gratuito. *Google Earth* utiliza el modelo digital de elevaciones (MDE) elaborado por la NASA en la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). La resolución de este modelo es de 1 arco de segundo, unos 30 metros aproximadamente. El sistema de proyección que utiliza *Google Earth* es el WGS84 con coordenadas geográficas. La resolución de las imágenes aéreas es de 0.5 m en la mayor parte del territorio. Además, se puede visualizar diferentes series de fotografías obtenidas en distintas fechas. También permite importar capas de información (cartografía, sondeos, etc.) mediante archivos *kml* o *kmz*. Este programa se ha utilizado para la digitalización en un entorno 3D de los contactos geológicos y la estratificación.

### Excel

*Microsoft Excel* es la aplicación de *Microsoft Office* para hojas de cálculo. Este programa se utiliza para la gestión y transformación de formatos de distintos archivos como los sondeos mecánicos y los sondeos eléctricos verticales a los formatos requeridos por *3D Geomodeller* y *Gocad*.

### WinGlink

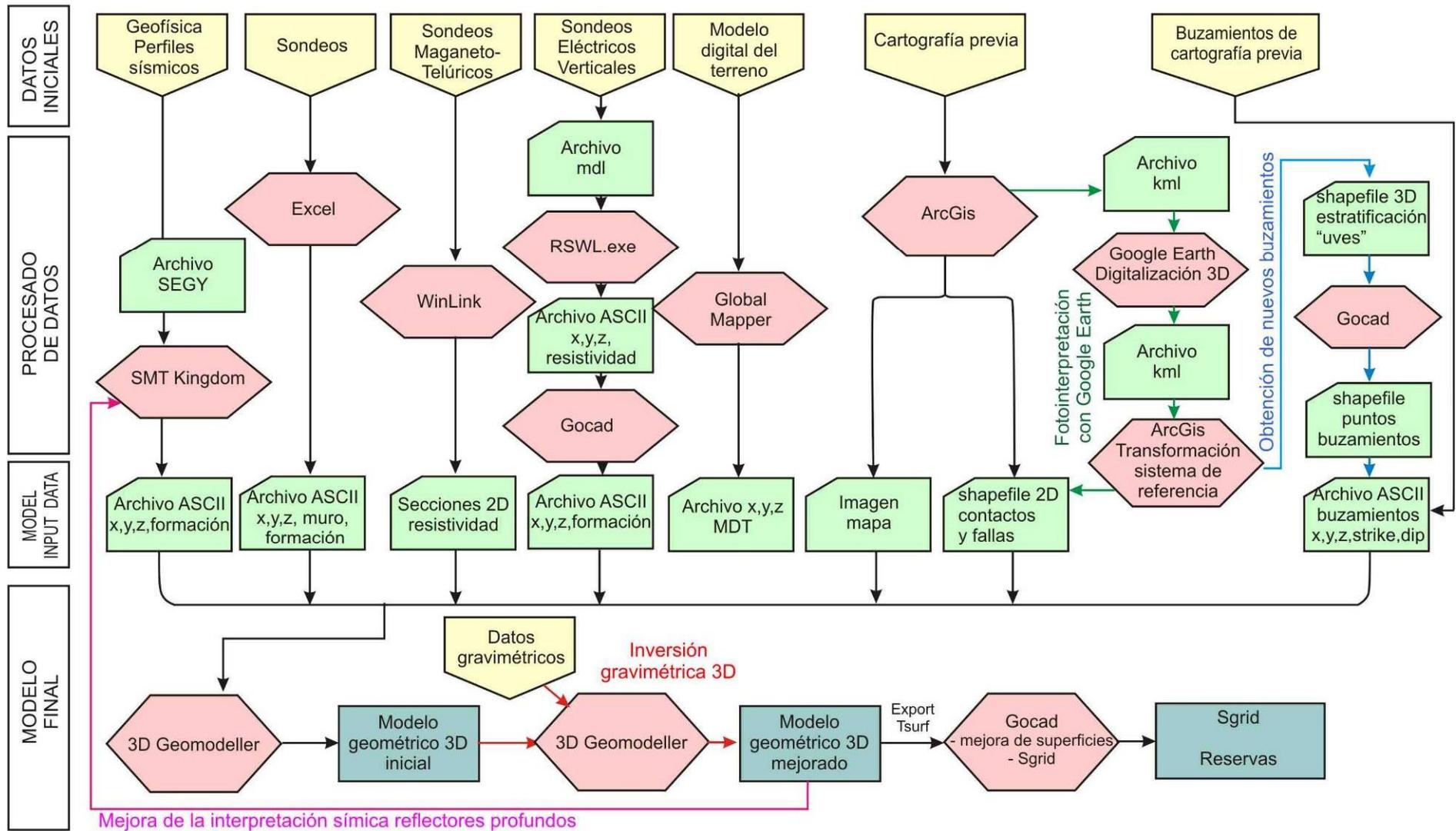
Programa para el procesado de las series temporales del campo eléctrico y magnético natural. En el procesado se realiza la transformación del dominio de tiempo al de la frecuencia. A continuación se realiza la inversión 2D de los datos para obtener secciones resistividad-profundidad que permitirán interpretar la distribución de cuerpos geológicos con distinta resistividad.

En los siguientes párrafos se describirá brevemente la secuencia metodológica utilizada para la construcción del modelo geológico 3D (figura 6).

### **Perfiles sísmicos**

Los perfiles sísmicos utilizados en este proyecto (figura 7) se encuentran originalmente en formato digital *SEG-Y* por lo tanto se pueden importar directamente al programa *SMT Kingdom* para interpretar los reflectores sísmicos de interés. Los reflectores interpretados han sido el muro de la unidad Triásica, el muro de la unidad Jurásica, el muro del Cretácico inferior, el muro de la unidad Senonense, el muro de la unidad Paleógena y el muro de la unidad Neógena.

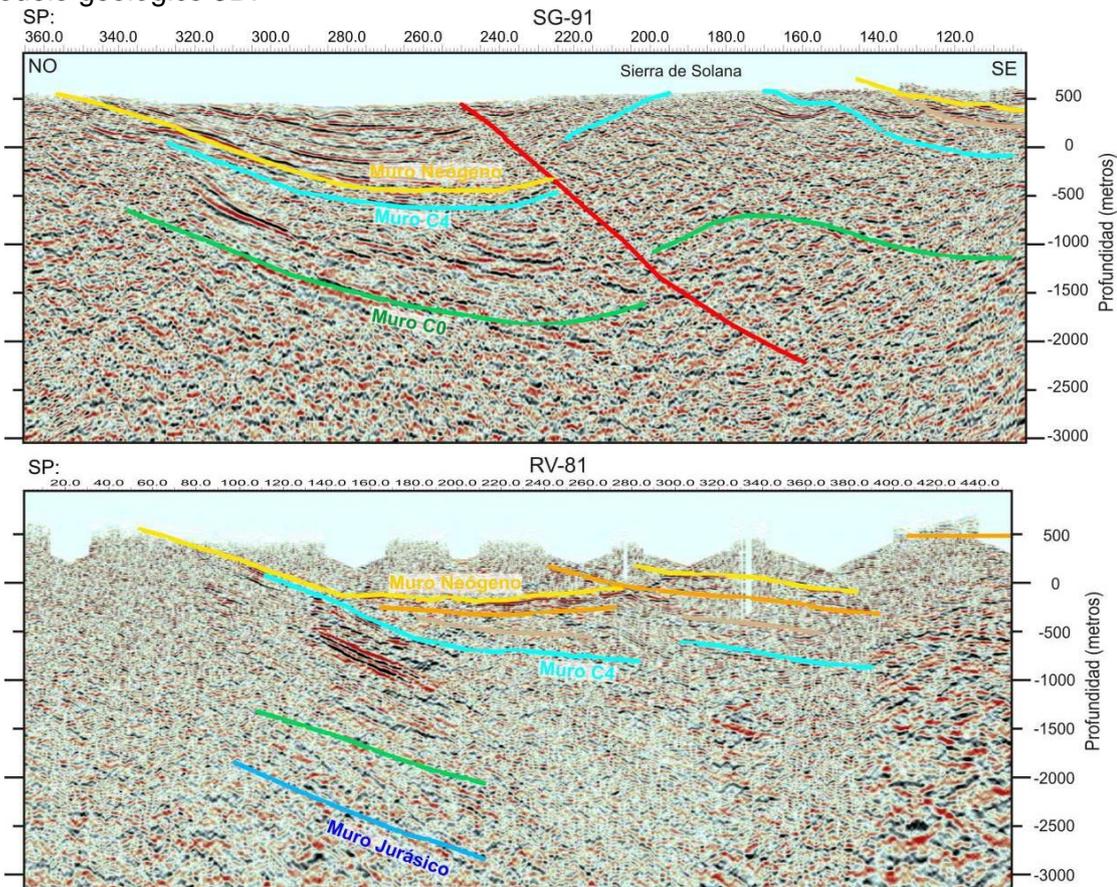
## WORKFLOW MODELIZACIÓN GEOLÓGICA 3D



**Figura 6.** Diagrama de flujo del procesado de los datos para la realización del modelo geológico 3D.

Desafortunadamente no existe ningún sondeo profundo que corte las formaciones profundas triásicas y jurásicas. Mientras que los horizontes sísmicos del Cretácico superior y el Neógeno se pueden interpretar a partir del afloramiento en superficie de estas unidades, la posición de los horizontes correspondientes al Cretácico inferior, Jurásico y Triásico son una incógnita. A partir del modelo 3D mejorado con la inversión gravimétrica 3D es posible tener una primera aproximación de la posición de estas unidades geológicas en profundidad e interpretar, a posteriori, la distribución de los horizontes sísmicos profundos equivalentes, que serán incluidos de nuevo en el modelo 3D.

Debido a que no existen sondeos con datos de velocidad de las formaciones cortadas, no es posible establecer una relación tiempo-profundidad que nos permita realizar la transformación de los horizontes sísmicos a profundidad. Por lo tanto, para realizar esta transformación se han utilizado las velocidades NMO generadas durante el procesado sísmico. A partir de la velocidad NMO se obtiene una ecuación polinómica de segundo grado que se ajusta razonablemente a la nube de puntos tiempo-profundidad. Generalmente las velocidades NMO son un 10-20% mayor que las reales, por lo que éstas se reducen en un 15%. Debido a que no se dispone de ningún sondeo de control que valide la conversión a profundidad realizada existe una incertidumbre en la profundidad real de los horizontes interpretados. Sin embargo, la tendencia general en la geometría de los horizontes interpretados se mantiene independientemente de la ley de velocidad adoptada y permiten interpretar la geometría de los estratos en el subsuelo. Los horizontes sísmicos interpretados en las líneas disponibles y transformados a profundidad se exportan a un archivo ASCII (x, y, z, formación). Este archivo se importará desde 3D Geomodeller para utilizarlo en la construcción del modelo geológico 3D.



**Figura 7.** Perfiles sísmicos SG-91 y RV-81 en formato digital SEG-Y convertidos a profundidad. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos. La posición de los perfiles se indica en la figura 5.

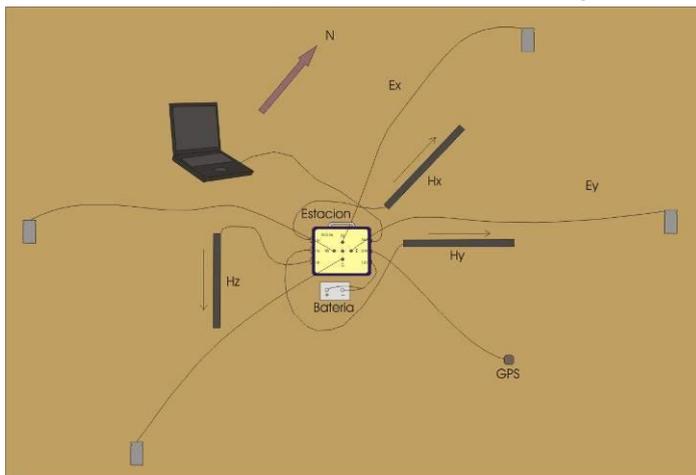
## Sondeos mecánicos

Los sondeos mecánicos suministrados por la DPA en una base de datos se incluyen en un archivo Excel con un total de 84 sondeos. Para importar esta información a *3D Geomodeller* se genera un archivo con las columnas x, y, z del inicio del sondeo, muro y nombre de formación. El campo muro es la profundidad a la que se corta una determinada formación. Algunos de los sondeos están interpretados a lo largo de toda su columna, sin embargo en la mayor parte de ellos sólo se describe parte de las formaciones cortadas. Algunas de las interpretaciones iniciales han sido modificadas en función de los datos cartográficos y de los resultados preliminares del modelo geológico 3D durante el proceso de construcción.

## Sondeos magnetotelúricos

Los sondeos magnetotelúricos (MT) son un método geofísico electromagnético para la exploración del subsuelo a partir de la medición de las variaciones naturales del campo eléctrico y magnético en la superficie de la Tierra. La profundidad de investigación de este método es mayor comparada con otros métodos electromagnéticos y alcanza varios miles de metros en función del tiempo de medida, frecuencias y ruido registrado. El método mide simultáneamente las componentes ortogonales de los campos eléctrico y magnético lo que permite calcular el tensor de impedancia. Con este tensor se puede obtener un modelo de resistividad del subsuelo. Debido a que las diferentes rocas, sedimentos y estructuras geológicas tienen unas conductividades eléctricas características, es posible interpretar la distribución de rocas del subsuelo a partir del perfil de resistividades obtenido. Las campañas MT en 2D consisten en sondeos MT más o menos equidistantes sobre perfiles con orientación preferentemente ortogonales a las estructuras de interés. Las limitaciones del método están relacionadas con la dificultad en la localización de emplazamientos idóneos de los sondeos en las que es conveniente que no haya redes eléctricas cercanas ni grandes vías de comunicación (ferrocarril, carreteras). Además, la existencia de materiales muy conductores en superficie limita la profundidad de investigación del método. Sin embargo, es una

técnica geofísica más económica que la sísmica, con una profundidad de penetración de varios kilómetros.



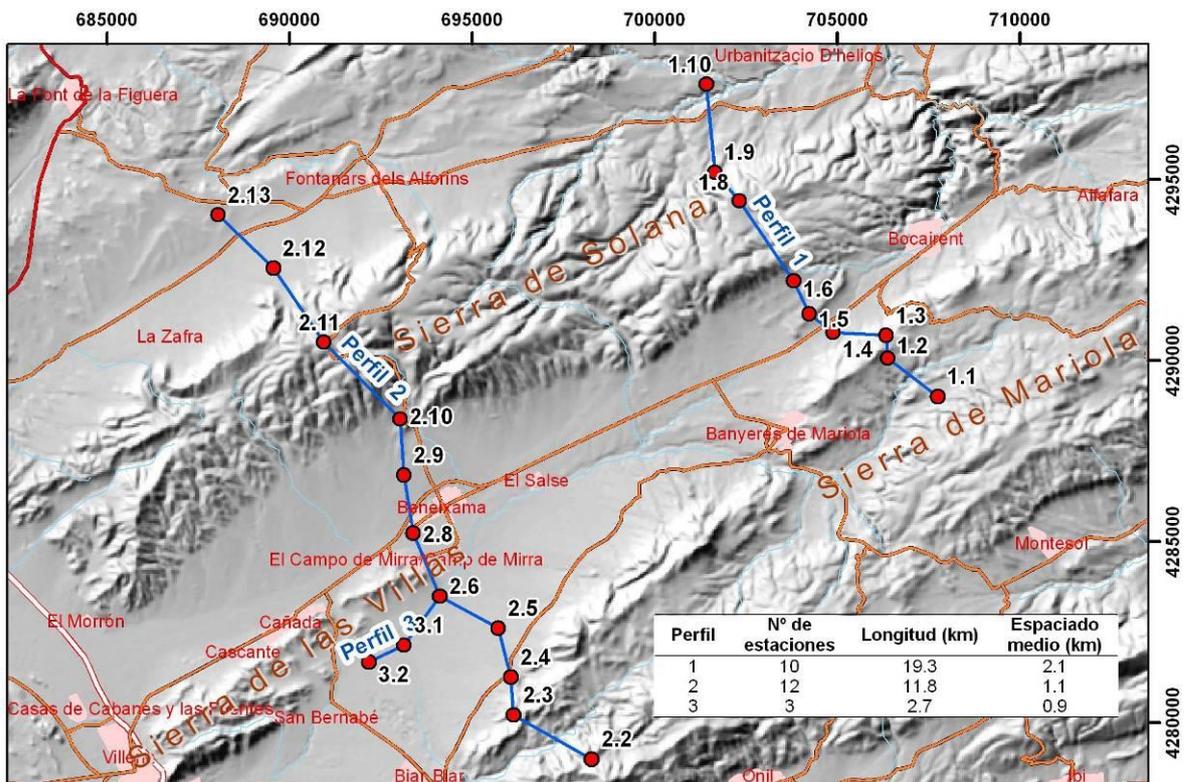
El equipo de prospección magnetotelúrica utilizado consiste en un instrumento de adquisición, dos sensores magnéticos (bobinas de inducción), cuatro electrodos, una batería, un GPS y un ordenador para descargar los datos adquiridos (figura 8).

**Figura 8.** Esquema de componentes de un equipo de prospección magnetotelúrica.

Para el procesamiento de los datos adquiridos es necesario realizar una inversión de las series en el dominio del tiempo a series en el dominio de la frecuencia. Los datos MT procesados se modelizan para generar cortes de resistividad, donde las bajas

frecuencias generalmente corresponden a profundidades mayores. Para la inversión de los datos MT se ha utilizado el programa *WinGlink*.

En el área de estudio se diseñó una campaña con dos perfiles de dirección NO-SE perpendiculares al anticlinal de Sierra de Solana (perfil 1 y 2) y un perfil pequeño longitudinal a la sinforma situada entre la Sierra de la Villa y Peñarubia (perfil 3 en figura 9). Con estos perfiles se pretendía investigar los límites Cretácico-Jurásico y Jurásico-Triásico suponiendo la presencia de conductores en ambos límites. La campaña de medida se llevó a cabo entre los días 20 y 27 de septiembre de 2012. Se utilizaron estaciones MT con dos canales eléctricos y dos magnéticos sin referencia remota salvo dos estaciones. En la campaña se emplearon 3 equipos Metronix ADU-07 y un equipo Phoenix V5 y un total de seis operadores de campo.

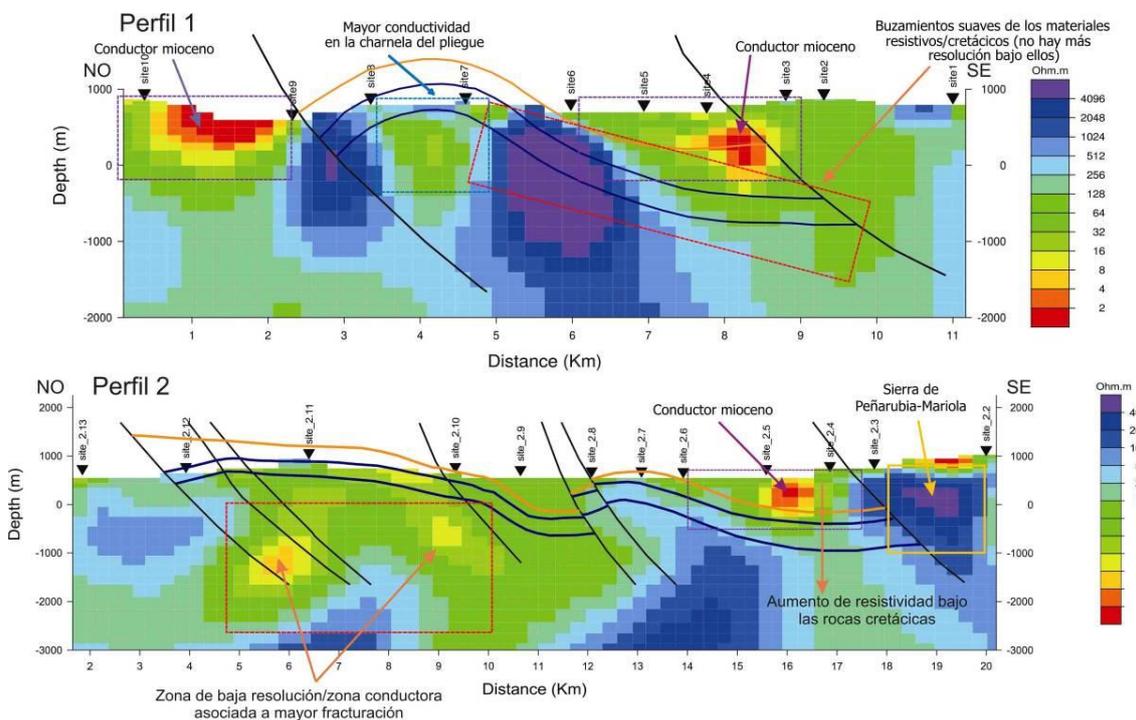


**Figura 9.** Distribución de los sondeos MT y de los perfiles de resistividad calculados.

De los modelos de resistividades obtenidos para los perfiles de MT se pueden obtener los siguientes resultados.

El perfil 1 tiene una profundidad máxima de resolución de 1000 a 2000 metros bajo el nivel del mar. En cualquier caso se observa la presencia de conductores miocenos en las cuencas situadas al norte de Sierra de Solana y entre Sierra de Solana y Sierra de Mariola (colores rojos-amarillos de la figura 10). La anomalía conductora situada al norte tiene una geometría claramente sinclinal, mientras que la anomalía conductora al sur muestra un incremento progresivo de la anomalía hacia el SE, sugiriendo buzamientos constantes y no muy elevados de los materiales resistivos mesozoicos (azul-violeta) situados bajo el Mioceno. Además la geometría de la anomalía parece indicar que la cuenca miocena está cobijada bajo los materiales mesozoicos de la Sierra de Mariola. La resolución por debajo de los 1000 metros bajo el nivel del mar se pierde debido a la presencia de ruido electromagnético en la zona. También se observa una menor resistividad en la zona de charnela del pliegue de Sierra de Solana, en comparación con la resistividad de los flancos.

El perfil 2 tiene una mayor profundidad de investigación y alcanza los 3000 metros bajo el nivel del mar. Sin embargo, el origen de las anomalías resistivas y conductoras observadas es más difícil de interpretar. Se observa de nuevo la anomalía conductora asociada a la cuenca miocena situada entre la Sierra de la Villa y la Sierra de Peñarubia-Mariola. Hacia el SE de esta anomalía existe una anomalía resistiva que puede relacionarse con los carbonatos cretácicos y jurásicos de la Sierra de Peñarubia-Mariola. La geometría de la anomalía se puede interpretar como un cabalgamiento vergente al NO de esta Sierra sobre el Mioceno. Superpuesta a esta anomalía resistiva existe una anomalía conductora de pequeño espesor que puede relacionarse con afloramientos miocenos cercanos a la estación 2.2. En la Sierra de Solana la resistividad modelizada en el perfil 2 es menor que en el perfil 1. Se observan pequeñas anomalías conductoras situadas a unos 1000 metros bajo el nivel del mar cerca de las fallas inversas, por lo que podrían estar asociadas a una mayor fracturación en estos sectores del perfil.



**Figura 10.** Modelos de resistividad para los perfiles 1 y 2 obtenidos a partir de la inversión de los sondeos magnetoteléuticos.

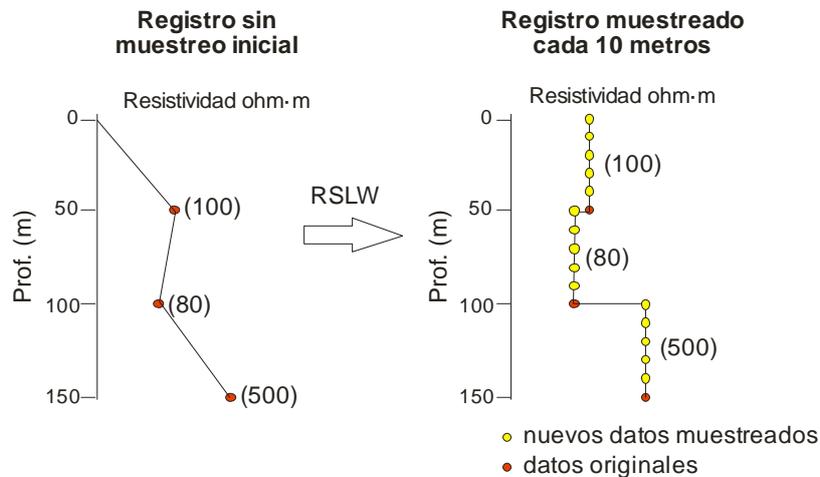
Como conclusión principal se puede decir que los modelos de resistividad obtenidos para los perfiles han tenido una resolución menor a la esperada, debido a la presencia de ruido como consecuencia de las numerosas líneas eléctricas que discurren por la zona investigada. Esto ha impedido invertir los perfiles a una mayor profundidad. Sin embargo se pueden obtener algunos resultados interesantes. En general se observan una vergencia noroeste de los pliegues y la geometría de las cuencas miocenas queda definida de forma grosera. Por otra parte, los resultados obtenidos no sugieren la presencia de pliegues con geometría en champiñón, como sugieren otros autores. Por el contrario, se observa un buzamiento moderado de los flancos largos de los pliegues.

### Sondeos eléctricos verticales

Los sondeos eléctricos verticales se han obtenido de la base de datos del IGME. Se han utilizado los archivos con extensión *.mdl* que muestran los modelos finales de resistividad-espesor de capas con el siguiente formato:

FIDATOS: I1 CORY: 4296995.00 CORX: 718917.00 CORZ:-9999.00  
 LAYER RESISTIVITY THICKNESS  
 1 1.00000E+01 2.50000E+00  
 2 2.60000E+00 1.60000E+01  
 3 6.00000E+00 2.01500E+02  
 4 1.80000E+01

Este archivo se transforma en con el programa *RSLW.exe* (aplicación desarrollada por el Instituto Geomodels-Universidad de Barcelona). El programa convierte el archivo original en un archivo con valores remuestreados para intervalos de profundidad establecidos (figura 11). De esta forma se obtiene una curva con valor constante en todo el intervalo de cada una de las capas. El archivo resultante se puede importar en *Gocad* y realizar las interpretaciones en cortes que se exportarán a *Geomodeller* (figura 12).



**Figura 11.** Transformación realizada en las curvas con el programa *RSLW.exe*.



**Figura 12.** Vista 3D de los SEV y el modelo de resistividades de cada sondeo con el programa *Gocad*.

### **Cartografía geológica y fotointerpretación**

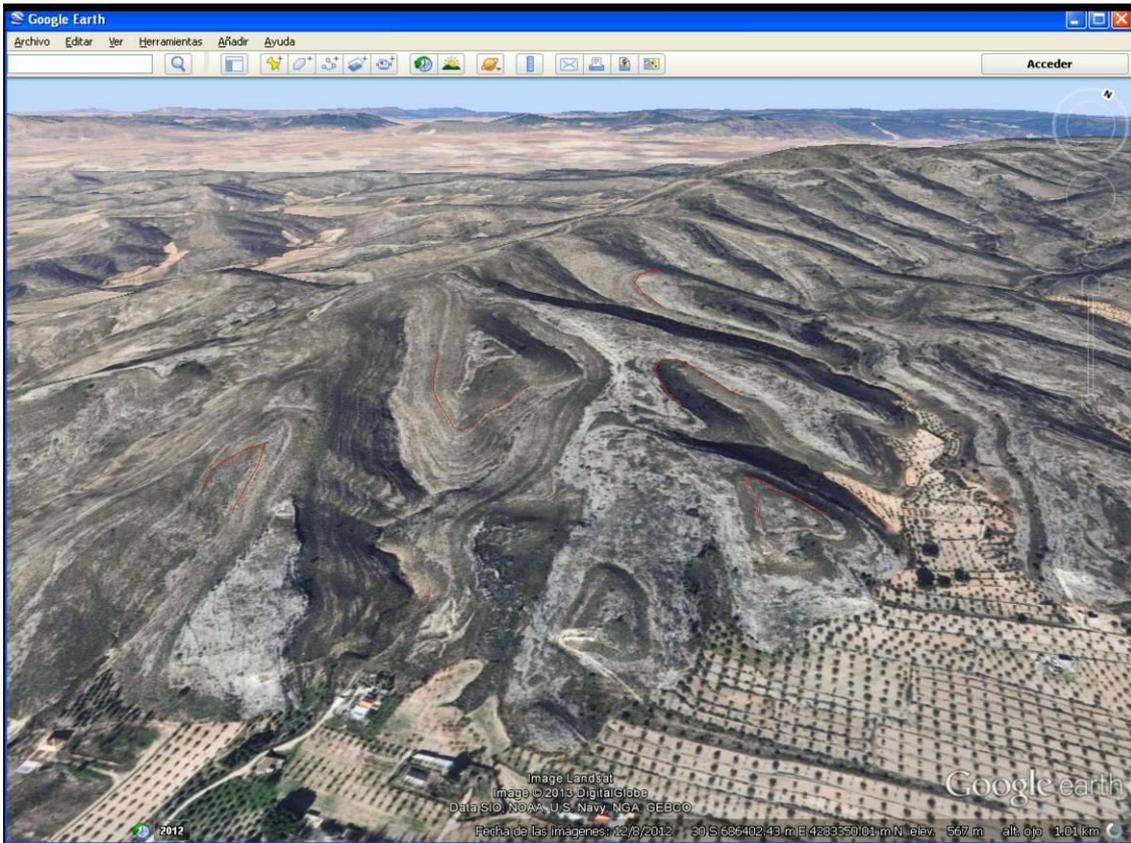
Otro de los datos de entrada al modelo 3D es la superficie topográfica. La superficie topográfica en *3D Geomodeller* es una sección especial sobre la que se proyectan los contactos y fallas cartográficas y los datos de orientación y buzamiento. Para este modelo se ha utilizado el modelo digital del terreno (MDT) del IGN con un valor de cota topográfica cada 10 metros. Para exportar el MDT al formato requerido por *3D Geomodeller* se ha utilizado el programa *Global Mapper*.

La cartografía geológica MAGNA del área estudiada se incorpora a *3D Geomodeller* como una imagen georeferenciada sobre la que se puede digitalizar los contactos y fallas. También se importan algunos contactos a *3D Geomodeller* directamente desde archivos *shapefile*.

Los cortes geológicos son datos fundamentales para la construcción de superficies en *3D Geomodeller*. Se han realizado un total de 9 cortes geológicos que integran la información cartográfica (contactos, fallas y buzamientos) y de sondeos. Para la realización de los cortes se utilizan las herramientas *CrossSectionTool* (Thoms, 2011) y *x\_section\_xacto\_v.1*, respectivamente que funcionan sobre *ArcGis*. Estas herramientas construyen un corte topográfico a partir del modelo digital del terreno. Los polígonos correspondientes a las formaciones geológicas del mapa se intersectan con el corte. Se proyectan desde una distancia definida perpendicular al corte los buzamientos aparentes. Finalmente se proyectan los sondeos situados a una determinada distancia. El resultado final consiste en un corte geológico en blanco con las anotaciones de la geología, buzamientos y sondeos. Sobre este corte se facilita la posterior interpretación geológica.

La mejora de los datos cartográficos de partida, requerida para un proyecto de reconstrucción 3D de calidad, se ha conseguido gracias a una importante labor de fotointerpretación. La superposición de las ortofotografías digitales a color junto con otras capas de información (cartografía geológica previa) sobre un modelo digital del terreno, permite interpretar y digitalizar los contactos geológicos en un entorno 3D. Este proceso se ha realizado con el programa *Google Earth*. Para ello, se importado un archivo *kml* con la información geográfica vectorial de la cartografía previa. Con la vista tridimensional de *Google Earth* (figura 13) se puede digitalizar directamente sobre el relieve con la herramienta *añade una ruta*. Los contactos digitalizados se guardan en un archivo *kml* que contiene polilíneas 3D que posteriormente se exportan a un formato *shapefile* mediante el programa *ArcGis*. El archivo *shapefile* que contiene los nuevos contactos estratigráficos y fallas digitalizadas son importados en *3D Geomodeller*.

En el proceso de fotointerpretación con *Google Earth* también se visualizan las superficies de estratificación. Al digitalizar estas superficies se obtienen polilíneas 3D que se corresponde con la intersección de la estratificación con la topografía y que están directamente relacionadas con la dirección y buzamiento de la estratificación (figura 13). Las líneas 3D se importan al programa *Gocad* y se obtienen los planos de estratificación que se ajustan a estas líneas. Mediante este procedimiento se obtienen 80 nuevos datos de dirección y buzamiento adicionales a los datos indicados en los mapas geológicos previos. El conjunto de datos de buzamiento se importan en *3D Geomodeller* como datos de entrada que condicionarán la geometría de las superficies modelizadas.



**Figura 13.** Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Solana.

Una vez importados todos los datos de subsuelo y superficie (interpretación de perfiles sísmicos, sondeos, superficie topográfica, contactos litológicos y fallas, cortes geológicos y buzamientos), el algoritmo matemático de cokriging de *3D Geomodeller* construye un modelo geométrico 3D de las superficies que limitan las unidades geológicas del acuífero de Solana-Volcadores-Onteniente.

### **Modelización gravimétrica 3D**

Los mapas de anomalías gravimétricas proporcionan una importante información geológica y estructural. La anomalía de Bouguer es la diferencia entre el valor de gravedad medido y el valor teórico. Esta diferencia es consecuencia de variaciones en el valor de la densidad de las rocas del subsuelo. La modelización gravimétrica de estas anomalías permite obtener un modelo geológico que se ajusta a estas anomalías, siendo una herramienta de gran interés para el estudio del subsuelo. En este trabajo se ensaya la inversión gravimétrica 3D utilizando el programa *3D Geomodeller*.

Los datos gravimétricos utilizados para la modelización gravimétrica proceden de la base de datos del IGME, que se puede consultar en SIGECO (<http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htmreferencia>). Las estaciones gravimétricas que se encuentran dentro del área modelizada son 883 estaciones, lo que supone una densidad de 1.2 estaciones por km<sup>2</sup>.

La anomalía de Bouguer (figura 14a) y la corrección topográfica están calculadas para una densidad de reducción de 2.6 kg/m<sup>3</sup> para el sistema geodésico de referencia

GRS80 con alturas ortométricas. Para la confección del mapa de anomalía de Bouguer se ha utilizado el algoritmo de Mínima Curvatura con un paso de malla de 800 m.

La fuerte anomalía regional de Bouguer (figura14b) en el área de estudio es consecuencia del adelgazamiento de la corteza continental hacia el NE. El cálculo de la anomalía regional se ha obtenido mediante el ajuste de la anomalía de Bouguer a una superficie polinómica de segundo grado. La anomalía residual (figura 14c), es decir la anomalía de Bouguer menos la anomalía regional, representa el efecto de las diferencias de densidad y cambios de espesor de las formaciones más superficiales desde el Triásico situado a unos 2500-3000 m de profundidad al Neógeno que aflora en superficie.

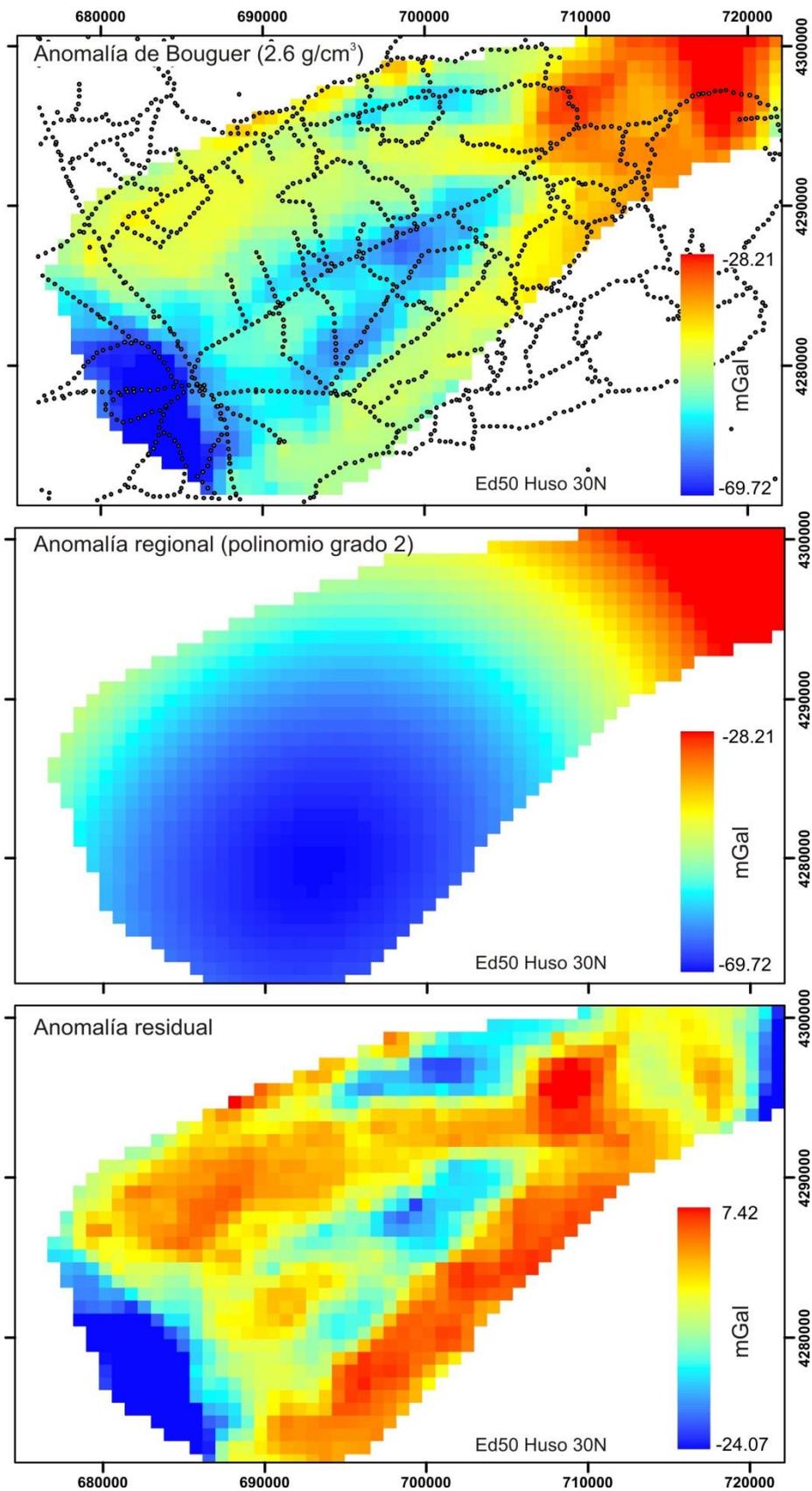
Para la modelización gravimétrica es necesario asignar a cada formación un valor de densidad media. La campaña de adquisición de muestras realizada en el área de estudio ha permitido obtener, en los laboratorios del IGME, datos de densidad (peso específico aparente) entre otros parámetros petrofísicos como porosidad y la susceptibilidad magnética. Para aquellas formaciones como el paleozoico, triásico, jurásico y cretácico inferior en las que no se ha podido muestrear, se les ha asignado una densidad media acorde con la litología predominante y con los valores utilizados en otros estudios con formaciones similares. En la tabla 3 se muestran los valores de densidad y de desviación típica utilizados para la modelización gravimétrica.

<b>Formaciones</b>	<b>Densidad g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Desviación típica g/cm<sup>3</sup></b>
Neógeno y Paleógeno	2.35	0.05
C4 (Senonense)	2.55	0.10
C3 (Turonense)	2.66	0.08
C2 (Cenomaniense)	2.60	0.06
C1 (Cenomaniense)	2.64	0.06
Cretácico inferior	2.65	0.08
Jurásico	2.65	0.08
Arcillas triásicas diapíricas	2.35	0.05
Triásico	2.45	0.10
Paleozoico	2.62	0.00

Tabla 3. Valores de densidad y desviación típica utilizados en la modelización gravimétrica 3D.

Una vez definida la anomalía residual y la densidad de las formaciones se procede a la modelización gravimétrica. Para ello 3D Geomodeller utiliza la siguiente secuencia: 1- construcción del modelo geológico, 2- resolución de problema directo (*forward modelling*) y 3- inversión 3D.

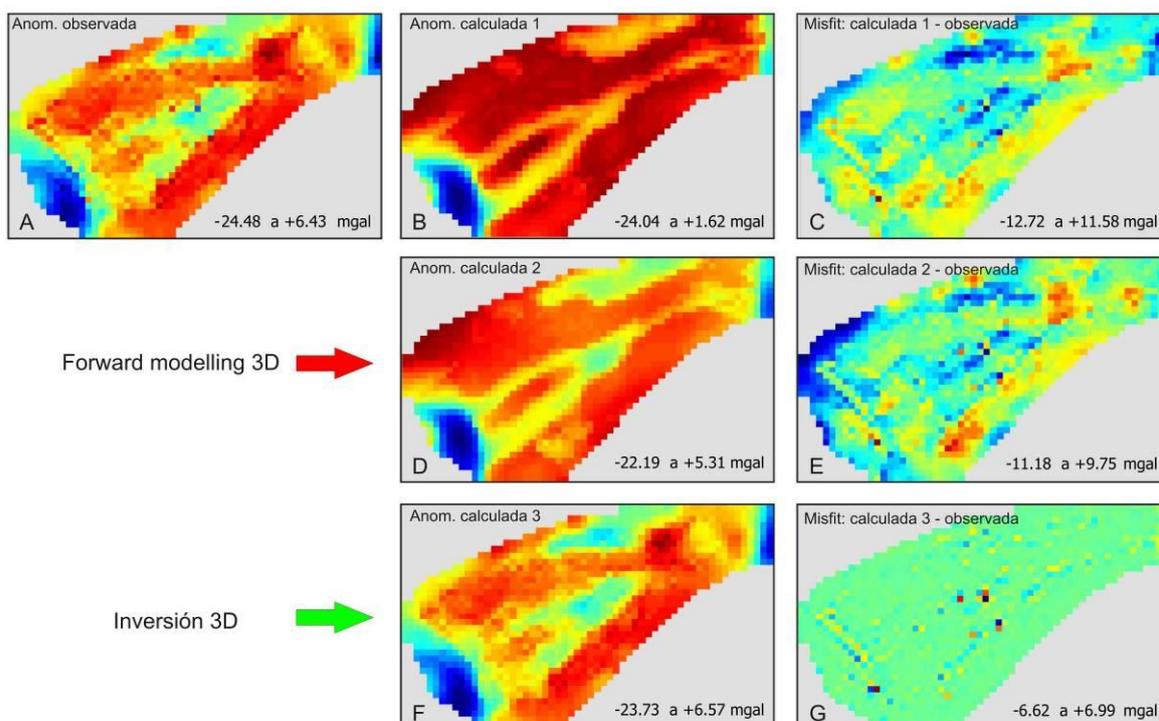
El primer paso consiste en la construcción del modelo geológico a partir de la incorporación de todos los datos de superficie y subsuelo (contactos geológicos, orientación y buzamiento de las capas y fallas, cortes geológicos, columna estratigráfica, etc.). El proceso de incorporación de diferentes tipos de datos se ha descrito en párrafos anteriores.



**Figura 14.** a) Mapa de anomalía de Bouguer a densidad  $2.6 \text{ g/cm}^3$ . Con puntos negros se representan las estaciones gravimétricas; b) Mapa de Anomalia regional procedente del ajuste de la superficie polinómica de grado 2; c) Mapa residual de anomalías de Bouguer, procedente de la sustracción de la anomalía regional a la anomalía de Bouguer. Para los tres mapas la escala está en mGal y las coordenadas en UTM (ED50) huso 30 N.

El segundo paso es la modelización directa o *forward modelling*, donde se calcula la respuesta gravimétrica que el modelo geológico proporciona y se observa las diferencias entre la anomalía observada y calculada (figura 15). Mientras que el rango de valores de la anomalía residual observada es de -24 a +6 mGal, la anomalía calculada está entre -24 y +2 mGal. La figura 15 muestra la diferencia entre la anomalía calculada y la observada con valores entre -13 a +11 mGal. Aunque los máximos y mínimos gravimétricos coinciden grosso modo, la intensidad de la anomalía en las zonas de anticlinal y sinclinal difieren bastante.

Para minimizar estas diferencias, el modelo geológico inicial se ha ido modificando mediante ensayo y error (cálculo directo) hasta que la anomalía calculada ha alcanzado un aspecto similar a la anomalía observada en cuanto a amplitud y forma (figura 15). De este modo se llega al modelo previo a la inversión, como se muestra en la figura 15. Para llegar a este modelo las modificaciones más relevantes han sido la geometría del jurásico y triásico y el aumento o disminución del espesor de los sedimentos neógenos, en las zonas en las que se requería aumentar o disminuir respectivamente el déficit de masa.



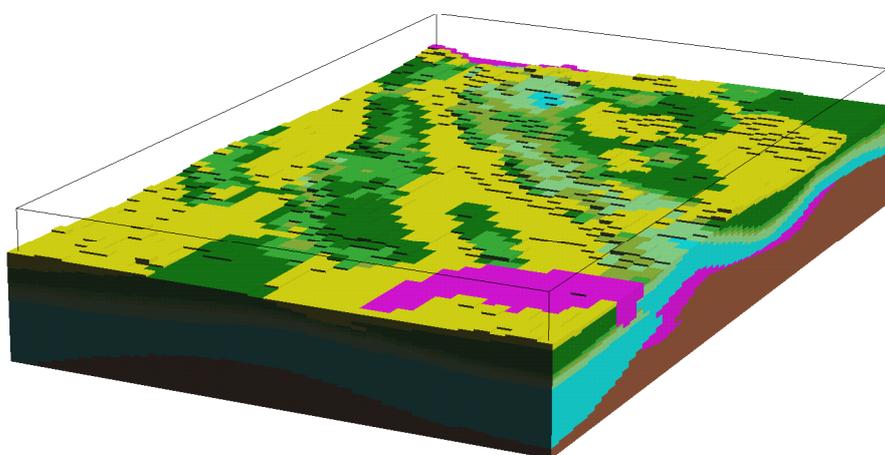
**Figura 15.** Resultados de las anomalías calculadas y misfit con el *Forward modelling 3D* y la *Inversión 3D*. A) Anomalía residual observada a partir de las estaciones de campo tras restar la anomalía regional a la anomalía de Bouguer (figura 14); B) Anomalía residual teórica calculada a partir del modelo geológico 3D inicial y las densidades de la tabla 3; C) Diferencia entre la anomalía A y B; D) Anomalía teórica residual del modelo geológico 3D ligeramente modificado para obtener un mejor encaje (*forward modelling*); E) Diferencia entre la anomalía A y D; F) Anomalías residual teórica obtenida a partir de la inversión 3D en el que se modifica iterativamente el modelo 3D y las densidades; G) Diferencia entre la anomalía A y F.

Por último, el tercer paso consiste en la inversión 3D. Una vez el modelo está validado dentro del esquema del *forward modelling* (es decir, la anomalía calculada tiene una apariencia similar a la anomalía observada), se procede a la inversión gravimétrica de la anomalía residual. El programa va efectuando de manera automática ajustes en el modelo para minimizar la diferencia entre la anomalía observada y calculada. El

programa *3D Geomodeller* emplea un cálculo estadístico basado en el método de Monte Carlo, con lo que se obtiene un rango de modelos con su probabilidad correspondiente, eligiéndose el más consistente con las observaciones y datos geológicos y geofísicos disponibles. Se ha dejado libertad para que durante la inversión varíen tanto las densidades dentro de los límites de la desviación típica especificados como, por supuesto, los límites litológicos. En la figura 15 se representa la anomalía observada inicial y la calculada tras realizar de forma automática cambios en la geometría del modelo. Tras la inversión, el rango de la anomalía calculada y observada y la distribución de la anomalía es muy parecida (figura 15). La diferencia entre las dos anomalías o *misfit* varía entre -6.6 a +6.9 y las diferencias máximas y mínimas están distribuidas de forma aleatoria lo que indica un buen ajuste de la inversión.

El resultado de la inversión gravimétrica 3D es un nuevo modelo geológico 3D cuya respuesta gravimétrica se ajusta a la observada en campo. Este nuevo modelo tiene un formato de malla 3D (figura16). Las modificaciones más significativas realizadas al modelo inicial se pueden resumir en un aumento del espesor de triásico en el núcleo de los anticlinales, en algunos sectores del modelo como en la Sierra de la Villa, que podría ser explicado debido a la actividad diapírica de las arcillas y yesos durante la nucleación de los pliegues. La aplicación de esta metodología ha permitido mejorar la definición geométrica 3D y los espesores del Jurásico y Triásico que no llegan a aflorar en el área de estudio. Por otra parte, se ha podido definir la geometría del diapiro de Villena en el sector estudiado. También se puede observar una fuerte anomalía negativa en el sector noroeste del área de estudio, entre Concentaina y Muro de Alcoy que ha sido interpretada en la inversión como un diapiro bajo los sedimentos cuaternarios y neógenos del valle del Río Serpis. El espesor medio obtenido para el Jurásico es de 990 m y el del Triásico, si se exceptúa el diapiro de Villena, de 920 metros. El techo del Jurásico se encuentra a una profundidad media de -750 m.s.n.m. y el muro a unos -1780 m.s.n.m. La profundidad media del muro de Triásico se encuentra a -2700 m.s.n.m.

Una vez que se tiene un modelo geológico 3D mejorado de las unidades jurásica y triásica se pueden volver a interpretar los perfiles sísmicos a nivel de los horizontes sísmicos más profundos. Para ello se importan las superficies del Triásico y el Jurásico al programa Kingdom Suite SMT y se correlacionan los reflectores con las superficies. La nueva interpretación de los reflectores profundos se importa de nuevo a *3D Geomodeller* para generar un nuevo modelo 3D mejorado.



**Figura 16.** Modelo voxet de salida de la inversión 3D en *Geomodeller*. Cada celda tiene un atributo litológico.

## **Edición en Gocad**

Las superficies geológicas 3D construidas, se exportan en formato *Tsurf* al programa *Gocad*. En *Gocad* se editan estas superficies para mejorarlas debido a que:

- Las superficies de las formaciones que genera 3D Geomodeller continúan a lo largo de las fallas al intersectar con ellas. En *Gocad*, habrá que recortar estas superficies en las zonas de intersección con las fallas.
- La triangulación de las superficies que realiza 3D Geomodeller es deficiente con la formación de triángulos muy isósceles. Al importarlas a *Gocad* es necesario realizar una mejora de los triángulos para una mejor edición de la superficie.

Una vez editadas las superficies, es necesario realizar cálculos volumétricos para la estimación de las reservas del acuífero. Para ello en *Gocad*, se genera un *stratigraphic grid*. El *stratigraphic grid* en *Gocad* es una malla 3D regular que puede ser deformada y cortada por fallas para ajustarla a un modelo estructural de superficies.

## **3.2 Caracterización del sistema poroso**

Para la caracterización del sistema poroso de las formaciones permeables del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores se ha realizado un estudio petrográfico y se ha calculado la porosidad de 40 muestras recogidas en campo. De cada una de las muestras se ha preparado una lámina delgada y una probeta para la determinación de la porosidad abierta mediante ensayos de inmersión en agua en cámara de vacío. La situación de los puntos de muestreo se detalla en la figura 5. Su ubicación exacta se adjunta en el Anexo II de esta Memoria.

Para el cálculo del volumen de reservas de agua en este trabajo se asume que en la matriz de la roca se concentra la práctica totalidad del almacenamiento del acuífero. Este hecho es evidente en los acuíferos detríticos y, según la literatura más actual, también lo es en los acuíferos de naturaleza carbonática (calizas y dolomías). En este sentido, las investigaciones más recientes ponen de manifiesto que las fracturas y los conductos kársticos proveen un escaso porcentaje de capacidad de almacenamiento total de los acuíferos (Ahr 2008, Nelson 2001, Worthington 2007, Worthington et al. 2000). Esta misma asunción se mantiene en los cálculos de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en reservorios de formaciones carbonáticas (Bachu 2008, Eisinger and Jensen 2011) y en los proyectos Almacenamiento Subterráneo y Recuperación (ASR) (Herrmann et al. 2004, Lowry and Anderson 2006, Vacher et al. 2006) en este tipo de materiales.

Se entiende por porosidad abierta ( $p_0$ ), interconectada o efectiva, el volumen de poros que presentan cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. Por el contrario, la porosidad cerrada es aquel volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de conexión con el exterior. Por último, la porosidad total es la suma de la porosidad conectada y la no conectada (Dullien, 1992).

### 3.2.1 Estudio petrográfico

Se ha realizado un estudio petrográfico de las muestra recogidas en los afloramientos carbonáticos del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores, con objeto de establecer la correlación entre la fábrica de las rocas carbonáticas y sus propiedades físicas (Dürrast y Siegesmund, 1999). Se han identificado los principales elementos texturales y se han clasificado las muestras según los esquemas propuestos por Dunham (1962), Folk (1959, 1962) y Lucia (1995). Asimismo, se ha caracterizado la morfología y el tamaño de los poros, y la existencia y distribución de fisuras en las muestras estudiadas.

Para el estudio petrográfico se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada. La microscopía óptica de polarización es un método indicado para vacíos superiores a 10  $\mu\text{m}$  (la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5  $\mu\text{m}$ ). Por tanto, es importante destacar la reducida capacidad de resolución de esta técnica para poros con diámetro inferior a 1  $\mu\text{m}$ . Las observaciones se han realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión de acuerdo con la naturaleza y la preparación de las muestras.

### 3.2.2 Porosidad abierta

Los ensayos para determinar la porosidad interconectada ( $p_0$ ) en las 40 muestras indicadas han sido realizados en el laboratorio del IGME de Tres Cantos (Madrid), siguiendo el procedimiento UNE-EN 1936: 2007 (PTE-ET-041 E.8). En esencia, consiste en el procedimiento descrito por Borczak et al. (1990). Una vez preparadas las muestras en cubos y con unas dimensiones de unos 4 a 6 cm de lado, se procede a su secado en estufa a 105-110°C durante 24 horas. Posteriormente, se introducen en una cámara de vacío y se llenan de agua a presión atmosférica y a temperatura ambiente hasta que su peso permanezca constante. De esta forma la porosidad interconectada ( $p_0$ ) es evaluada usando la siguiente expresión (Borczak et al., 1990):

$$p_0 = \frac{G_n - G_s}{G_n - G_{nw}}$$

donde,  $G_n$  es el peso de la muestra saturada con agua,  $G_s$  es el peso de la muestra seca a 105-108°C,  $G_{nw}$  es el peso de la muestra saturada en agua y pesada en agua (balanza hidrostática), aplicando el principio de Arquímedes.

### 3.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas

El procedimiento empleado para el cálculo de las reservas totales ha requerido de la determinación de los volúmenes saturados de formaciones acuíferas, entre la superficie piezométrica, situada a distintas cotas, y el techo y muro de cada formación diferenciada en el modelo 3D. También es necesario conocer la porosidad abierta y el coeficiente de almacenamiento elásticos de las formaciones acuíferas.

Una vez calculado el modelo geológico 3D del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores se procede a la construcción de un *statiographic grid*, objeto de Gocad que consiste en una malla 3D deformada y ajustada a las superficies que limitan las formaciones (techo, muro y fallas o discordancias erosivas). La malla 3D puede ser cortada por la superficie piezométrica a diferentes cotas y de esta forma calcular el

volumen de roca saturada. También se puede calcular el volumen de roca confinante del acuífero para cada superficie piezométrica.

De esta forma se han calculado las curvas de reservas subterráneas que resultan de aplicar porosidades abiertas que corresponden a los percentiles 25 y 75 de las muestras recogidas en campo (Anexos II y III) y los correspondientes coeficientes de almacenamiento elástico de cada una de las formaciones cretácicas consideradas. Por curva de reserva se entiende aquella función que expresa el volumen de reservas de un acuífero por debajo de una cota determinada (López-Geta, 2004).

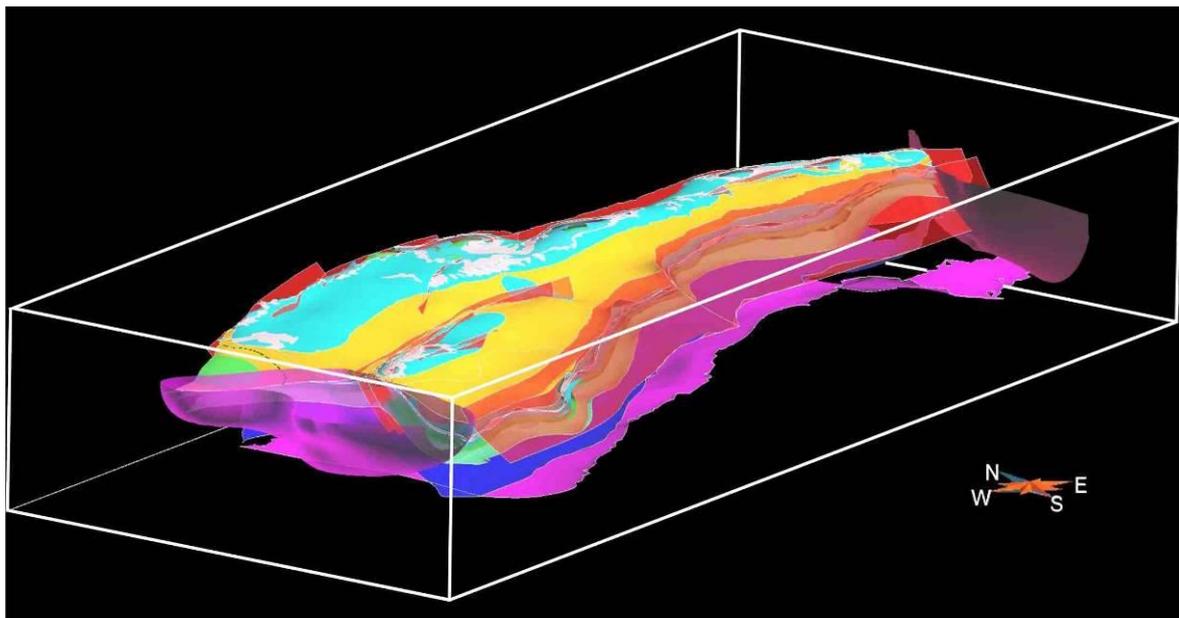
Las reservas máximas se han calculado considerando los volúmenes comprendidos entre la superficie piezométrica más alta, obtenida a partir del modelo de flujo calibrado en régimen permanente (DPA-IGME, 2006; DPA, 2010) y el techo y el muro de las formaciones acuíferas modelizadas, lo que ha permitido estimar qué parte del acuífero presentaba un comportamiento confinado y qué parte presentaba carácter libre. A petición de los técnicos de la DPA, las reservas totales han sido calculadas en el acuífero de Solana, según la delimitación realizada por la DPA en el Mapa Provincial del Agua (DPA, 2007).



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Modelización 3D

El modelo geológico 3D del acuífero Solana-Volcadores-Onteniente se ha construido a partir de la integración de datos de superficie y subsuelo disponibles (tabla 2) y con la metodología expuesta en el apartado 3.1. El modelo 3D final está formado por 9 unidades o formaciones geológicas, limitadas a techo y muro por superficies estratigráficas y lateralmente por fallas y diapiros triásicos.



**Figura 17.** Vista 3D del Modelo geológico 3D del Acuífero de Solana-Volcadores-Onteniente.

Las formaciones geológicas modelizadas son las siguientes:

- Unidad Neógena
- Unidad Paleógena
- Unidad C4 (Senonense) - Acuífero
- Unidad C3 (Turoniense) . Acuífero
- Unidad C2 (Cenomaniense sup.) . Acuitardo
- Unidad C1 (Cenomaniense inferior-medio) . Acuífero
- Unidad Cretácico inferior
- Unidad Jurásica
- Unidad Triásica

El modelo geológico 3D está limitado al noroeste por el cabalgamiento frontal de la Sierra de Solana sobre el sinclinal Fontaneres-Onteniente. El límite sureste corresponde al cabalgamiento de Peñarubia y Sierra de Mariola sobre el sinforme de Villena-Bocairente. El límite suroeste estaría definido por el diapiro del Vinalopó o de Villena y el límite noreste por un posible diapiro de dirección N-S que pasaría por las poblaciones de Muro de Alcoy y Concentaina y que ha sido definido por la modelización gravimétrica 3D.

La fiabilidad del modelo obtenido depende en gran medida del número de datos utilizados y su distribución espacial. De esta manera, en aquellas regiones y unidades

geológicas donde existan más datos, la semejanza del modelo con la realidad será mayor y más fiable, mientras que en las áreas donde no existan suficientes datos, el modelo estará más ligado a la interpretación del modelizador. En la figura 5 se mostró la distribución espacial en planta de los datos utilizados para construir el modelo geológico.

En la tabla 4 se muestran los diferentes tipos de datos utilizados para cada una de las unidades modelizadas. Mientras que algunas unidades como el Neógeno están interpretadas a partir de información de superficie, sondeos, SEVs y sísmica, otras como el Jurásico y el Cretácico únicamente están interpretadas a partir de datos gravimétricos y sísmicos.

Unidades modelizadas	Nuevos buzam. adquiridos	Nuevos contactos cartograf.	Número de sondeos que perforan la unidad	Horizontes sísmicos interpretados	Interpr. SEV	Interpr. MT	Interpr. Grav.
Neógeno	Si	Si	45	SI	SI	SI	SI
Paleógeno	Si	No	?	SI	?	NO	NO
C4	Si	Si	40	SI	SI	NO	SI
C3	Si	Si	21	NO	NO	NO	SI
C2	Si	Si	14	NO	NO	NO	SI
C1	No	Si	11	NO	NO	NO	SI
Cretácico inferior	No	No	6	SI	NO	NO	SI
Jurásico	No	No	0	SI	NO	NO	SI
Triásico	No	No	0	SI	NO	NO	SI

Tabla 4. Datos incorporados al modelo 3D para cada unidad modelizada.

A continuación se describen las características geométricas de cada una de las unidades modelizadas. Para cada unidad geológica modelizada se ha generado un mapa de isobatas del muro o techo de la unidad. En la figura 18 se muestran cortes geológicos realizados al modelo 3D.

### **Unidad Neógena**

Esta unidad incluye a sedimentos neógenos y cuaternarios que afloran a lo largo de los valles de Benejama, Biar y Agrés. Encima de estos sedimentos se desarrolla una formación cuaternaria de potencia reducida.

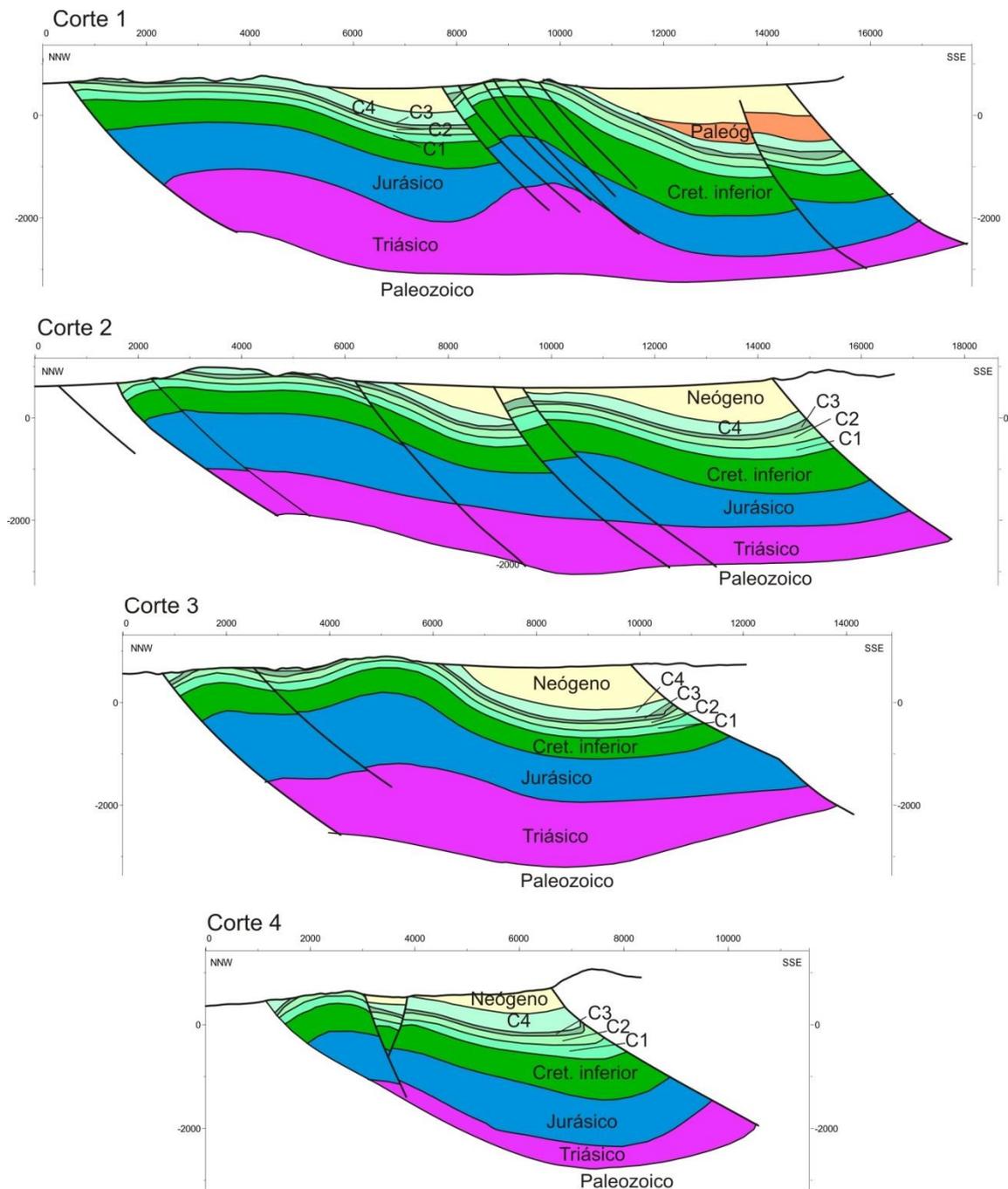
La unidad se encuentra discordante sobre el Senoniense o el Turoniense infrayacente. La geometría de esta unidad es la de un sinforme de dirección N60E que se ramifica en dos sinclinales hacia el suroeste. La vergencia de los sinclinales es noroeste. El buzamiento de los flancos SE de la sinforma se sitúa entre 15° y 30°.

La profundidad de esta unidad se puede observar en el mapa de isobatas del muro de la unidad (figura 19). Las máximas profundidades se encuentran, en los ejes sinclinales entre las sierras de La Villa y Peñarubia. Sierra de Mariola, con profundidades medias de -150 metros sobre el nivel del mar.

Al estar esta unidad erosionada, presenta espesores variables siendo mayores en los ejes de los sinclinales y bajo las fallas inversas que las cobijan. La potencia media en los ejes de los sinclinales para esta unidad es de unos 650 metros. La máxima potencia de esta unidad estaría situada entre la terminación periclinal NE del pliegue de la Sierra de la Villa situado al oeste de Banyeres de Mariola y alcanza un espesor de 970 metros. En el sector de Bocairant donde el afloramiento de esta unidad es más

estrecho, el máximo espesor alcanzado es de unos 400 metros. Finalmente entre el sector de Alfafara y Agrés la potencia alcanza los 800 metros.

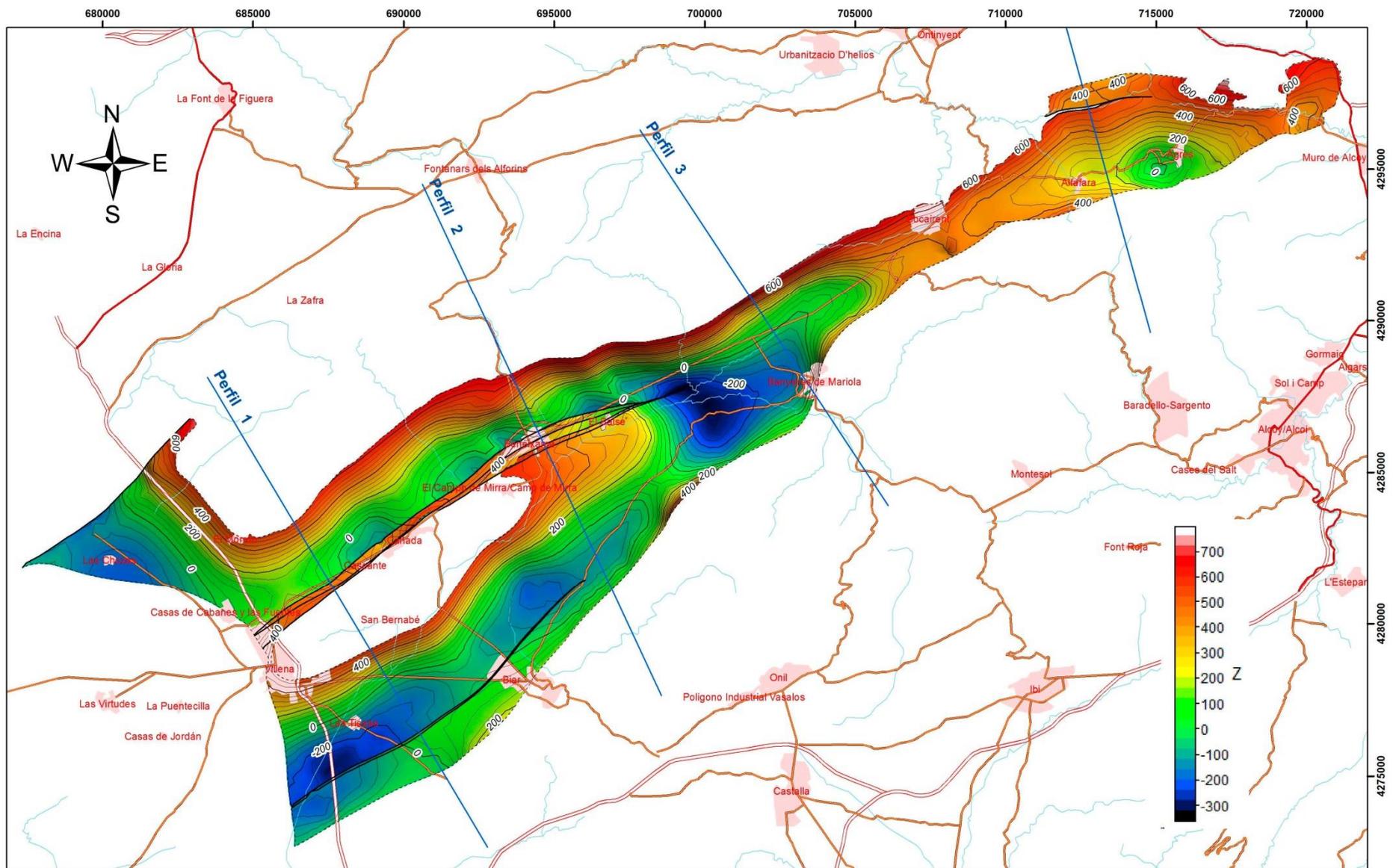
Esta unidad se ha modelizado a partir de diversos tipos de datos. Los modelos de resistividad de los sondeos eléctricos verticales muestran generalmente para la última capa interpretada un aumento repentino de la resistividad que puede ser interpretada debido a la presencia de las calizas senonenses infrayacentes, aunque no se puede descartar que el aumento de la resistividad esté relacionada con calizas o calcarenitas resistivas miocenas. Cuando no existen sondeos mecánicos que corten la base de la unidad, los SEVs son una fuente de información importante.



**Figura 18.** Cortes geológicos realizados al modelo 3D generado en el proyecto. La posición de los cortes se muestra en la figura 19.

Por otra parte, las líneas sísmicas han permitido interpretar la posición de la base de esta unidad a partir de la continuación desde superficie del reflector que llega a aflorar.

Los perfiles de resistividad obtenidos a partir de la campaña de sondeos magnetotelúricos, si bien no han podido determinar la posición de la base de esta unidad, si aportan información de la geometría general de la unidad de comportamiento conductor. Por otra parte, la inversión gravimétrica ha permitido modificar ligeramente el espesor de la unidad en algunos sectores. Un total de 23 sondeos cortan la base de la unidad o no llegan a perforarla en su totalidad. Por último, la posición del afloramiento de esta unidad con las rocas cretácicas infrayacentes se ha modificado ligeramente a partir de la fotointerpretación.



**Figura 19.** Mapa de isobatas del muro de la unidad Neógena. Localización de los cortes de la figura 18 del modelo 3D.

La mayor incertidumbre en la geometría de esta unidad se localiza en el sector oriental debido a que no existen sondeos que corten la base de la unidad y por otra parte hay un menor número de SEVs.

### **Unidad Paleógena**

Los sedimentos paleógenos no afloran dentro de los límites del modelo 3D. Sin embargo, en el límite suroeste del modelo aflora una serie paleógena de unos 500 metros de espesor en los relieves de Peñarubia. Esta región forma parte de la franja anómala definida por Martínez del Olmo (1982). La línea sísmica RV-81 muestra la presencia de unas facies sísmicas muy reflectivas bajo el relleno mioceno del sinclinal situado al SE de la Sierra de la Villa y que se asemejan a las facies sísmicas correspondientes a las calizas y dolomías eocenas que afloran en el sector de Peñarubia. A partir de esta interpretación sísmica se ha construido una superficie del techo del paleógeno, sin embargo esta hipótesis debería ser verificada mediante sondeos.

Las máximas profundidades alcanzadas por esta unidad están entre los -500 y -800 m.s.n.m. y la potencia máxima en el eje del sinclinal es de unos 300 metros. La geometría de esta unidad muestra una disminución del espesor hacia el NO donde terminan los reflectores en *onlap* sobre los horizontes sísmicos cretácicos que buzcan hacia el SE. Esta unidad parece estar cortada por una falla inversa ciega de dirección SO-NE.

### **Unidades del Cretácico Superior (C4, C3, C2 y C1)**

Las unidades del Cretácico Superior formadas principalmente por dolomías y calizas constituyen el acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores. Estas unidades han sido denominadas en el modelo geológico 3D como C4, C3, C2 y C1 (ver apartado de 2.1.2) siguiendo la nomenclatura utilizada en el trabajo de DPA-IGME (2003b). Las unidades C4, C3 y C2 afloran ampliamente en la Sierra de Solana y Sierra de la Villa y en menor medida la unidad C1.

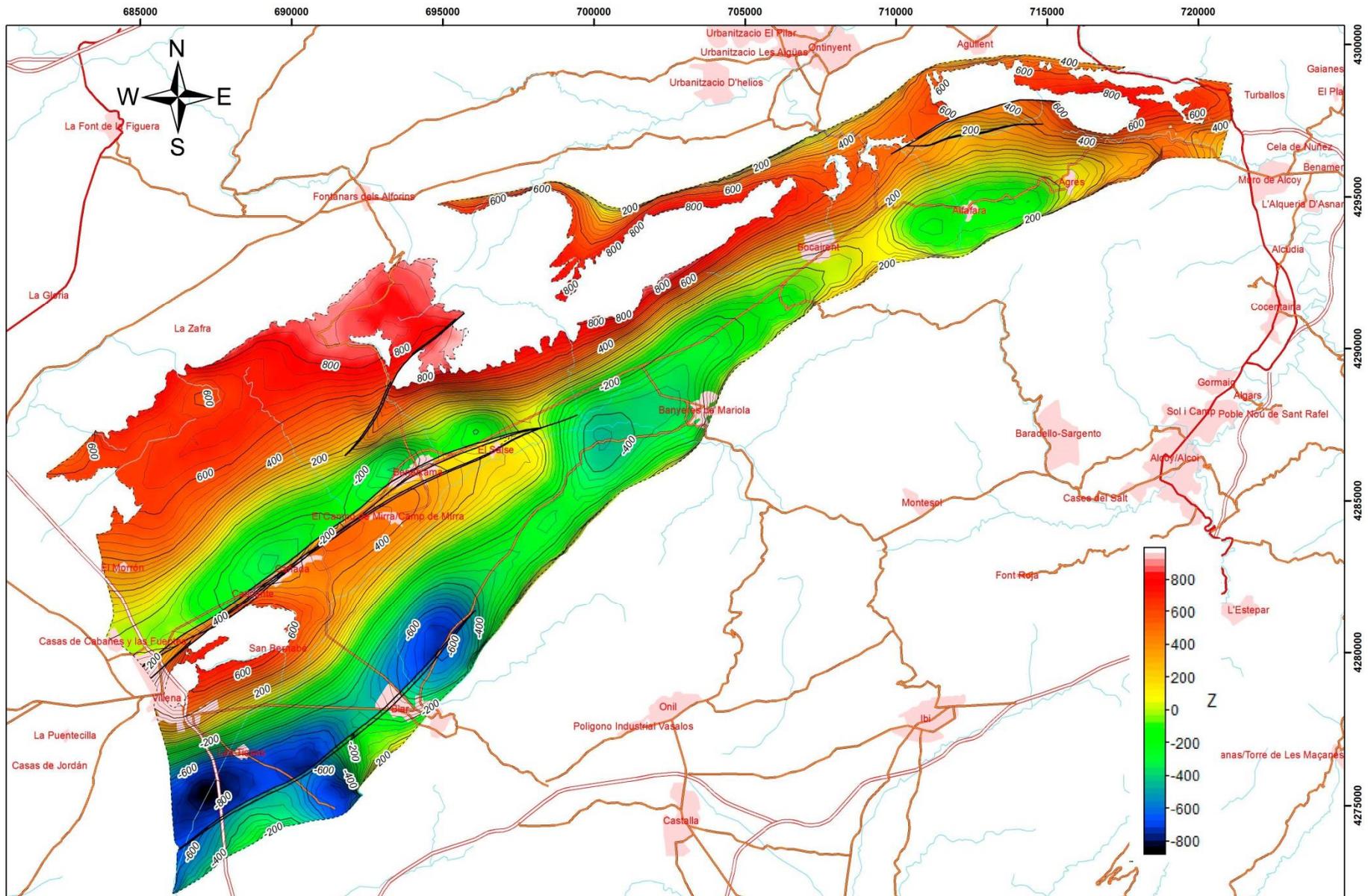
Los espesores medios obtenidos en el modelo 3D para las unidades C4, C3, C2 y C1 son respectivamente de 250, 70, 135 y 170 metros. Los mapas de profundidad del muro de estas unidades se representan en las figuras 20, 21, 22 y 23.

La geometría general de las unidades del Cretácico superior es la de pliegues suaves vergentes al NO y fallados en el frente del flanco NO del anticlinal por fallas inversas. Las charnelas de los anticlinales se corresponden con las alineaciones montañosas de la Sierra de Solana y Sierra de la Villa y permiten aflorar a las rocas cretácicas, mientras que en las zonas de sinclinal se produce el depósito de las cuencas neógenas. El flanco que buza hacia el NO en Sierra de Solana presenta buzamientos variables entre 10° y 50° mientras que los flancos que buzcan hacia el SE tienen valores más bajos entre 20° y 30°. El anticlinal de la Sierra de la Villa se atenúa progresivamente hacia el NE hasta desaparecer entre las poblaciones de El Salse y Banyeres de Mariola. La dirección media de los pliegues es N58E en la zona occidental de la Sierra de Solana y Sierra de la Villa, N64E en el sector central de la Sierra de Solana a la altura de Bocairén y N95E en el sector oriental.

La interpretación del modelo de resistividad de los SEV no permite diferenciar entre las distintas unidades carbonáticas resistivas del Cretácico. Por lo tanto, la principal fuente de datos para la reconstrucción de la geometría del Cretácico superior corresponde a la dirección y buzamiento de los afloramientos. Los datos de dirección y buzamiento de

la estratificación provienen de la cartografía geológica previa y de nuevos datos adquiridos a partir de la fotointerpretación. En la zona donde se sitúan los sinclinales, donde no afloran estas rocas, la geometría de estas unidades es más interpretativa y se basan principalmente en los datos de sondeos. Las líneas sísmicas SG-91 y RV-81 permiten continuar en profundidad los reflectores que afloran en superficie. Por otro lado, la inversión gravimétrica 3D apenas ha modificado la posición original de las superficies del Cretácico superior en el modelo geológico 3D. Por último la interpretación de los sondeos magnetotelúricos no ofrece resolución suficiente para definir la geometría del Cretácico superior.





**Figura 20.** Mapa de isobatas del muro de la unidad C4 (metros sobre el nivel del mar).

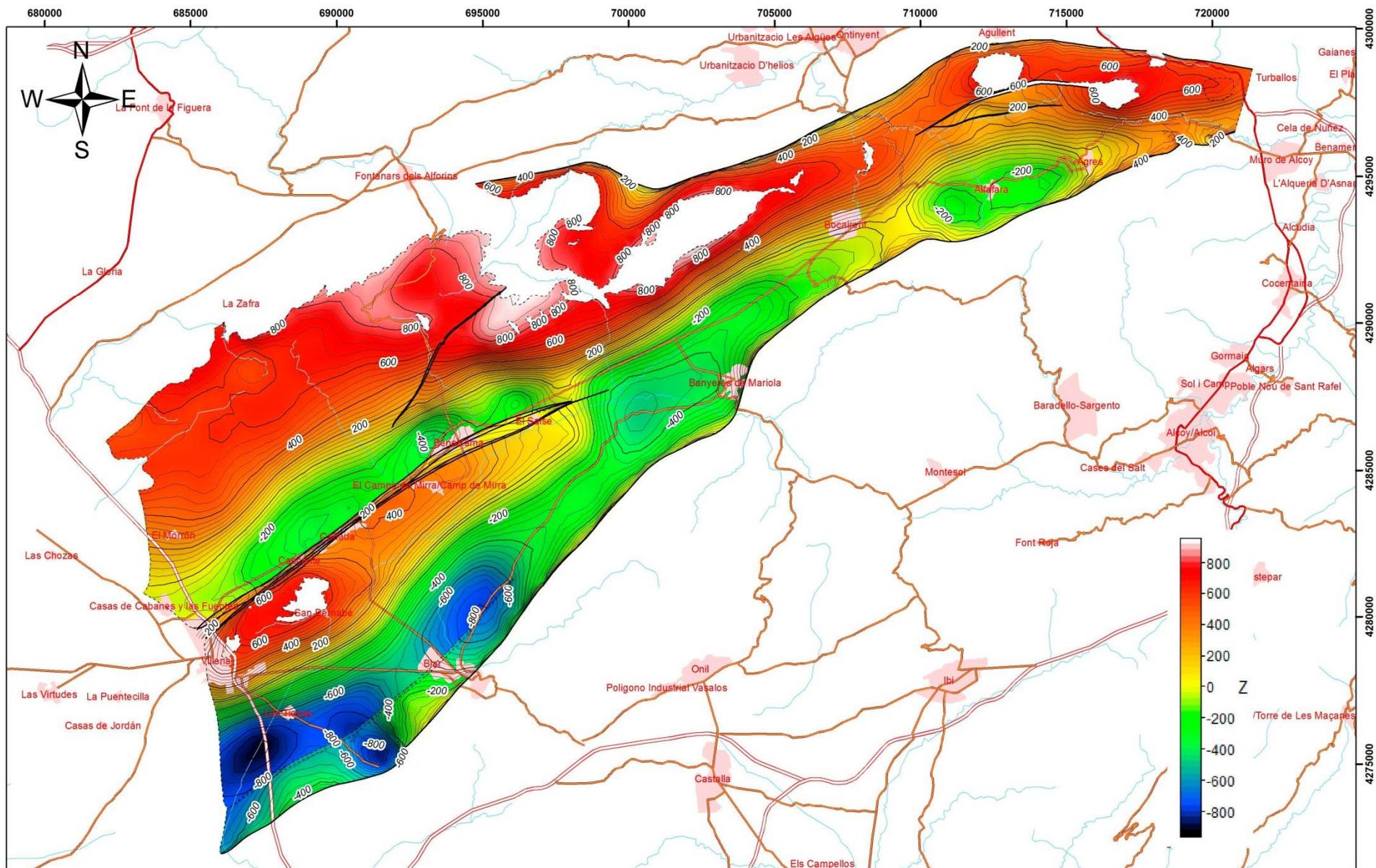


Figura 21. Mapa de isobatas del muro de la unidad C3 (metros sobre el nivel del mar).

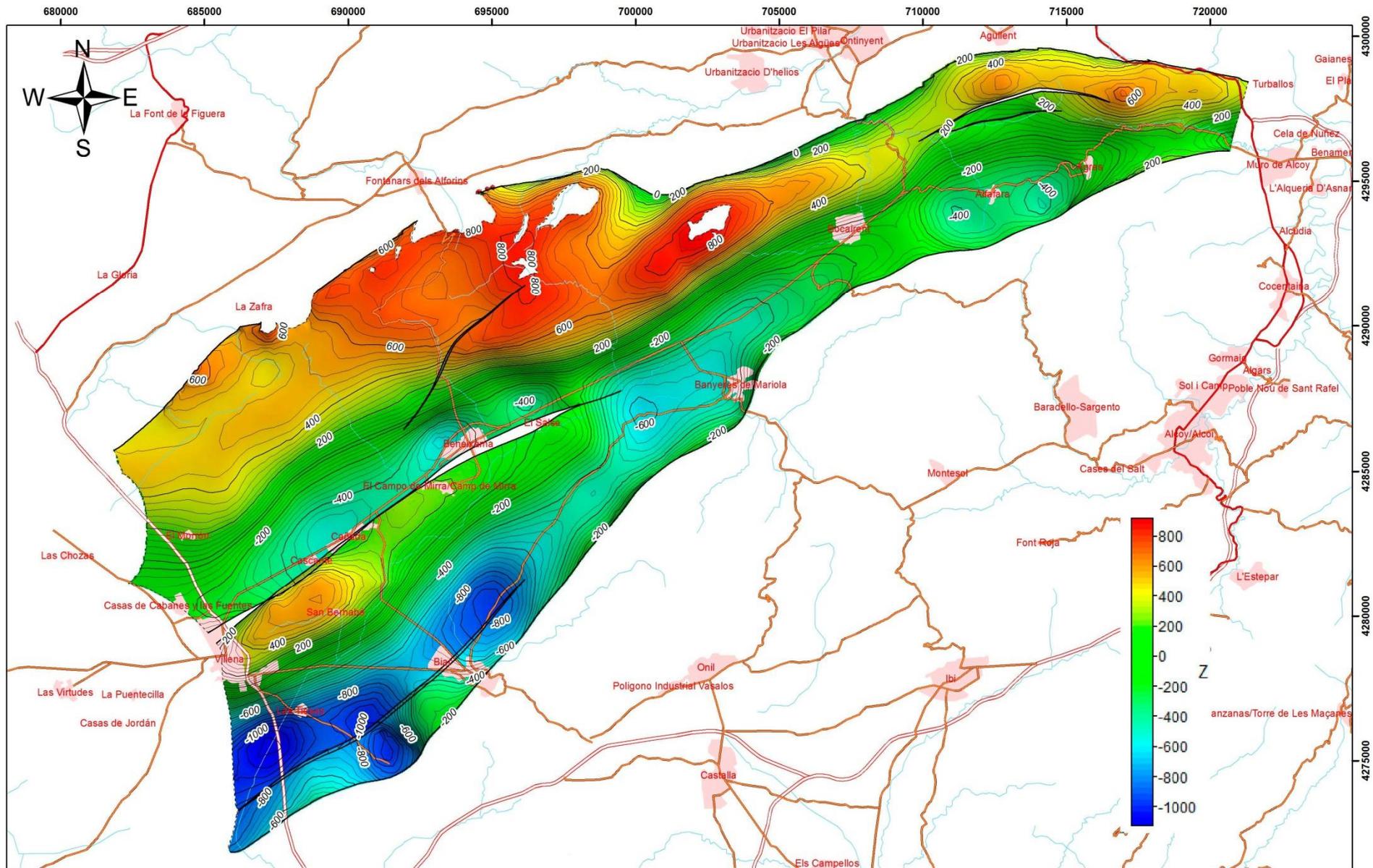
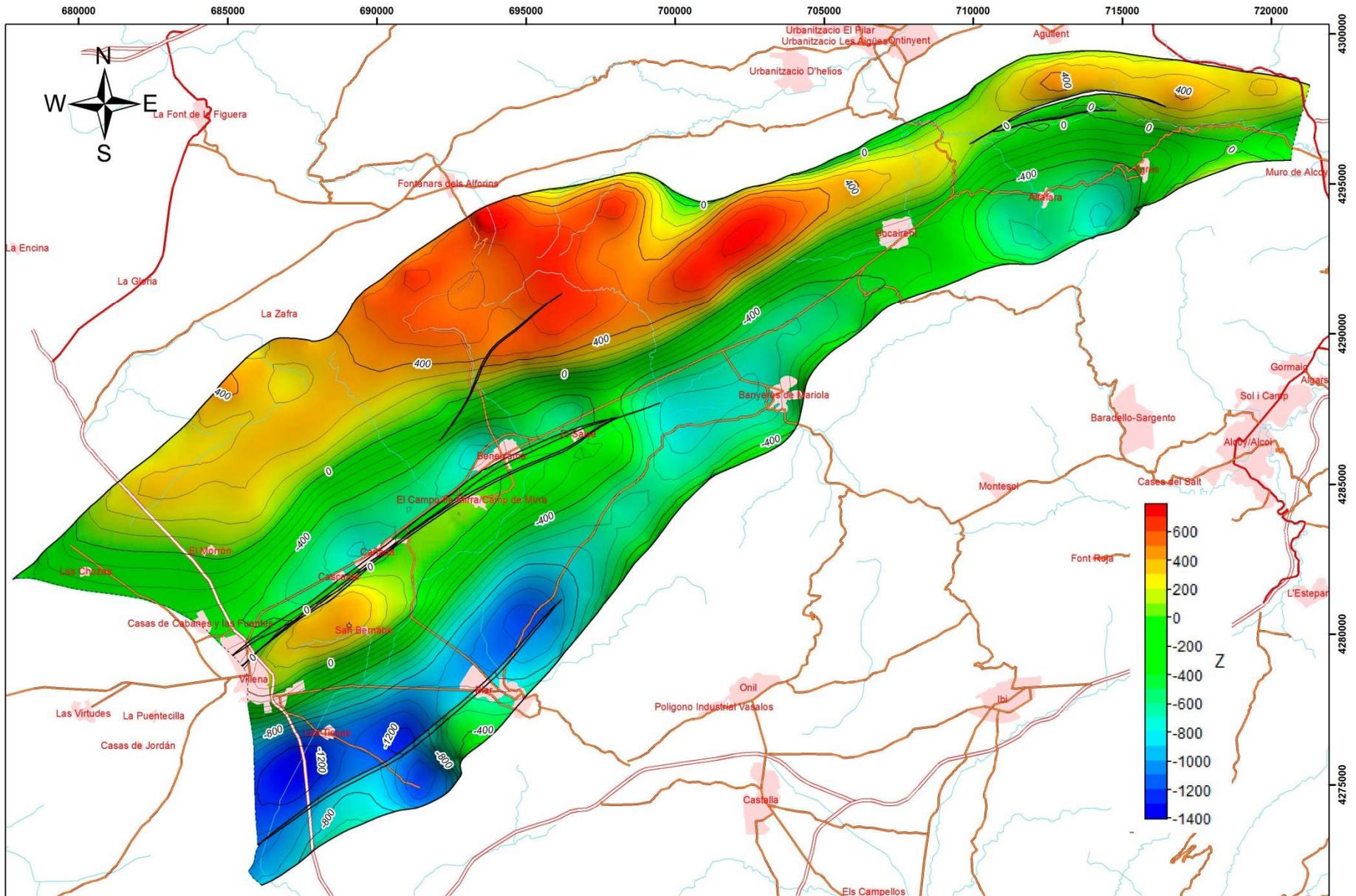


Figura 22. Mapa de isobatas del muro de la unidad C2 (metros sobre el nivel del mar).



**Figura 23.** Mapa de isobatas del muro de la unidad C1 (metros sobre el nivel del mar).

Si bien la geometría de los pliegues en la Sierra de Solana está bien caracterizada, las mayores incertidumbres para el Cretácico superior se encuentran en los sinclinales, ya que no existen sondeos mecánicos lo suficientemente profundos para cortar a las unidades cretácicas. Por otra parte, en la Sierra de la Villa existen sondeos cuya interpretación es muy diferente entre ellos aun estando a poca distancia unos de otros y en la misma dirección de las capas. La solución geométrica adoptada en este sector es aquella que es compatible con la mayor parte de los datos disponibles, aunque no es descartable una mayor complejidad es esta zona que la que se ha modelizado debido a la presencia de fallas inversas que no han sido reconocidas en campo. Sería conveniente hacer una cartografía geológico-estructural de detalle en este sector y seleccionar aquellos sondeos que presentan una mayor confianza en la columna estratigráfica levantada.

### **Unidad del Cretácico Inferior.**

En el modelo geológico 3D se ha modelizado todo el Cretácico inferior como una única unidad debido a que no aflora en el área estudiada exceptuando el afloramiento en el núcleo anticlinal del Alto del Corzo y en la ladera norte del Alto de la Zafra con una potencia máxima de 30 metros. Los sondeos que existen no llegan a perforar a esta unidad a excepción del sondeo Prisas-Bis de 875 metros de profundidad que posiblemente corte esta unidad sin alcanzar al techo del Jurásico. La geometría de la unidad se adapta a un pliegue paralelo y cilíndrico.

El espesor de esta unidad y el tipo de facies y litología presentan muchas interrogantes debido a que no existen datos directos de su espesor en el área estudiada. Para establecer la potencia del Cretácico inferior se ha partido de los espesores regionales para el Cretácico inferior en el entorno del área modelizada. En las Sierras de Mariola y en la Sierra de la Fontanella en el límite SE del área estudiada el Cretácico inferior tiene una potencia media de 850 metros mientras que en la Sierra de Oliva, al noroeste del área estudiada, el espesor es de unos 1200 m. A partir de estos valores regionales y después de realizar la inversión gravimétrica 3D se ha podido estimar el espesor de esta unidad en el área estudiada con una potencia media para el Cretácico inferior de unos 600 m. Se observa un aumento de la potencia de esta unidad desde los 400 metros a los 800 metros de potencia de NO a SE respectivamente.

### **Unidad Jurásica**

El Jurásico no aflora en el área de estudio. El techo de esta unidad aflora en el núcleo anticlinal de la Sierra de Mariola al este y en el núcleo anticlinal de la Sierra de Oliva al oeste. La inversión gravimétrica 3D ha permitido estimar una potencia media de 990 metros para la unidad aunque el grado de incertidumbre de la posición real de esta unidad es alto.

El sondeo Prisas-bis de 875 metros de profundidad cortó una alternancia de margas grises, margocalizas y calizas blancas entre los metros 750 y 848 que se atribuyó al Jurásico aunque según el modelo geológico 3D podrían atribuirse al Cretácico inferior. Según el modelo geológico 3D construido, el techo del Jurásico podría encontrarse unos 600 metros de profundidad desde la superficie en la Sierra de Solana y a unos 1800 m en la zona del sinclinal (figura 24). Al igual que para el cretácico inferior la geometría de esta unidad se adapta a un tipo de pliegue paralelo y cilíndrico.

### **Unidad Triásica**

El Triásico aflora en el área de estudio en la alineación NO-SE del Vinalopó al SO de Villena como consecuencia de la actividad diapírica. Para conocer la geometría de esta

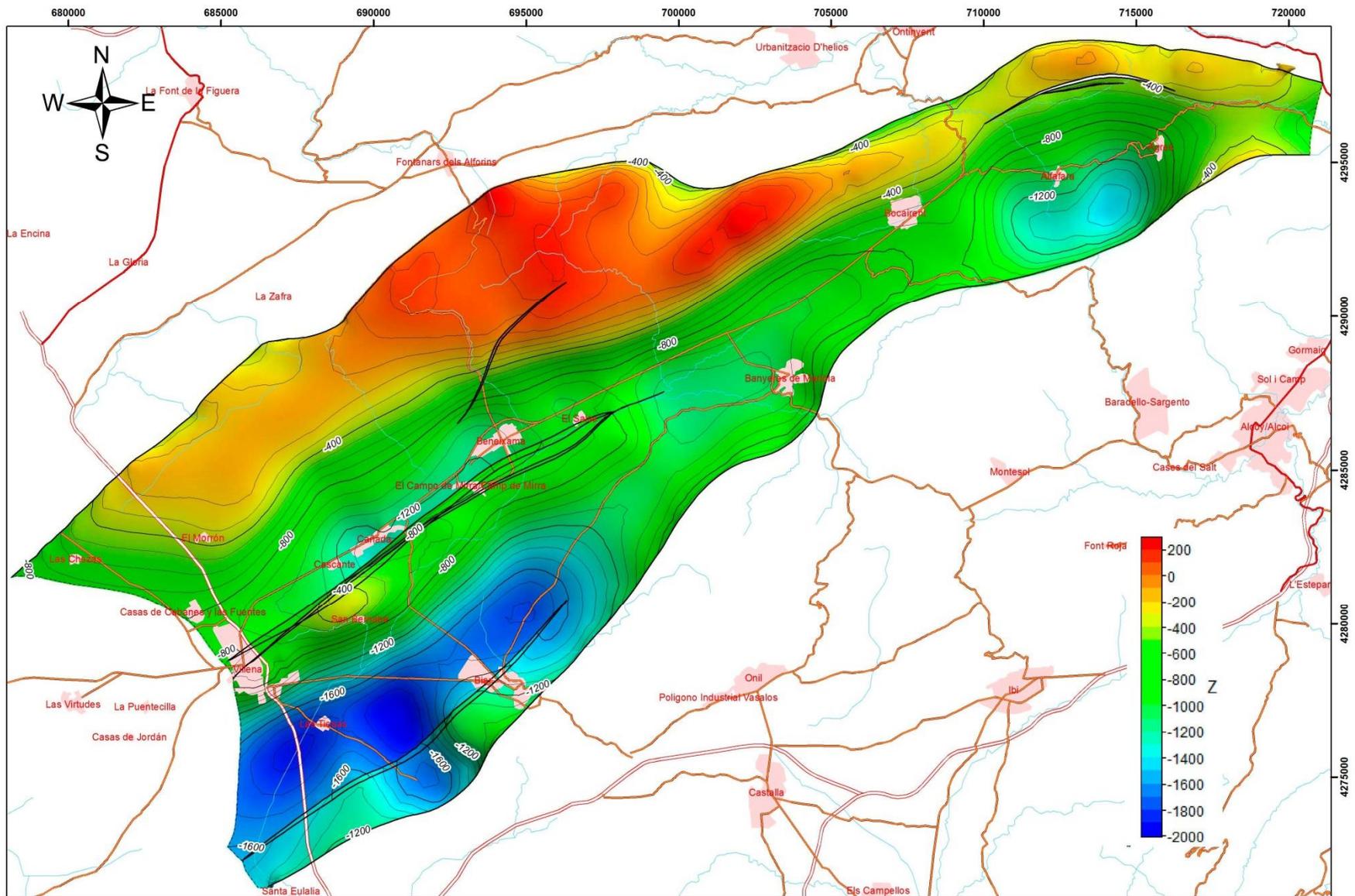
unidad ha sido necesario realizar inversión gravimétrica 3D. Por otra parte, aunque no afloran arcillas triásicas en límite oriental, la anomalía residual negativa permite interpretar la presencia de un diapiro bajo los sedimentos cuaternarios, entre Concentaina y Muro de Alcoy, aunque este hecho habría que corroborarlo con sondeos.

El resultado de la modelización gravimétrica muestra una potencia media para la unidad de 750 metros. En el núcleo del pliegue de la Sierra de la Villa, la potencia obtenida para el Triásico es mayor, con unos 2000 metros. Este aumento de espesor puede ser debido a una posible migración de las arcillas y yesos triásicos paralelamente a la charnela del anticlinal desde el Diapiro de Villena. La geometría de la unidad triásica obtenida a partir de la inversión gravimétrica 3D, no deja de ser una aproximación a la realidad que habría que comprobar con otros métodos geofísicos (figura 25 y 26).

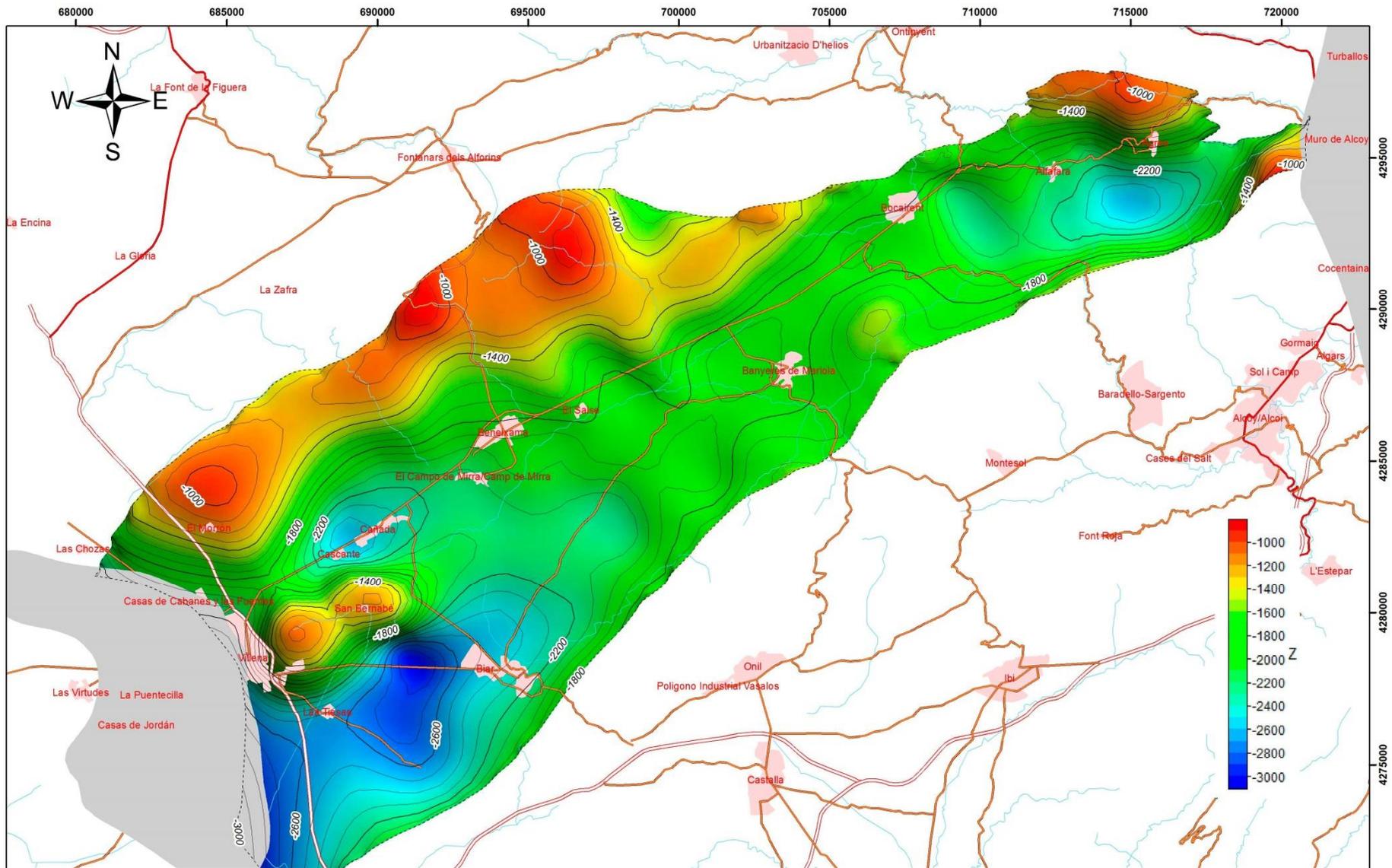
### **Fallas**

Se han modelizado un total de 16 fallas que son aquellas que tienen un salto significativo para la escala del modelo 3D. Las fallas de mayor salto son las que limitan al modelo por el NO y SE y la falla situada al frente de la Sierra de la Villa. La geometría de las fallas se ha estimado a partir de diversos datos. La cartografía geológica muestra la traza en superficie de las fallas y los contactos entre diferentes unidades. En algunos sondeos se pueden reconocer algunas fallas inversas al repetir los sedimentos neógenos. El perfil sísmico RG-91 muestra la geometría lítrica y el salto de la falla situada en el frente de la Sierra de Solana. El perfil 2 de resistividad obtenido a partir del método magnetotelúrico muestra el posible buzamiento de la falla situada al frente de la Sierra de Mariola. La geometría de las fallas inversas modelizadas es lítrica con un buzamiento medio de 50° hacia el SO. Las trazas de las fallas son bastante rectilíneas con una longitud media de la traza de unos 15 km y una dirección N60E. Las fallas en su mayoría cortan a la superficie topográfica y en profundidad acaban despegando sobre las arcillas triásicas. Existen algunas fallas inversas ciegas que no afloran en superficie como la situada en el sinclinal entre la Sierra de las Villas y Peñarubia. También se han modelizado una falla normal y su conjugada, situadas al sur de la Sierra de Filosa con una dirección N80E y un buzamiento de 65°S.

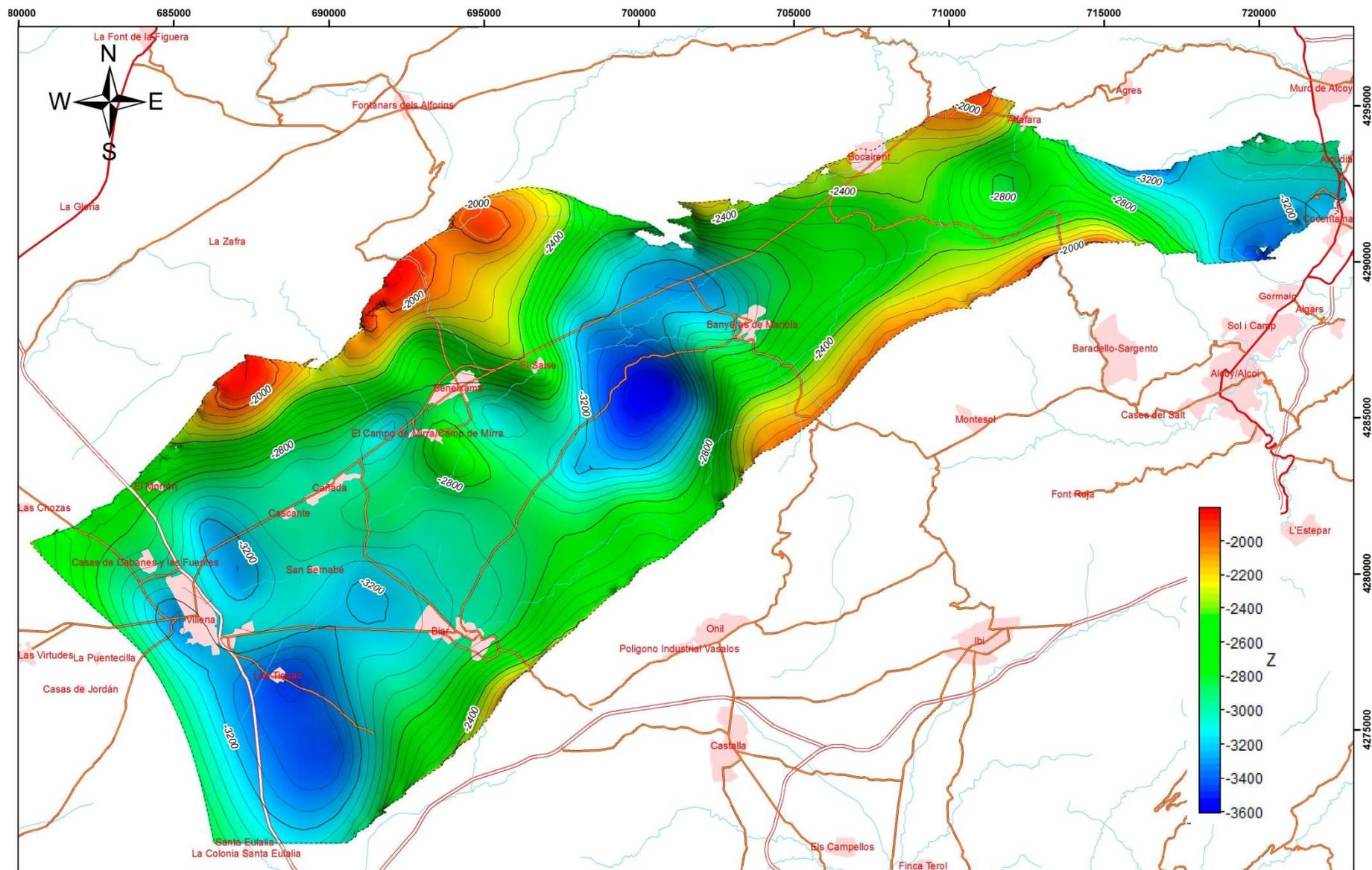
Las fallas tienen un salto inverso y cortan a los sedimentos miocenos, por lo que la actividad de éstas llega al menos hasta esta edad. El salto estimado a partir de la cartografía geológica, algunos sondeos y la interpretación de perfiles sísmicos es de unos 650 m en el frente de la Sierra de la Villa, 450 m en el frente de la Sierra de Solana y unos 900 m en el frente de la Sierra de Mariola.



**Figura 24.** Mapa de isobatas del techo de la Unidad Jurásica (metros sobre el nivel del mar).



**Figura 25.** Mapa de isobatas del techo de la Unidad Triásica (metros sobre el nivel del mar). En gris se representan los diapiros.

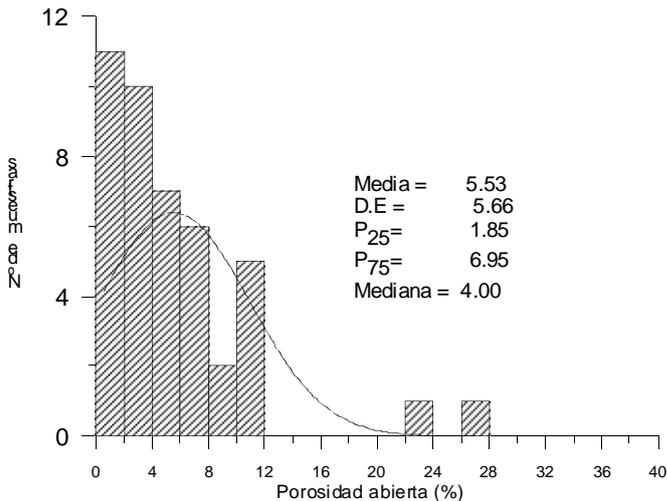


**Figura 26.** Mapa de isobatas del muro de la Unidad triásica (metros sobre el nivel del mar).



## 4.2 Sistema poroso

La distribución estadística de los valores de porosidad abierta determinados por inmersión de las muestras de agua en cámara de vacío se representa en la figura 27. La muestra estadística no se ajusta a una distribución normal y el valor medio de la porosidad abierta y la desviación estándar asociada es  $5,53 \pm 5,66\%$ . En la figura 28 se observa la presencia de varias muestras con porosidades anómalas ( $>22\%$ ) que se deben a la existencia de algunas fracturas abiertas en las probetas. La mediana y los percentiles 25 y 75 de la porosidad abierta son de 4, 1,85 y 6,95 %, respectivamente.



**Figura 27.** Histograma de los valores de porosidad abierta de las muestras recogidas en el acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores.

percentiles 25 y 75 de la porosidad correspondientes a las principales formaciones del acuífero.

El limitado número de muestras empleado en este trabajo no permite fijar un valor medio representativo por formación, pero, a grandes rasgos se puede observar que son las dolomías de la Fm. Franco (C2) las que presentan un valor mayor medio de porosidad abierta. En este sentido se debe indicar que las muestras cogidas en campo en esta formación se tomaban en los tramos más competentes, dado que los tramos margosos estaban muy alterados. En segundo lugar, la formación C1 presenta un mayor valor mediano de la porosidad (5,10 %) seguido de la formación C4 (3,5%) y por último de la C3 (2,5%). Los rangos intercuartílicos son similares con excepción del correspondiente a la formación C4, que es mayor (7,91%).

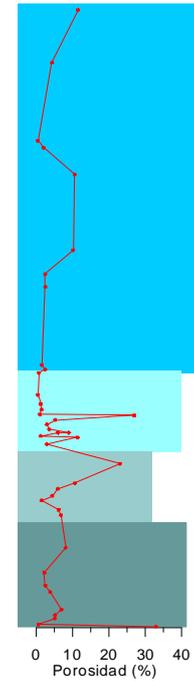
Formación	Media	Mediana	P25	p75	N
C1	4.68	5.10	2.60	6.90	9
C2	7.87	6.00	3.75	8.45	7
C3	5.07	2.50	1.30	5.70	15
C4	5.56	3.50	2.40	10.31	8

**Tabla 5.** Estadísticos descriptivos de la porosidad abierta en las principales formaciones carbonáticas del acuífero de Solana-Onteniente-Volcadores.

El valor de la mediana de la muestra estadística de la porosidad es del 4%, un valor de porosidad ligeramente superior al valor medio registrado en calizas y dolomías de la Cordillera Bética, que es del 3% (Pulido-Bosch *et al.*, 2004). En este sentido, conviene destacar que los valores de coeficiente de almacenamiento que se desprenden de los modelos de flujo calibrados en régimen transitorio son del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$ , dado que corresponden a valores de S elástico.

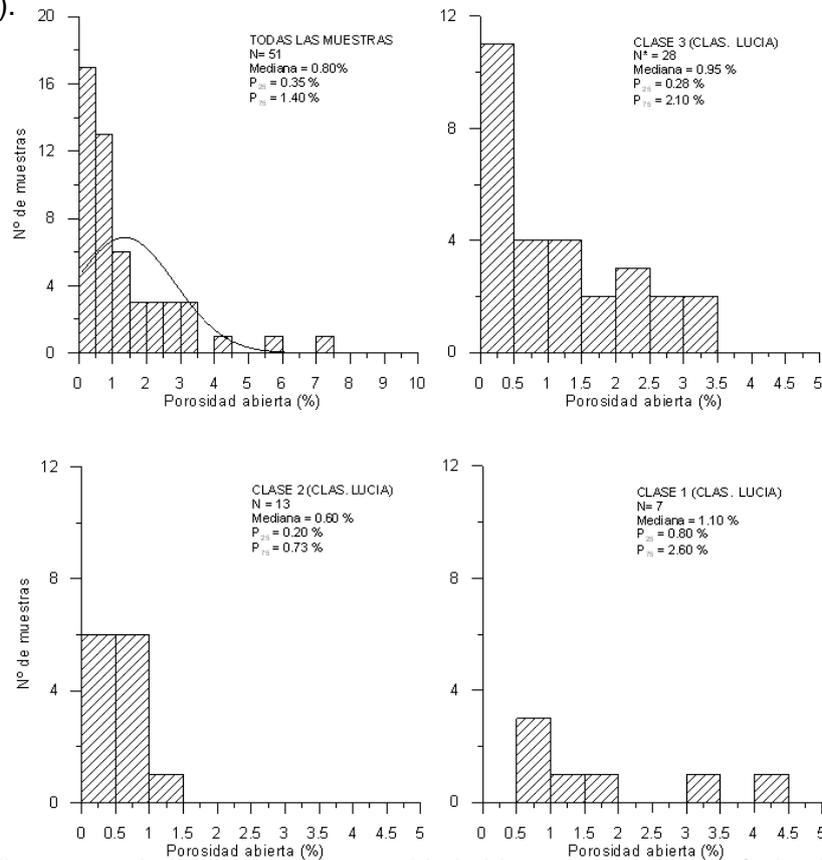
En la tabla 5 se muestran los valores de la mediana y los

En la figura 28 se representa la porosidad abierta frente a la distancia proyectada en la vertical entre el punto de muestreo y el muro de la correspondiente formación. En la gráfica se puede observar como son las formaciones C1 y C4, las principales formaciones acuíferas, las que presentan una menor variabilidad en su capacidad de almacenamiento. Por el contrario, los valores de porosidad de las muestras de las formaciones C2 y C3 son más variables. Asimismo, son observables las diferencias de porosidad medias entre las distintas formaciones.



**Figura 28.** Distribución de porosidades abiertas por formaciones.

Por otro lado, en la figura 29 se comparan los valores de porosidad agrupados según la clasificación petrofísica de Lucia (1995). Se comprueba que las muestras con mayores tamaños de grano y menor proporción de lodo (Clase 1) presentan una mayor porosidad interpartícula. Por su parte, las muestras pertenecientes a las Clase 2 y 3 presentan porosidades medianas de 0.6 y 0.95% respectivamente. En todo caso, la mayoría de las muestras (59%) pertenecen a la Clase 3 de la clasificación de Lucia, frente a un 14% que pertenecen a la Clase 1. La mayor proporción de muestras lodo dominadas explicaría en cierto modo el reducido valor mediano de porosidad de la muestra estadística disponible, y apunta a que estas muestras presentan una baja permeabilidad intrínseca, según los criterios de Lucia (1995).



**Figura 29.** Histograma de los valores de porosidad abierta agrupados según la clasificación de Lucia (1995).

### 4.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas

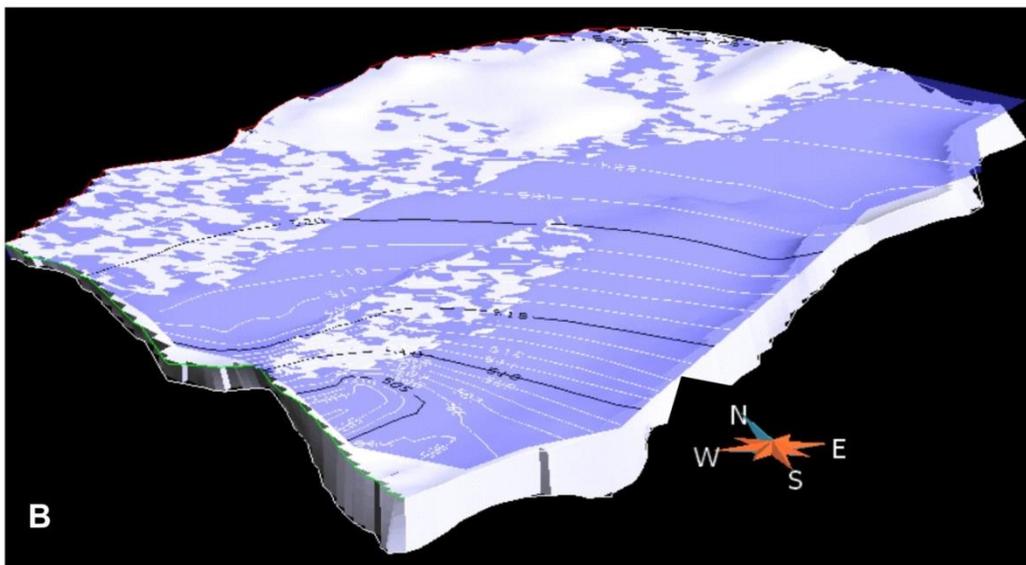
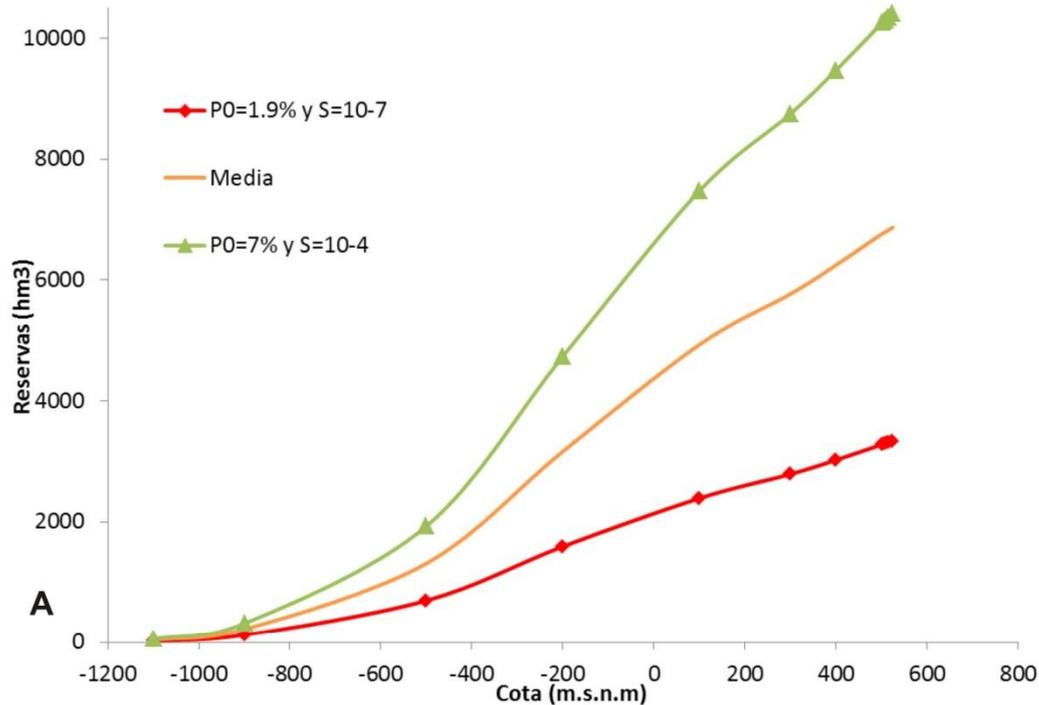
Los valores de reservas de agua subterránea calculados en el acuífero de Solana, respetando los límites descritos para este acuífero en DPA (2007), se resumen en la gráfica de la figura 30, en la que se ha representado la curva de reservas correspondiente.

Las reservas dinámicas, entendiendo por reserva dinámica como aquella que se almacena en un acuífero por encima de la cota de drenaje de los principales puntos de surgencia, se han calculado superponiendo la piezometría de aguas altas del modelo 3D. Se ha considerado que el nivel piezométrico en esta situación quedaría entorno a los 502 m.s.n.m. en la zona de descarga de los antiguos manantiales de Villena y que el punto de mayor potencial coincide con el de la divisoria hidrogeológica con los acuíferos de Volcadores y Onteniente, con una cota piezométrica del orden de 525 m.s.n.m.

Los valores de porosidad abierta y de coeficiente de almacenamiento elástico que se han considerado han sido los siguientes:

- i) Estimación más desfavorable. En este supuesto se ha considerado el percentil 25 de la porosidad abierta en cada formación (tabla 5) y un coeficiente de almacenamiento elástico de  $10^{-7}$ . Este último ha sido elegido en función de los resultados conseguidos en anteriores modelos de flujo.
- ii) Estimación más favorable. En este caso se considera el valor de porosidad del percentil 75 de la muestra estadística y un S elástico de  $10^{-4}$ .

Las reservas dinámicas que resultan en la situación más desfavorable son de  $49 \text{ hm}^3$ . Con la porosidad correspondiente al percentil 75 de la muestra estadística de cada formación y un coeficiente de almacenamiento de  $10^{-4}$  resultan unas reservas dinámicas de  $145 \text{ hm}^3$ . El valor medio entre ambos extremos sería de  $97 \text{ hm}^3$ .



**Figura 30.** A) Curva de reservas del acuífero de Solana obtenido a partir del modelo 3D. B) Vista 3D del modelo 3D del acuífero cortado por la superficie topográfica en régimen permanente. La sucesiva depresión de la superficie piezométrica permite calcular los volúmenes de reservas correspondientes a cada nivel de depresión del nivel piezométrico.

El volumen total de acuífero saturado en condiciones de régimen natural se ha multiplicado por las dos porosidades eficaces consideradas (percentiles 25 y 75) y por los correspondientes  $S$ , de  $10^{-7}$ , en el caso de la menor porosidad, y de  $10^{-4}$ , en el correspondiente a la mayor. Cuando el nivel piezométrico se encuentra por debajo de 502 m.s.n.m., los cálculos se han realizado suponiendo que la superficie piezométrica es horizontal. Los resultados se indican en la figura 30. Las reservas máximas que resultan, según los cálculos realizados, están comprendidas entre 3.334 y 10.406  $\text{hm}^3$ .

Por otro lado, el ajuste polinómico de las curvas de reservas representadas en la figura 30 permite obtener las siguientes ecuaciones:

Reservas correspondientes al percentil 25 de porosidad ( $P_0 = 1,9\%$   $S=10^{-7}$ )

$$\text{Reservas (hm}^3) = 2 \cdot 10^{-12}x^5 + 4 \cdot 10^{-9}x^4 - 7 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0016x^2 + 2,5938x + 2153,9$$

Reservas correspondientes al percentil 75 de porosidad ( $P_0 = 7\%$   $S=10^{-4}$ )

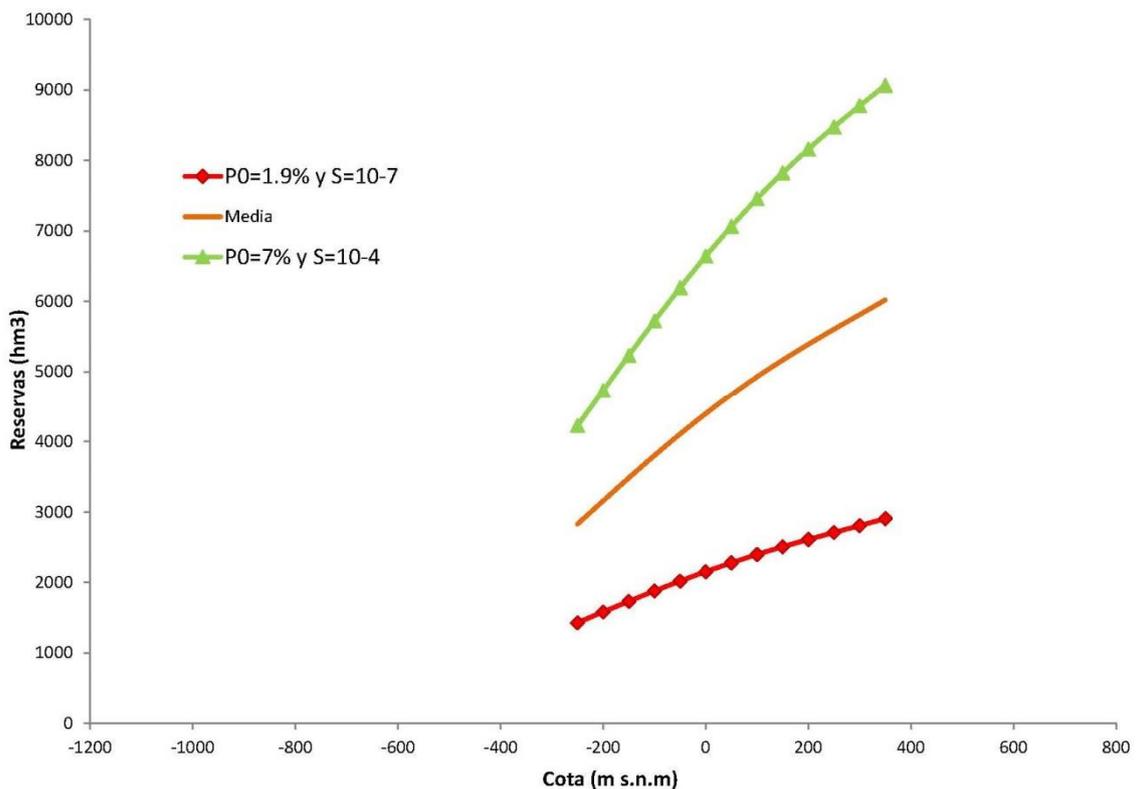
$$\text{Reservas (hm}^3) = 8 \cdot 10^{-12}x^5 + 1 \cdot 10^{-8}x^4 - 4 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,0053x^2 + 8,7201x + 6641,7$$

Reservas medias

$$\text{Reservas (hm}^3) = 5 \cdot 10^{-12}x^5 + 8 \cdot 10^{-9}x^4 - 2 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,0034x^2 + 5,657x + 4397,8$$

Donde x es igual a la cota del nivel piezométrico.

La aplicación de los ajustes anteriores al sondeo Las Ánimas, próximo a la serie de manantiales localizados en las inmediaciones de Villena, por donde descargaba el acuífero cuando funcionaba en régimen natural (a unos 500 msnm), y donde las cotas piezométricas explotables actuales se encuentran aproximadamente entre unos 350 y -250 m.s.n.m., proporcionan las curvas de explotación de la figura 31.



**Figura 31.** Curvas de explotación del Acuífero Solana desde el sondeo Las Ánimas obtenidas a partir del modelo 3D del mismo.

Resultan por tanto unas reservas explotables de:

- 1476 hm<sup>3</sup> ( $P_0 = 1,9\%$   $S=10^{-7}$ )
- 4841 hm<sup>3</sup> ( $P_0 = 7\%$   $S=10^{-4}$ )
- 3193 hm<sup>3</sup> Reservas medias

## 4.4 Implicaciones hidrogeológicas del modelo

Uno de los dos objetivos principales de este proyecto ha consistido en evaluar las reservas totales de agua subterránea en el acuífero de Solana. En este sentido, debe ser subrayado que el cálculo de las reservas recuperables, es decir, el del volumen de agua que se puede extraer de un determinado acuífero atendiendo a distintas limitaciones (calidad química del agua, profundidad máxima y costes de extracción, entre otras) requiere un análisis diferente al que aquí se hace. En esos casos es necesario recurrir a la modelización y simulación del flujo subterráneo en distintos escenarios (Alley, 2007). Este trabajo ya ha sido realizado de forma previa en el acuífero de Solana (DPA-IGME, 2006; DPA, 2010), y se entiende que debería volver a hacerse. La diferente estructura que resulta de la modelización, el carácter abierto del límite oriental del acuífero y los nuevos datos de porosidad abierta conseguidos deberían ser incorporados en un nuevo modelo de flujo con el que recalculan las reservas recuperables del acuífero de Solana.

Además de la evaluación de reservas a diferente cota piezométrica del acuífero de Solana, que se presenta en el apartado 4.3, se han conseguido tres conjuntos de resultados que deben tener una significativa implicación en la mejora de la gestión y la planificación de la estructura modelizada.

a) En este trabajo se presenta un modelo geológico de la estructura 3D que incluye a los acuíferos de Solana, Onteniente y Volcadores. La estructura que define el sistema Solana- Volcadores-Onteniente tiene continuidad geológica y no se han encontrado criterios geológicos que permitan compartimentar esta estructura en tres acuíferos con un comportamiento hidrogeológico independiente. No obstante, todo parece indicar que los principales tramos acuíferos, constituidos por calizas y dolomías del Turoniense-Senonense (C3-C4) tienen diferente potencial hidráulico que las dolomías del Cenomaniense (C1) debido al efecto semiconfinante de la formación Franco (C2, con un comportamiento acuitardo). Se entiende que, a la luz de los nuevos datos geológicos se debería establecer un nuevo modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Solana-Onteniente-Volcadores, diferenciando la información piezométrica según la formación captada por cada sondeo y teniendo en cuenta el efecto que tienen las zonas de fractura en la diferente cota piezométrica que existe entre los tres principales sectores de descarga del acuífero en régimen natural (manantiales de Villena, Pou Clar y salidas al río Agres).

b) Realizado el modelo geológico 3D, es posible exportar las superficies de referencia del mismo a nuevos modelos de flujo y transporte de agua subterránea. Será posible exportar cotas de techo y muro georeferenciadas de las formaciones de interés, así como toda la información volcada para la elaboración del modelo (columnas sondeos, perfiles, geofísica, etc...). Se dispondrá así de la información de base y esencial para poder armar nuevos modelos de flujo y transporte. En este sentido, se debe indicar que el punto débil de la mayoría modelos de flujo subterráneo es el de su geometría. Las propiedades hidráulicas calibradas en los modelos (T y S, entre otras) dependen proporcionalmente del espesor de la formación acuífera; si éste es erróneo, también lo serán los parámetros hidráulicos calibrados.

c) La explotación del modelo geológico 3D del acuífero permite que los técnicos de la DPA puedan hacer diseños más eficientes y productivos de sondeos de explotación y/o de investigación de aguas subterráneas. Además, la superposición de estas zonas favorables para la construcción de captaciones con otras capas de información, como las de zonas inundables, zonas de riesgo sísmico, vulnerabilidad a la contaminación,

etc., permitirán, incluso, seleccionar emplazamientos idóneos para realizar sondeos que suministren agua de calidad a la población en situaciones de emergencia.

d) Por último, se quiere poner de manifiesto que es necesario hacer entender que los acuíferos son estructuras tridimensionales que no pueden ser caracterizados de forma adecuada con los mapas hidrogeológicos 2D tradicionales. La integración en los modelos 3D de acuíferos de los datos procedentes de los sondeos mecánicos, de información geofísica y de la investigación petrofísica es absolutamente esencial para seguir avanzando en el conocimiento hidrogeológico de los mismos.



## 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones finales obtenidas en este proyecto son las siguientes.

1.- El primer objetivo de este trabajo es el de establecer una **metodología para la modelización geológica 3D** y la consiguiente evaluación de las reservas hídricas del acuífero de Solana, sin embargo y debido a la continuidad de la estructura geológica más allá de los límites de este acuífero se consideró conveniente extender el modelo incluyendo a los acuíferos de Onteniente y Volcadores. Este tipo de acuífero corresponde a una tipología de acuífero sin una gran complejidad estructural y localizado en el Prebético externo de la provincia de Alicante. Los pliegues anticlinales están bien expuestos en las sierras y muestran buenos afloramientos. Sin embargo en los valles, los rellenos neógenos y cuaternarios ocultan la geometría sinclinal del cretácico. Son regiones que tienen variados datos geofísicos de distinto tipo (sísmica, SEVs, gravimetría, etc.).

Para este acuífero se ha aplicado la metodología descrita en el apartado 3.1 que se caracteriza por profundizar en la integración de numerosos datos geofísicos de diversa procedencia junto con los datos de superficie. El modelo se ha construido en dos fases. Primero se ha realizado un modelo inicial de las formaciones geológicas cretácicas y neógenas a partir de la integración de datos geológicos, sondeos mecánicos, SEVs, MT y sísmica de reflexión. En una segunda fase se ha modificado el modelo inicial a partir de la inversión gravimétrica 3D y de esta forma investigar las unidades geológicas más profundas (Triásico, Jurásico y Cretácico inferior).

Como conclusión, la metodología utilizada para la construcción del modelo 3D de los acuíferos de Solana-Onteniente-Volcadores es de gran interés por su aplicabilidad en los acuíferos del Prebético de Alicante con una tipología de datos similar a la disponible en Solana.

2.- El segundo de los objetivos propuestos en este trabajo era la **construcción del modelo geológico 3D** del acuífero. El resultado ha sido satisfactorio ya que se han modelizado un total de 9 unidades geológicas de la región y 16 fallas principales con una extensión superficial de unos 350 km<sup>2</sup> y alcanza profundidades de unos -3200 m.s.n.m. La verosimilitud del modelo 3D es muy alta debido a la integración de numerosos datos geológicos y geofísicos y alcanza un conocimiento del subsuelo en la región único en la provincia de Alicante. La mejora en el conocimiento consiste principalmente en la caracterización geométrica 3D de las unidades geológicas que forman el acuífero y de las unidades geológicas triásicas y jurásicas más profundas. A partir de esta mejora en el conocimiento del acuífero se pueden derivar implicaciones en relación a su modelo de funcionamiento y las relaciones laterales con otros acuíferos de la región (apartado 5.1).

La geometría 3D obtenida se caracteriza principalmente por pliegues suaves vergentes al NO y fallados en el frente del flanco NO del anticlinal por fallas inversas. Las charnelas de los anticlinales se corresponden con las alineaciones montañosas de la Sierra de Solana y Sierra de la Villa y permiten que afloren las rocas cretácicas, mientras que en las zonas de sinclinal se produce el depósito de las cuencas neógenas. Este modelo 3D es compatible con la cartografía geológica de superficie. A partir del modelo 3D se pueden elaborar mapas de isobatas y cortes geológicos en cualquier dirección del espacio.

3.- En relación a la **calidad del modelo 3D** obtenido se puede concluir que es un modelo satisfactorio que se ajusta bien a los datos disponibles. En el apartado 4.1 se discutió sobre el número, distribución y calidad de estos datos. En general, la geometría de los anticlinales está bien determinada a partir de la interpretación de los buzamientos de superficie. La geometría en los ejes de los sinclinales está interpretada a partir de datos geofísicos indirectos que pueden presentar una mayor incertidumbre y en menor medida a partir de sondeos.

## 6. REFERENCIAS

- Ahr, W.M. 2008. Geology of carbonate reservoirs: the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks Editorial, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 277 pp.
- Alley, W.M. 2007. Another water budget myth: the significance of recoverable ground water in storage. *Ground Water*, 45: 251.
- Bachu, S. 2008. Comparison between methodologies recommended for estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in geological media. Carbon Sequestration Leadership Forum (CLSF) and USDOE Capacity and Fairways Subgroup of the Regional Carbon Sequestration Partnerships Program, Canada. 17.
- Borczak, S., Motyka, J., Pulido-Bosch, A. 1990. The hydrogeological properties of the matrix of the chalk in the Lublin coal basin (southeast Poland). *Hydrological Sciences Journal*, 35: 523-534.
- De Ruig, M.J. 1992. Tectono-sedimentary evolution of the prebetic fold belt of Alicante (SE Spain) a study of stress fluctuations and foreland basin deformation. PhD thesis, Structural geology and tectonics group. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- DPA. 2003. Asistencia para la determinación de los límites hidrogeológicos en diversos acuíferos provinciales. Definición geométrica. Expte. A04-172/02.
- DPA. 2006. PIBE 2.0 Programa de interpretación de ensayos de bombeo. Manual de usuario. Diputación Provincial de Alicante.
- DPA. 2007. Mapa del Agua de la Provincia de Alicante. 2ª Edición. Escala 1/150.000. Diputación Provincial de Alicante, Alicante, 78 pp.
- DPA, 2009. Determinación del volumen de reservas útiles en los embalses subterráneos de abastecimiento público, para la información continua a los municipios.
- DPA. 2010. Adaptación del modelo de flujo numérico de la simulación del flujo del embalse subterráneo Solana al sistema de información hidrogeológica de la Diputación de Alicante. Determinación de las reservas útiles dinámicas y garantía de suministro.
- DPA-IGME. 1992. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos y propuesta de normas de explotación de la unidad de Solana. Instituto Geológico y Minero de España-Diputación Provincial de Alicante.
- DPA-IGME. 2003a. Aplicación de un modelo matemático para simular los recursos hídricos en el acuífero Solana (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Instituto Geológico y Minero de España-Diputación Provincial de Alicante.
- DPA-IGME. 2003b. Determinación de las reservas útiles en los acuíferos de abastecimiento público en Alicante: Acuíferos Solana, Maigmó, Sella, Beniardá-Polop y Solana de la Llosa. Informe IGME h2.020.03.
- DPA-IGME. 2006. Estudio del funcionamiento hidrogeológico y simulación numérica del flujo subterráneo en los acuíferos carbonatados de Solana y Jumilla-Villena. (Alicante y Murcia). 117 pp.
- DPA-IGME, in prep., 2013. Atlas hidrogeológico de la Provincia de Alicante.
- DPA-ITGE. 1996. Catálogo de acuíferos con problemas sobreexplotación o salinización. Proposición del programa estatal de ordenación. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Instituto Tecnológico

Geominero de España.

- Dullien, F.A.L. 1992. Porous Media Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press. San Diego, 574 pp.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. Am Assoc Petrol Geol Mem 1: 108. 121.
- Dürrast, H. and Siegesmund, S. 1999. Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rocks. Int Journ Earth Sciences. 88: 392. 408.
- Eisinger, C. and Jensen, J. 2011. Reservoir characterization for CO<sub>2</sub> sequestration: assessing the potential of the Devonian Carbonate Nisku formation of Central Alberta. Oil & Gas Science and Technology, 66.
- Folk, R.L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. Am Assoc Petrol Geol Bull 43: 1. 38.
- Folk, R.L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. Am Assoc Petrol Geol Mem 1:62. 84.
- García Lobón, J.L., Reguera García, M.I., Martín León, J., Rey Moral, C., Berrezueta Alvarado, E.R., Pérez Ortiz, I. 2011. Resumen Ejecutivo del Plan de Selección y Caracterización de áreas y estructuras favorables para el Almacenamiento Geológico de CO<sub>2</sub> en España+. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64055). Madrid. [http://www.igme.es/internet/sistemas\\_infor/Sid.htm](http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/Sid.htm)
- Gill, B., Cherry, D., Adelana, M., Cheng, X., Reid, M. 2011. Using three-dimensional geological mapping methods to inform sustainable groundwater development in a volcanic landscape, Victoria, Australia Hydrogeology Journal, 19: 1349-1365.
- Herrmann, R., Pierce, M., Burgess, K., Priestley, A. 2004. Integrated aquifer characterization and numerical simulation for aquifer recharge and storage at Marco Lakes, Florida. Hydrology Science & Practice for the 21st Century, 1: 276-283.
- IGME. 1986. Proyecto para el establecimiento de normas de explotación de los acuíferos en la zona de Gandía-Denia-Javea y Cabecera del Vinalopó.
- IGME. 1988. Las aguas subterráneas en la Comunidad Valenciana. Uso, calidad y perspectivas de utilización.
- IGME. 1999. Prospección geoelectrica en Onteniente (Alicante). Integración de información sísmica y gravimétrica. Informe IGME.
- Lajaunie Ch., Courrioux G., Manuel L. 1997. Foliation fields and 3d cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. Mathematical Geology, 29, 571-584.
- López-Geta, J.A. 2004. Análisis metrológico sobre la utilización de los embalses subterráneos en la regulación de los recursos hídricos. Aplicación a la transferencia Ebro-Levante-Sureste peninsular español. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 615 pp.
- Lowry, C.S. and Anderson, M.P. 2006. An assessment of aquifers storage recovery using ground water flow models Ground Water, 44: 661-667.
- Lucia, F.J. 1995. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. Am Assoc Petrol Geol Bull 79: 1275. 1300.
- Lucia, F.J. 1999. Carbonate reservoir characterization. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 1. 226.
- Martín-Chivelet, J., Berasategui, X., Rosales, I., Vilas, L., Vera, J.A., Caus, E., Gräfe,

- K.-U., Mas, R., Puig, C., Segura, M., Robles, S., Floquet, M., Quesada, S., Ruiz-Ortiz, P., Fregenal-Martínez, M.A., Salas, R., Arias, C., García, A., Martín-Algarra, A., Meléndez, N., Chacón, B., Molina, J.A., Sanz, J.L., Castro, J.M., García-Hernández, M., Carenas, B., García-Hidalgo, J., Gil, J., Ortega, F. 2002. Cretaceous. In: Gibbons, W., Moreno, T. (Eds.), *The Geology of Spain*. Geological Society, London, 255-292.
- Martínez del Olmo, W., Leret, G., Garrido Megías, A. 1982. El límite de la plataforma carbonatada del Cretácico superior en la zona Prebética. *Cuad. Geol. Ibérica*, 8: Albacete. 597-614.
- Martos-Rosillo, S., Rodríguez-Rodríguez, M., Pedrera, A., Cruz-San Julián, J.J., Carlos-Rubio, J.C. 2013. Groundwater recharge in semi-arid carbonate aquifers under intensive use: the Estepa Range aquifers (Seville, southern Spain). *Environmental Earth Science*. DOI 10.1007/s12665-013-2288-0.
- Nelson, R.A. 2001. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*. 2nd Editorial, Houston. 322 pp.
- Pérez Bielsa, C. and Lambán, L.J. 2006. Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las aguas subterráneas en el acuífero carbonatado de Solana (Alicante). *Boletín Geológico y Minero*, 117: 589-592.
- Pulido-Bosch, A., Motyka, J., Pulido-Leboeuf, P., Borczak, S. 2004. Matrix hydrodynamic properties of carbonate rocks from the Betic Cordillera (Spain). *Hydrological Processes*: 2893-2906.
- Robins, N.S., Rutter, H.K., Dumbleton, S., Peach, D.W. 2004. The role of 3D visualisations as an analytical tool preparatory to numerical modelling. *Journal of Hydrology*, 301: 287-295.
- Rodríguez-Estrella, T. 1977. Síntesis geológica del Prebético de la Provincia de Alicante. *Tectónica, Bol. Geol. Minero*, v. 88, pp. 273-299.
- Ross, M., Parent, M., Lefebvre, R. 2005. 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 13: 690-707.
- Sanz de Galdeano, C. 1983. Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geológicos*, 23, pp. 83-165.
- Thoms, E. 2011. *Creating and Managing Digital Geologic Cross Sections within ArcGIS*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1428. <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1428/thoms/index.html>
- UNESCO. 1979. *Map of the world distribution of arid regions*. Editorial, UNESCO, Paris. 54 pp.
- Vacher, H.L., Hutchings, W.C., Budd, D.A. 2006. Metaphors and models: the ASR bubble in the Floridan Aquifer. *Ground Water*, 44: 661-667.
- Worthington, S.H.R. 2007. Ground-water residence times in unconfined carbonate aquifers. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69: 94-102.
- Worthington, S.R.H., Davies, G.J., Ford, D.C. 2000. Matrix, fracture and channel components of storage and flow in a Paleozoic limestone aquifer In: Wicks C. M. y Sasowsky, I. D. (eds) *Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers*: 113-128.
- Wu, Q., Xu, H., Zhon, W. 2008. Development of a 3D GIS and its applications to karst areas *Environmental Geology*, 54: 1037-1045.

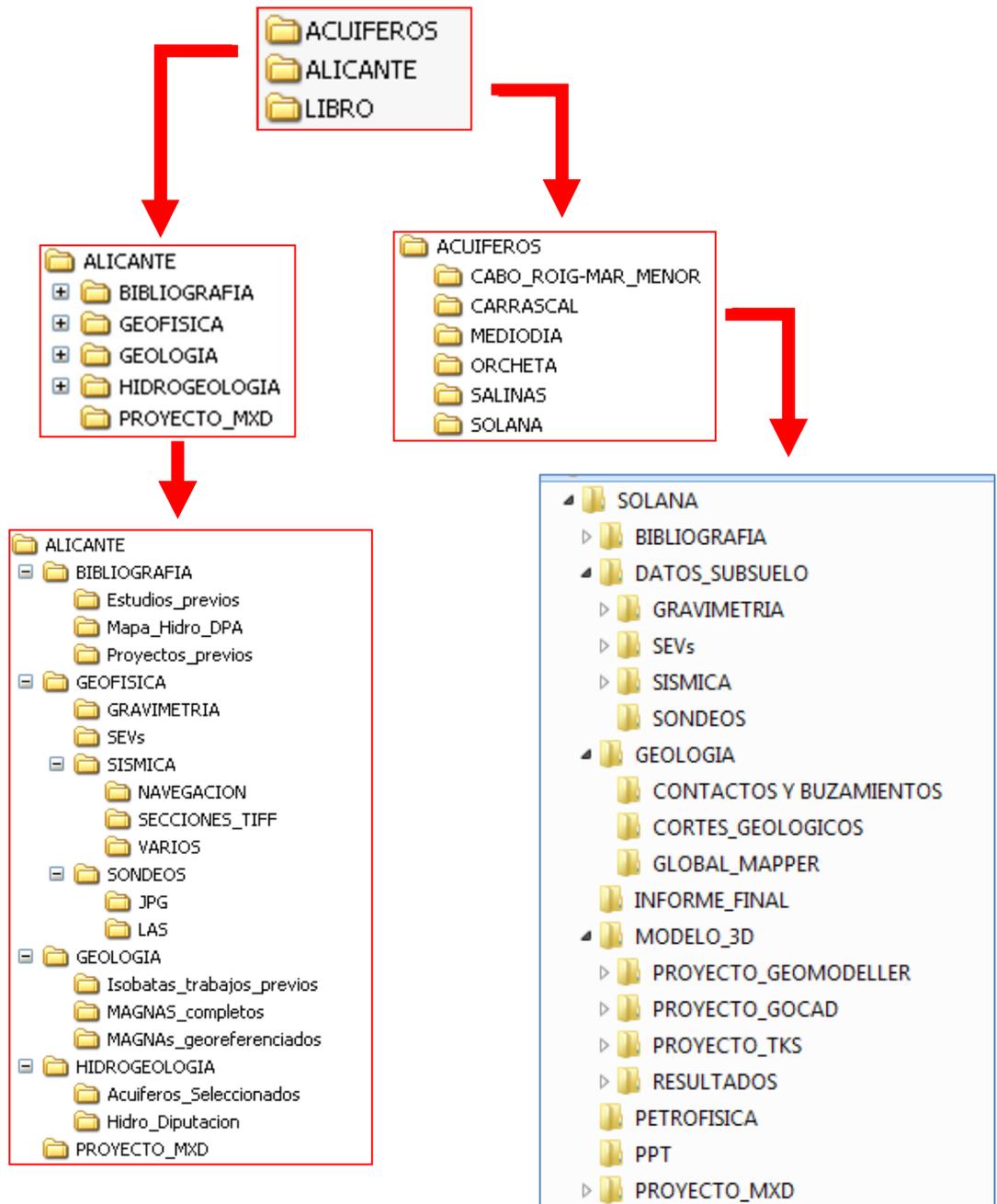


## **ANEXOS**



# ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL ENTREGADA

## 1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL



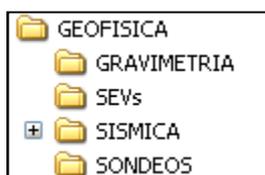
## 2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE

La carpeta **ALICANTE** contiene información general, geológica, geofísica e hidrogeológica, recopilada o generada, así como memorias e informes recopilados y los proyectos MXD generados (mapas).



### **GEOFISICA**

La carpeta GEOFISICA contiene las carpetas: **SEVs, GRAVIMETRIA, SISMICA Y SONDEOS**, con la información geofísica regional recopilada para el proyecto y que se ha utilizado en la modelización.



 **SEVs:** Información de los SEVs (sondeos eléctricos verticales) que se localizan en la provincia de Alicante. Contiene los archivos de texto en bruto, los modelos (según hojas MAGNA) y diversos PDF y Shapes con su posición.

 **GRAVIMETRIA:** Archivos de texto con los puntos de gravimetría de la provincia de Alicante.

 **SISMICA:** Contiene las secciones y la navegación de la sísmica presente en la provincia de Alicante recopilada. La información se agrupa en las siguientes carpetas:



 **NAVEGACION.** Esta carpeta contiene la navegación en Shape y .SIS de las líneas sísmicas, descargadas por campañas desde la aplicación SIGECO.

 **SECCIONES\_TIFF.** Esta carpeta contiene las imágenes escaneadas en formato TIFF de las secciones sísmicas disponibles en SIGECO para la provincia de Alicante, así como otras secciones.

 **VARIOS.** Información diversa de archivos relacionados con la prospección sísmica: Un archivo Excel con análisis de reflectores y Tiempos Dobles e información de líneas sísmicas de la aplicación SIGEOF del IGME.

 **SONDEOS:** En esta carpeta se encuentran archivos (.las, .jpg) de sondeos profundos presentes en la provincia de Alicante descargados de la aplicación SIGECO.

## **GEOLOGIA**

Esta carpeta contiene la información geológica recopilada para el proyecto.

 **MAGNAs\_georeferenciados:** Archivos JPG georeferenciados de los mapas MAGNA 1:50.000 que engloban la provincia de Alicante (.jpg, .jgw, .aux).

 **MAGNAs\_completos:** Archivos JPG de los mapas MAGNAs editados con columnas y cortes que engloban la provincia de Alicante. También incluye las memorias de los mapas MAGNA en PDF.

 **Isobatas\_trabajos\_previos:** Contiene los archivos de vectorización de isobatas de áreas de Alicante de trabajos previos al proyecto HIDROPROAL.

## **HIDROGEOLOGIA**

Esta carpeta contiene la información hidrogeológica recopilada para el proyecto.

 **Hidro\_Diputacion:** Mapa y Shapes proporcionados por la Diputación de Alicante. Incluye un TXT donde se explica qué es cada archivo y qué contiene cada carpeta.

 **Acuíferos\_seleccionados:** Contiene la capa de acuíferos preseleccionados para trabajar en formato Shape.

## **BIBLIOGRAFIA**

Esta carpeta contiene memorias e informes recopilados para el proyecto.

 **Mapa\_Hidro\_DPA:** Memoria por capítulos del mapa hidrogeológico de la diputación de Alicante en formato PDF.

 **Proyectos\_previos:** Memoria del Proyecto Murcia 2008, realizada por Gessal y diversos estudios realizados por ENAGAS en la provincia de Alicante y limítrofes. Selección de documentos en formato PDF provenientes del Plan del CO<sub>2</sub> llevado a cabo por el IGME (plan ALGECO2) y diversos documentos PDF de otros proyectos.

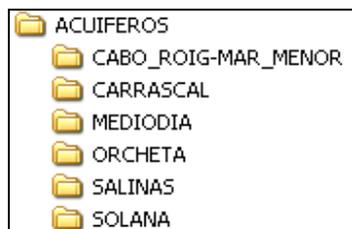
 **Estudios\_previos:** En ella se encuentran documentos PDF sobre los diversos acuíferos descritos en la provincia de Alicante. Además hay un archivo .doc que resume las zonas que comprenden dichos estudios y las figuras que hay en cada uno de los informes.

## **PROYECTO\_MXD**

Proyecto MXD regional generado durante el proyecto, junto con sus archivos (.shp, .jpg, etc.). El proyecto contiene el mapa hidrogeológico de la provincia de Alicante, las hojas MAGNA, las líneas sísmicas de la provincia, los sondeos, cortes geológicos, columnas, etc.

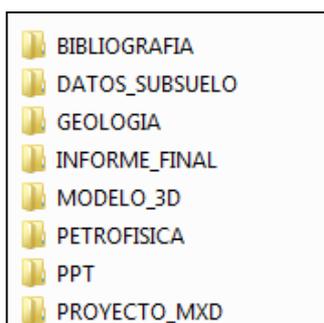
### 3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO SOLANA

La información digital del acuífero Solana se encuentra dentro del directorio ACUIFEROS.



Esta carpeta contiene la información de la zona de trabajo, tanto la previa, como la generada durante el proyecto.

*(Nota: Todos los acuíferos tienen la misma estructura de directorios y se repite el nombre de las carpetas que cuelgan de la carpeta del acuífero estudiado. En algunos acuíferos no existe información sobre determinadas materias, por ejemplo la petrofísica, por lo que esa carpeta no existe en ese acuífero en concreto).*



#### **BIBLIOGRAFIA**

Informes recopilados sobre el acuífero Solana en estudio.

#### **PPT**

Presentaciones realizadas en las reuniones con la Diputación de Alicante sobre el avance en el proyecto del acuífero estudiado Solana.

#### **GEOLOGIA**

En esta carpeta se incluyen los cortes geológicos, los archivos de buzamientos previos o procesados, los contactos geológicos incluidos en el modelo, fotografías de campo, etc.

 **CORTES GEOLOGICOS** Cortes empleados en la modelización en diferentes formatos (JPG y .shp).

 **CONTACTOS\_Y\_BUZAMIENTOS** Contactos y buzamientos introducidos en el modelo 3D (.shp, .csv, etc.)

 **GLOBAL\_MAPPER** Contiene el proyecto en Global Mapper del acuífero Solana.

## **PROYECTO\_MXD**

Proyecto MXD generado durante el estudio, junto con sus archivos (MDT, cortes, sondeos, geofísica, etc.). Todos los archivos del proyecto MXD cuelgan de esta carpeta para facilitar la copia de la información a otros ordenadores.

## **DATOS\_SUBSUELO**

Esta carpeta contiene toda la información geofísica analizada, procesada e interpretada en el acuífero Solana. Contiene a su vez las siguientes carpetas:

### **SISMICA**

 **NAVEGACION** En esta carpeta están los archivos .xlsx y .nav con la navegación de las líneas sísmicas.

 **SEGY** Esta carpeta contiene archivos SEG-Y.

 **PERFILES\_IMAGENES** Las imágenes TIFF de las secciones sísmicas.

 **PROCESADO** Las velocidades RMS, los archivos Excel del cálculo de la ley de velocidad.

 **SEVs** Los archivos relacionados con los SEVs (shapes de posición, archivos con las curvas de resistividad, datos de campo, etc.).

 **GRAVIMETRIA** Toda la información gravimétrica relacionada con el acuífero Solana.

 **SONDEOS** Información sobre los sondeos de la zona (shapes de los sondeos, hojas Excel).

## **PETROFISICA**

Esta carpeta contiene información sobre el muestreo y análisis de la petrofísica: Informe de laboratorio y .xls con información de las muestras, así como la curva de reservas.

## **MODELO\_3D**

 **PROYECTO\_GEOMODELLER** Proyecto del modelo 3D en GeoModeller del acuífero Solana.

 **PROYECTO\_GOCAD** Proyecto Gocad con todos los objetos modelizados del acuífero Solana.

 **PROYECTO\_TKS** Proyecto de Kingdom Suite del acuífero Solana.

 **RESULTADOS** El modelo 3D se puede abrir directamente desde Geomodeller y desde Gocad. Sin embargo, el modelo 3D no se puede examinar si no se dispone del software específico. Existen unos productos derivados del modelo como cortes geológicos al modelo, mapas de isobatas, mallas xyz que se pueden exportar a archivos de formato estándar como DXF, JPG, PDF, ASCII, etc., para poder examinarlos o importarlos a otros programas de mayor difusión.

 **MAPAS\_ISOBATAS** Mapas de isobatas de las superficies modelizadas en formato MXD con los archivos correspondientes a cada proyecto.

 **CORTES** Cortes geológicos realizados al modelo 3D en formato CorelDraw y shape.

 **INFORME\_FINAL**  
Informe final del acuífero Solana.

#### **4. LISTADO DE FICHEROS**

El listado de los archivos entregados se encuentra en el Excel Listado\_archivos\_SOLANA.xlsx dentro del directorio INFORME\_FINAL.

## **ANEXO II. ESTUDIO PETROGRÁFICO**

### **ÍNDICE**

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. MATERIALES Y MÉTODOS**
  - 2.1. Formaciones geológicas muestreadas; ubicación de las muestras analizadas**
  - 2.2. Técnicas de estudio de rocas carbonatadas: preparación de muestras y equipo petrográfico**
  - 2.3. Análisis de las muestras pertenecientes a la zona de estudio**
- 3. RESULTADOS**
  - 3.1. Estudios petrográficos**
  - 3.2. Tabla de resultados**
- 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## 1. INTRODUCCIÓN

En el actual anexo se recogen los **estudios petrográficos** para la caracterización de las microfacies pertenecientes a los afloramientos carbonatados del acuífero Solana en la provincia de Alicante (Hoja nº 820, Onteniente). Tales estudios incluyen la determinación y caracterización de los elementos texturales y la clasificación de las microfacies según los esquemas propuestos por Dunham (1962), Folk (1959, 1962) y Lucía (1999). En este estudio se ha determinado igualmente la morfología y el tamaño de los poros, y la existencia y distribución de fisuras en las muestras estudiadas, lo que nos permitirá establecer la correlación entre la fábrica de las rocas carbonatadas y las propiedades físicas (Dürrast and Siegesmund, 1999). Para tales determinaciones se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Formaciones geológicas muestreadas; ubicación de las muestras analizadas

Las formaciones geológicas representadas se sitúan en el Dominio del Prebético Externo de las Cordilleras Béticas en la sierra de Solana (Alicante) y las muestreadas en este estudio son las siguientes:

- Formación de calcarenitas, margas y calizas, C4 (Turoniense-Campaniense)
- Formación Benejama, C3 (Turoniense)
- Formación Franco, C2 (Cenomaniense Superior)
- Formación Quesada, C1 (Cenomaniense inferior-medio)
- Formación Utrillas, C0 (Cretácico Inferior)

En los listados que a continuación se proporcionan se recogen las muestras tomadas en las diferentes formaciones, con las coordenadas UTM de cada punto y el tipo de material muestreado (descripción a *visu* en el momento de la toma).

### FORMACIÓN UTRILLAS

ID-Muestra	Litología	Formación	X_UTM	Y_UTM
SO-41	Caliza	C0	697096	4294928

### FORMACIÓN QUESADA

ID-Muestra	Litología	Formación	X_UTM	Y_UTM
SO-27	Caliza	C1	698121	4294326
SO-28	Caliza	C1	697963	4293930
SO-29	Caliza	C1	697971	4293984
SO-30	Caliza	C1	697573	4294116
SO-31	Caliza	C1	697357	4293834
SO-32	Caliza	C1	697360	4294230

SO-33	Caliza	C1	967432	4294313
SO-34	Caliza	C1	697446	4294401
SO-35	Caliza	C1	697425	4294505

#### **FORMACION FRANCO**

<b>ID-Muestra</b>	<b>Litología</b>	<b>Formación</b>	<b>X_UTM</b>	<b>Y_UTM</b>
SO-20	Caliza	C2	708295	4295741
SO-21	Caliza	C2	708322	4295798
SO-22	Caliza	C2	708313	4295859
SO-23	Caliza	C2	708259	4296021
SO-24	Caliza	C2	708162	4295978
SO-25	Caliza	C2	708158	4296096
SO-26	Caliza	C2	708180	4296131
SO-36	Caliza	C2	697389	4294552
SO-37	Caliza	C2	697498	4294694
SO-38	Caliza	C2	697310	4294844
SO-39	Caliza	C2	697138	4294820
SO-40	Caliza	C2	697138	4294820

#### **FORMACION BENEJAMA**

<b>ID-Muestra</b>	<b>Litología</b>	<b>Formación</b>	<b>X_UTM</b>	<b>Y_UTM</b>
SO-10	Caliza	C3	708454	4296199
SO-11	Caliza	C3	708427	4296185
SO-12	Caliza	C3	708335	4296176
SO-13	Caliza	C3	708326	4296156
SO-14	Caliza	C3	708287	4296109
SO-15	Caliza	C3	708273	4296109
SO-16	Caliza	C3	708285	4296161
SO-17	Caliza	C3	708330	4296220
SO-18	Caliza	C3	708290	4296193
SO-19	Caliza	C3	708248	4296174

#### **FORMACIÓN DE CALCARENITAS, MARGAS Y CALIZAS**

<b>ID-Muestra</b>	<b>Litología</b>	<b>Formación</b>	<b>X_UTM</b>	<b>Y_UTM</b>
SO-1	Caliza	C4	703727	4292912
SO-2	Caliza	C4	703689	4292888
SO-3	Caliza	C4	703629	4292795
SO-4	Caliza	C4	703697	4292690
SO-5	Caliza	C4	703716	4292632
SO-6	Caliza	C4	703752	4292592
SO-7	Caliza	C4	703751	4292571
SO-8	Caliza	C4	703854	4292466
SO-9	Caliza	C4	703949	4292437

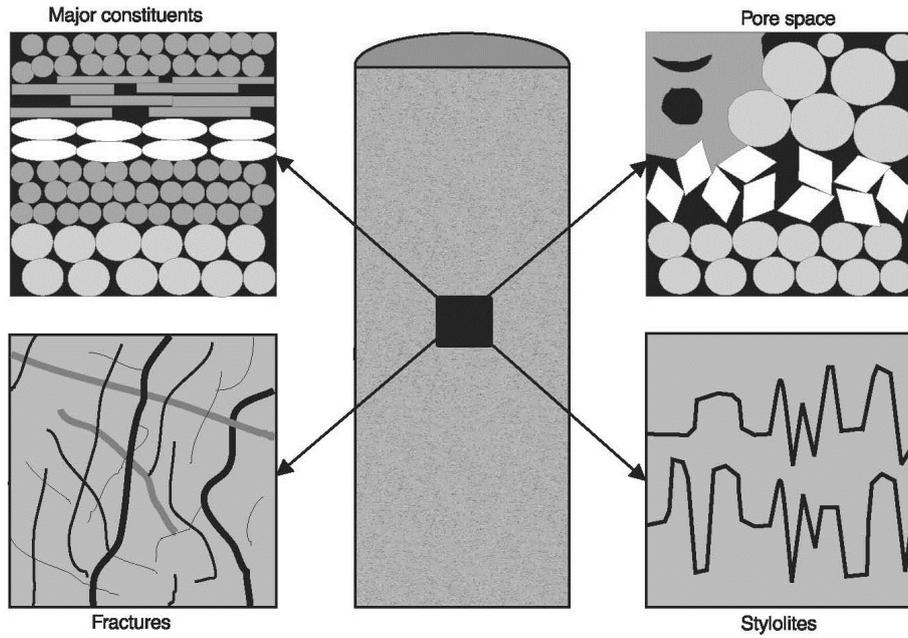
## **2.2. Técnicas de estudio de rocas carbonatadas: preparación de muestras y equipo petrográfico**

El estudio petrológico de las rocas carbonatadas se basa fundamentalmente en el análisis de láminas delgadas mediante microscopía óptica de polarización. En este estudio se ha utilizado un equipo LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada, perteneciente a la Unidad de Granada del Instituto Geológico y Minero de España. El análisis petrográfico de las muestras tomadas consiste en la determinación de los componentes y la mineralogía, así como la proporción relativa de los elementos texturales y diagenéticos en la roca (partículas, cemento, matriz y poros). A partir de esta información hemos clasificado las muestras que hemos tomado según los esquemas propuestos por *Dunham* (1962) y *Folk* (1959, 1962). Estos estudios igualmente incluyen la descripción de la morfología y el tamaño de los poros, necesaria para clasificar las muestras en las *Clases Petrofísicas de Lucia* (1999). La observación se ha realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión de acuerdo con la naturaleza y la preparación de las muestras. Respecto a esta última cuestión, hay que señalar que las láminas delgadas han sido parcialmente teñidas con rojo de alizarina a fin de discriminar la naturaleza del carbonato (calcita o dolomita): el rojo de alizarina tiñe de rojo el calcio de la calcita.

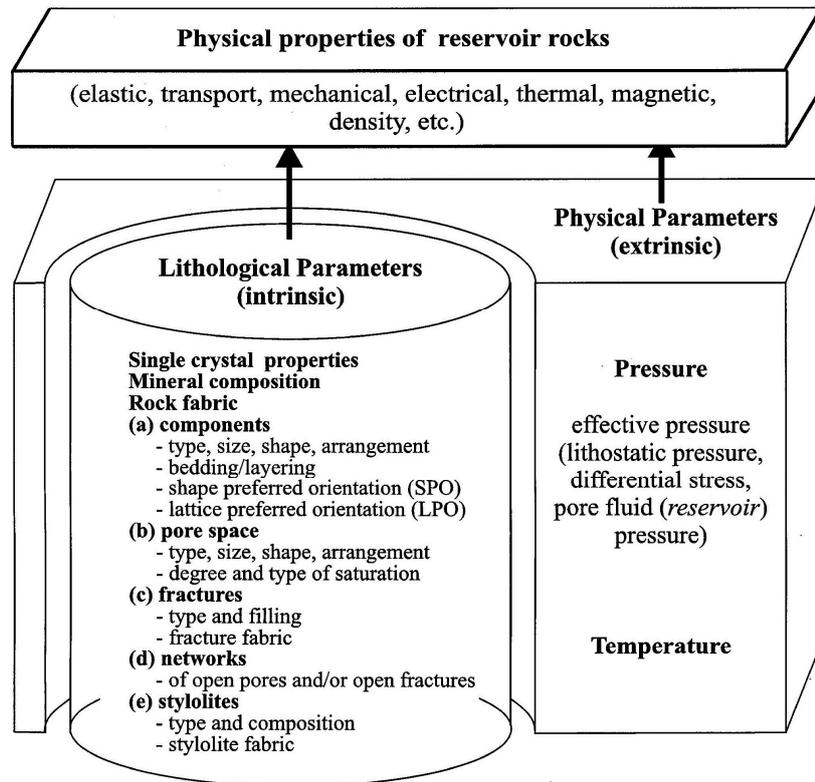
## **2.3. Análisis de las muestras pertenecientes a la zona de estudio**

Existen ciertos parámetros petrográficos que resultan fundamentales para establecer las relaciones entre las características petrográficas y las propiedades físicas de las rocas. En cada una de las muestras estudiadas se han determinado los cuatro componentes principales de la fábrica propuestos por Dürrast and Siegesmund (1999) (Figura 1) que permite establecer la correlación entre la fábrica y las propiedades físicas de las rocas (Figura 2):

- (a) Constituyentes principales: aloquímicos/ortoquímicos
- (b) Espacio poroso y tipo de poros
- (c) Fracturas
- (d) Estilolitos



**Figura 1.** Elementos de la microfábrica en rocas carbonatadas según Dürrast and Siegesmund (1999).



**Figura 2.** Factores que controlan las propiedades físicas de las rocas carbonatadas reservorio (Dürrast and Siegesmund, 1999).

Previo al análisis de los diferentes componentes texturales, definiremos los tipos de fábrica que existen en este tipo de rocas:

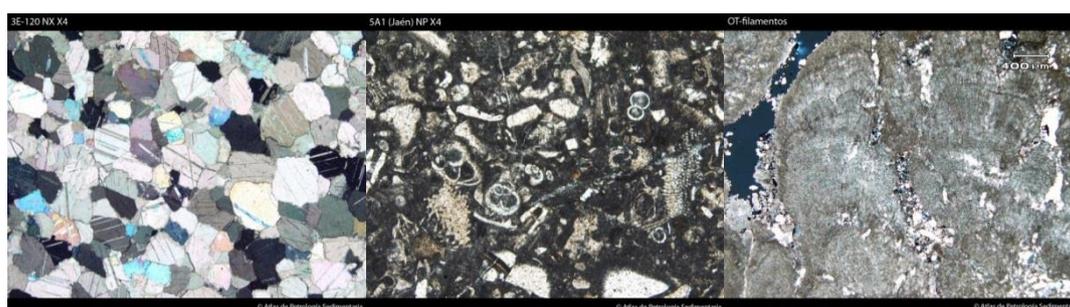
## TIPOS DE FÁBRICA

Tres son los tipos de fábrica *que existen en este tipo de rocas (Figura 3)*:

Fábrica cristalina: constituida por cristales generados por procesos de precipitación directa, recristalización o reemplazamiento (calizas esparíticas, pseudoesparitas, dolomías cristalinas, etc.).

Fábrica clástica: Es la constituida por clastos carbonáticos, tanto intracuencales como extracuencales. Este tipo de fábrica es la común de las calcarenitas, donde los clastos son granos carbonáticos intracuencales (IC). Las rocas detríticas integradas por granos carbonáticos extracuencales (EC) corresponden a sedarenitas calcilita (Folk, 1963)

Fábrica organógena: Es la constituida por bioconstrucciones desarrolladas por organismos coloniales (arrecifes de coral, estromatolitos, etc.)



Fábrica cristalina

Fábrica clástica

Fábrica organógena

**Figura 3.** Tipo de fábricas en rocas carbonatadas.

## COMPONENTES PRINCIPALES DE LA FÁBRICA

### (a) CONSTITUYENTES PRINCIPALES

Los constituyentes principales en las rocas carbonatadas se agrupan en aloquímicos (intraclastos, ooides, granos esqueletales y peloides) y ortoquímicos (matriz y cemento).

La asociación y distribución de los componentes en determinados lechos está controlado básicamente por la deposición y la sedimentación. Estos rasgos están caracterizados por su estructura y textura: variación en composición, tamaño, forma y orientación de las partículas y componentes, así como su empaquetamiento.

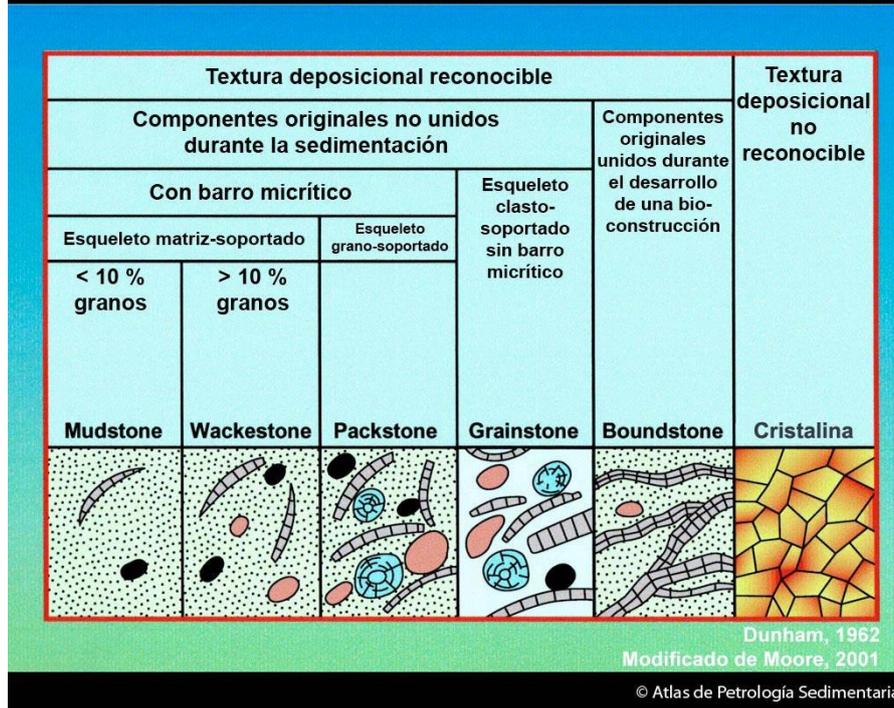
Además, las asociaciones y la distribución de los componentes pueden ser modificadas por procesos secundarios.

En este estudio se ha realizado la determinación y caracterización de los elementos texturales en las diferentes muestras y se ha procedido a la clasificación de las mismas según los esquemas propuestos por *Dunham (1962)*, *Folk (1959, 1962)*. Ambas clasificaciones se basan en la proporción relativa de los elementos texturales y diagenéticos en la roca (partículas, cemento, matriz y poros) así como las características de las partículas versus la matriz.

*Folk (1962)* establece la clasificación de calizas (Figura 4) teniendo en cuenta las proporciones relativas de los tres constituyentes básicos: granos (aloquímicos), matriz micrítica y cemento esparítico (ortoquímicos). Diferencia tres tipos básicos de calizas: aloquímicas (con >10% de granos), micríticas (con <10% de granos) y biolititas. Dentro de las calizas aloquímicas distingue entre: calizas esparíticas (espacio intergranular ocupado por esparita) y calizas micríticas (espacio intergranular ocupado por micrita).

Clasificación de Folk (1962)		Más del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO I y II		Menos del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO III		DOLOMIÁS ROCAS TIPO V			
		Cemento esparítico  TIPO I	Matriz micrítica  TIPO II	De 1 a 10% de aloquímicos	Menos del 1% de aloquímicos	Con "fantasmas" de aloquímicos	Sin fantasmas		
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE ALOQUÍMICOS	Más del 25% de INTRACLASTOS	INTRAESPARITA Intraesparrudita	INTRAMICRITA Intramicrorrudita	Según el aloquímico dominante	MICRITA con Intraclastos	MICRITA BIOLITITO (ROCAS TIPO IV)	Dolomía con Intraclastos		
	Menos del 25% de INTRACLASTOS	Más del 25% de OOIDES (relación de volúmenes de peloides y bioclastos b/p)	OOESPARITA Ooesparrudita		OOMICRITA Oomicorrudita		MICRITA con Ooides	Dolomía con Ooides	
		> 3	BIOESPARITA Bioesparrudita		BIOMICRITA Biomicorrudita		MICRITA con Bioclastos	Dolomía con Bioclastos	
			3 - 1/3		BIOPELESPARITA		BIOPELMICRITA	MICRITA con Peloides	Dolomía con Peloides
			< 1/3		PELESPARITA		PELMICRITA		
						DOLOMIÁS			

Figura 4. Clasificación de rocas carbonatadas según esquema propuesto por Folk (1962).



**Figura 5.** Clasificación de rocas carbonatadas según esquema propuesto por Dunham (1962).

Dunham (1962) distingue dos tipos generales de carbonatos (rocas y sedimentos carbonáticos): (1) los que presentan textura deposicional reconocible, y (2) los que presentan textura cristalina, no siendo posible reconocer la textura deposicional (Figura 5).

En este estudio se ha determinado igualmente la morfología y el tamaño de los poros, y la existencia y distribución de fisuras en las muestras estudiadas. Esto nos permitirá establecer la correlación entre la fábrica de las rocas carbonatadas y las propiedades físicas (Dürrast and Siegesmund, 1999). Como apuntábamos anteriormente, para tales determinaciones se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada. La observación se ha realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión.

### (b) ESPACIO POROSO Y TIPO DE POROSO

Se denomina *porosidad* al conjunto de los espacios vacíos que posee una roca y, en su sentido más amplio, la porosidad puede ser contemplada bajo dos puntos de vista: como un componente petrográfico o textural, o como una propiedad física de la roca.

Las calizas y las dolomías presentan un sistema poroso notablemente complejo, tanto desde el punto de vista físico como genético. La indicada complejidad física-relativa a la geometría de los poros-es consecuencia fundamentalmente de su complicada génesis. Así, la porosidad de estas rocas es típicamente poligénica, consecuencia tanto de las distintas etapas en que pueden desarrollarse los poros, como de los diversos procesos implicados en su formación.

Desde el punto de vista petrográfico se trata de un componente más de la roca que posee unas características texturales: forma, tamaño, distribución (orientación, homogeneidad...). Su estudio se realiza normalmente por métodos directos a distintas escalas. En este estudio se ha procedido a una observación de visu y la microscopía óptica de polarización. La microscopía óptica de polarización es un método indicado para vacíos superiores a 10  $\mu\text{m}$  (la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5  $\mu\text{m}$ ). Por tanto, es importante destacar la baja capacidad de resolución de esta técnica para poros por debajo de 1  $\mu\text{m}$ . En este sentido, la determinación de la porosidad más fina, que requiere la utilización de técnicas complementarias (Microscopía Electrónica de Barrido y Análisis Digital de Imagen), por ahora no será estimada en este estudio.

Según varios autores (Archie, 1950; Bertrand, 1969; Elf-Aquitaine, 1977; Selley, 1982; Bourbie et al, 1987) la porosidad constituye el parámetro petrográfico fundamental cuando se trata de establecer relaciones entre las características petrográficas y las propiedades físicas de la roca, lo que se conoce como *análisis petrofísico*.

*Lucia (1983, 1995, 1999)* añade un nuevo punto de vista petrofísico a la clasificación del espacio poroso: la distribución de los tamaños de poro que controla la porosidad, permeabilidad y saturación, y está relacionado con la fábrica de la roca. Para relacionar la fábrica con la distribución del tamaño de poro es importante determinar si el espacio poroso pertenece a una de las tres clases principales de tipo de poro, que se basan en distinguir si el poro está entre las partículas o dentro de las mismas: (a) *Espacio poroso interpartícula*; (b) *Vuggy pore space: separate vug pores y touching-vug pores*.

#### (a) *Espacio poroso interpartícula*

Se define también como porosidad abierta, conectada o efectiva de la roca y representa el volumen de poros con cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. En ausencia de vuggy porosity, la distribución de tamaños de poro en rocas carbonatadas puede ser descrita en términos de tamaño de partícula, clasificación y porosidad interpartícula (Figura 6).

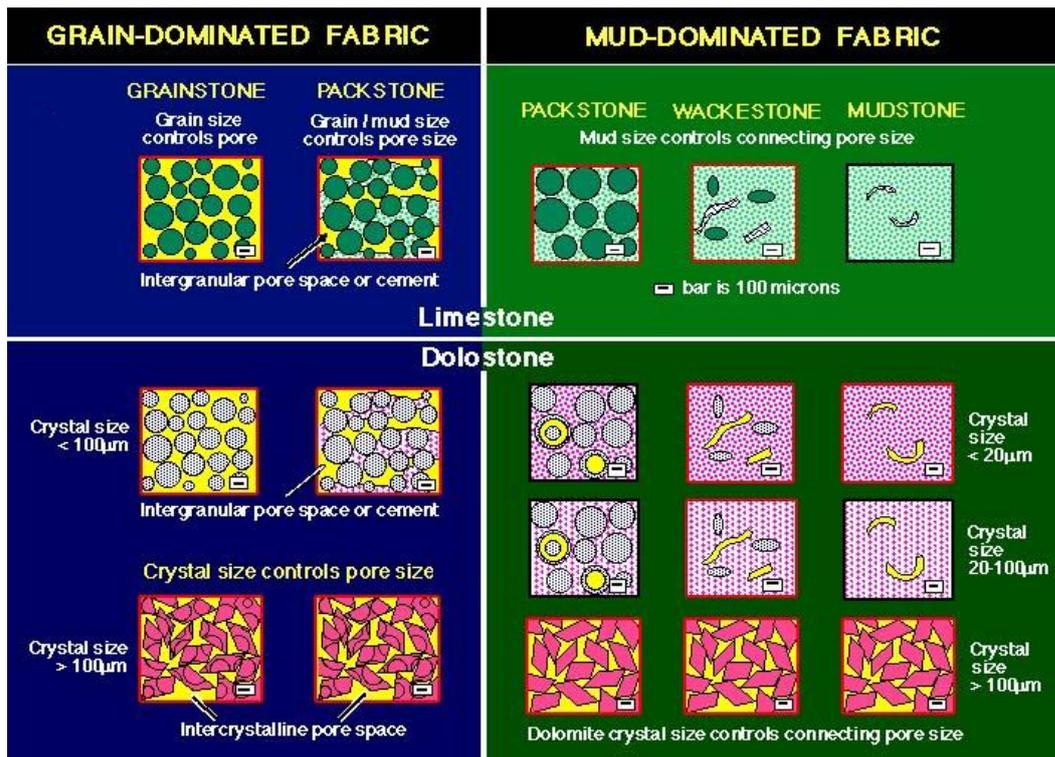
En vez de dividir la fábrica en grano-soportada o lodo-soportada según la clasificación de Dunham (1962) se divide en fábrica grano-dominado y lodo-dominado. Los atributos más importantes de la fábrica grano-dominada son la presencia de de la porosidad interpartícula abierta o cerrada y una textura grano-soportada. El atributo más importante de la fábrica lodo-dominada es que las áreas entre los granos están rellenas con lodo incluso si los granos parecen formar una estructura de soporte.

Lucía (1999) determinó tres clases petrofísicas definidas por la permeabilidad y la saturación en agua.

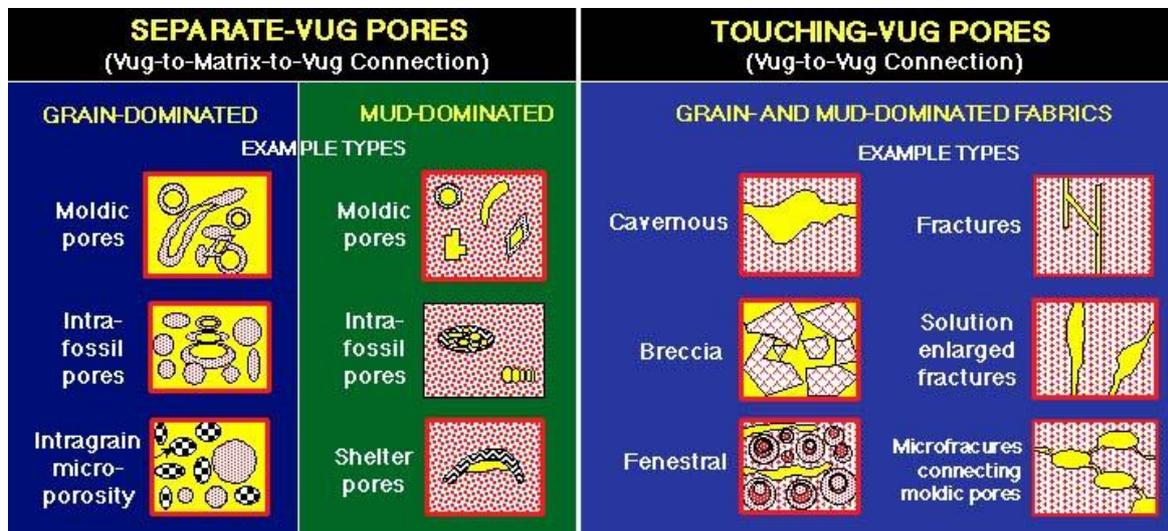
(b) *Vuggy pore space: separate vug pores y touching-vug pores.*

La adición del vuggy pore space al espacio poroso interpartícula altera las características petrofísicas por la alteración en la manera en que el espacio poroso está conectado. *Separate vug pore space* se define como el espacio poroso dentro de las partículas o que es significativamente más grande que el tamaño de partícula (generalmente dos veces el tamaño de partícula) e interconectado sólo a través del espacio poroso interpartícula. *Touching-Vug Pore Space* es el espacio poroso que es significativamente mayor que el tamaño de partícula y forma un sistema poroso interconectado de significativa extensión (Figura 7).

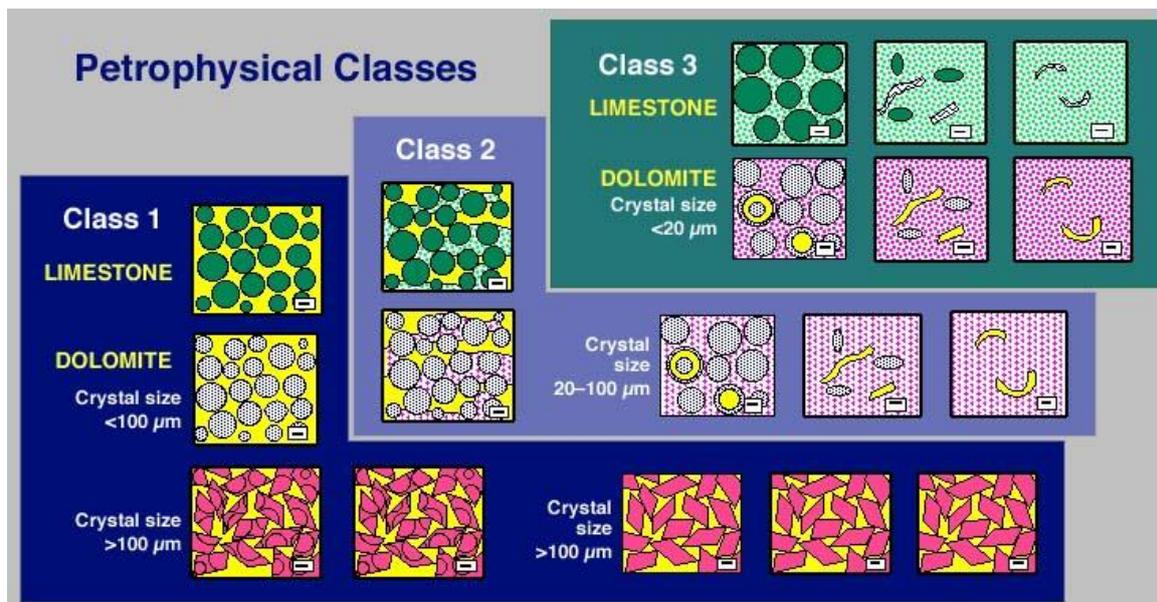
Para relacionar la fábrica de las rocas carbonatadas con la distribución del tamaño de poros es importante determinar si el espacio poroso pertenece a uno de los tres tipos principales de poros según Lucia (1983, 1999): interpartícula, separate-vug and touching vug. Para el primer grupo Lucia (1995) determinó tres clases petrofísicas (Clase 1, Clase 2, Clase 3) definidos por ciertos campos según la permeabilidad y la porosidad interpartícula (Figura 8).



**Figura 6.** Clasificación geológica/petrofísica del espacio poroso interpartícula en rocas carbonatadas basada en el tamaño y clasificación de granos y cristales. El volumen del espacio poroso interpartícula es importante porque se relaciona con la distribución tamaño-poro.



**Figura 7.** Clasificación geológica/petrofísica del vuggy pore space basado en la interconexión vug espacio.



**Figura 8.** Bloque diagrama que ilustra la relación entre la fábrica de la roca y las clases petrofísicas.

### (a) FRACTURAS

En la clasificación de Lucia (1995) las fracturas son un tipo de touching-vug pores puesto que contribuye notablemente a la permeabilidad en muchos reservorios carbonatados y, por tanto, en la clasificación petrofísica del espacio poroso. Golf-Racht (1996) presenta una clasificación descriptiva de las fracturas en las siguientes categorías: (a) fracturas abiertas/cerradas; (b) micro-/macro- fracturas; y (c) facturas inducidas/naturales. En este estudio se sacan de la porosidad porque pueden igualmente contribuir a la anisotropía como a la porosidad y la permeabilidad.

### (b) ESTILOLITOS

En rocas carbonatadas los estilolitos son rasgos diagenéticos comunes, y su origen es independiente de la facies y de la edad geológica (Nelson 1985; van Golf-Racht 1996). Generalmente son planos irregulares de discontinuidad con una orientación de la vertical a la horizontal. Está aceptado de forma general que los estilolitos son el resultado de los procesos de presión-concentración o de presión-disolución. Ambos procesos están controlados principalmente por la solubilidad de los componentes y partículas en la roca, y por los campos regionales de stress (Nelson, 1985).

Existe una clasificación de estilolitos de Logan and Semeniuk (1976) respecto a la configuración, paragénesis, fábrica y estructura de los fenómenos de disolución.



### **3. RESULTADOS**

A continuación se expondrán los resultados que han derivado del estudio de las muestras en lámina delgada por la técnica de microscópica de luz transmitida con microscopio de polarización: (a) estudios petrográficos de las muestras más representativas de las diferentes formaciones en el acuífero estudiado; (b) tablas resultado

#### **(a) Estudios petrográficos**

A continuación se recogen los estudios petrográficos de las muestras más representativas de las diferentes formaciones en el acuífero de Solana. En cada uno de estos estudios se ha incluido el tipo de microfábrica, los componentes de la misma y su clasificación según los esquemas de Dunham, así como las clases petrofísicas descritas por Lucia (1988). En todas ellas se ha incluido una microfotografía sobre las que se han realizado medidas de espacios vacuolares. En algunos casos también se han incluido comentarios en el campo de observaciones cuando ha sido necesario aclarar ciertas cuestiones referentes a la naturaleza de las muestras estudiadas.

SO-27

Formación Quesada

FÁBRICA: Dolopackstone

CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA: Clase Petrofísica 2

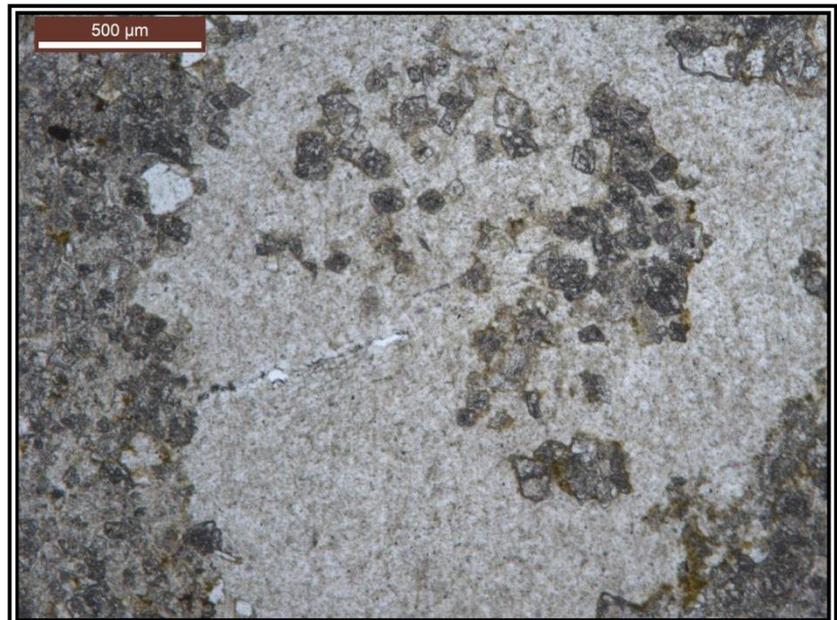
VUGGY POROSITY: Ocasional

FRACTURAS Y ESTILOLITOS: Fracturas selladas casi en su totalidad

Figura 1: Detalle de la porosidad vacuolar, tamaños en torno a 0,1 mm. Microfractura sellada en su totalidad



Figura 2: Detalle del proceso de dolomitización, dolomita está reemplazando a la calcita.



OBSERVACIONES: Porosidad abierta del 0,7%, Vuggy porosity muy localizada

SO-28

Formación Quesada

FÁBRICA: Dolograinstone

CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA: Clase Petrofísica 1

VUGGY POROSITY: Porosidad vacuolar presente en la lamina de forma generalizada

FRACTURAS Y ESTIOLITOS: Microfracturas sin sellar

Figura 1: Detalle de la porosidad vacuolar, en un dolograinstone.

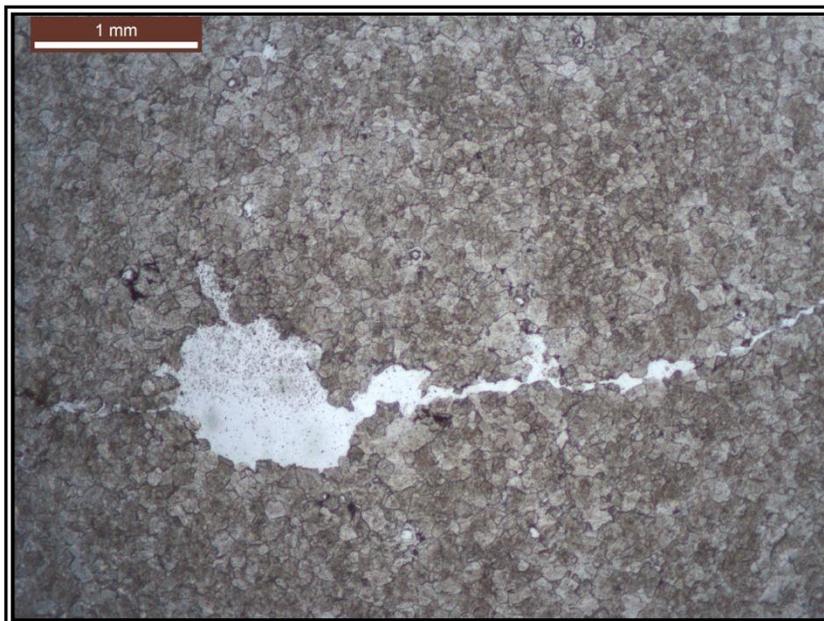


Figura 2: Microfractura con engrosamientos vacuolares

OBSERVACIONES: Porosidad abierta del 4,0%

SO-34

Formación Quesada

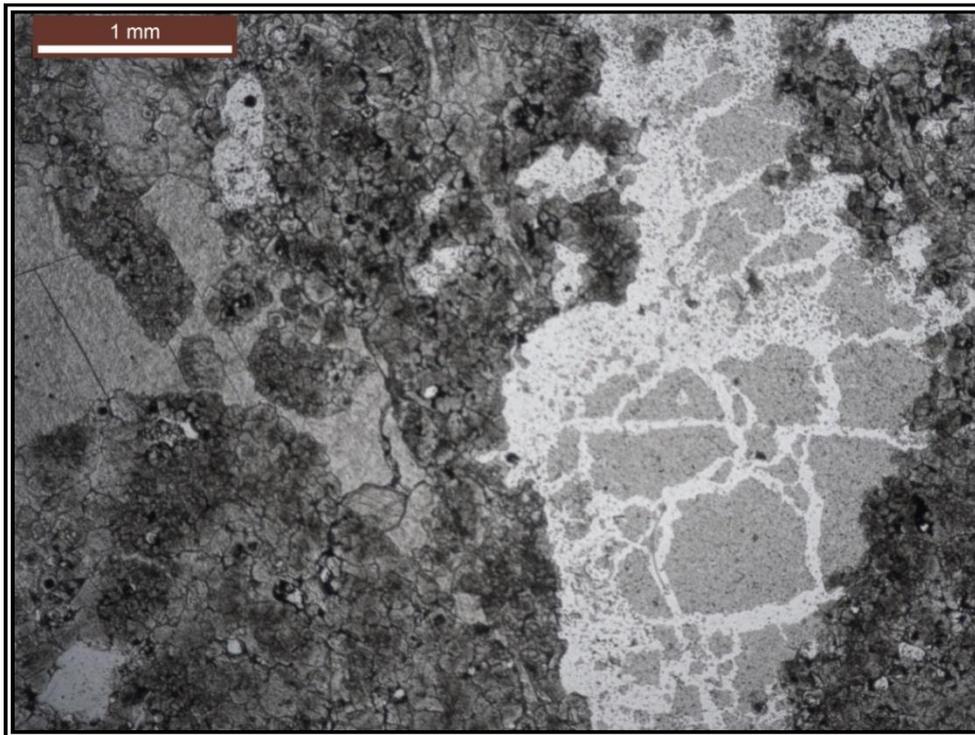
FÁBRICA: Dolograinstone

CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA: Clase Petrofísica 1

**VUGGY POROSITY:** Roca de alta porosidad debido a la los poros vacuolares. Se trata de poros secundarios formados fundamentalmente en una etapa tardía de la diagénesis por procesos de disolución.

**FRACTURAS Y ESTILOLITOS:** fractura de tamaño considerable sellada con carbonatos.

Figura 1: Porosidad alta debido a la presencia de vacuolas (parte derecha foto) también cristales de calcita rellenando una fractura (parte izquierda arriba).



**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 8,2%.

**SO-03**

**Formación de Calcarenitas+margas+calizas**

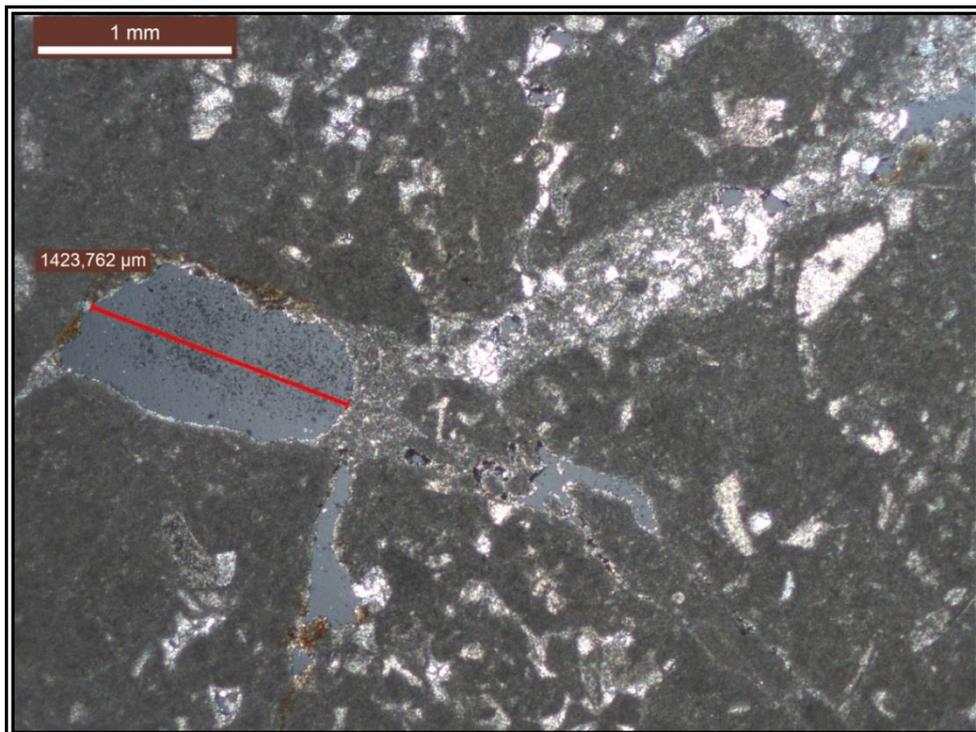
**FÁBRICA:** Wackestone, matriz micrítica

**CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA:** Clase Petrofísica 3

**VUGGY POROSITY:** Vacuolas generadas por la disolución de materiales previos. Queda una orla teñida en torno a las mismas.

**FRACTURAS Y ESTILOLITOS:** Fracturas selladas casi en su totalidad

Figura 1: Detalle de la porosidad vacuolar, tamaños en torno a 1,5 mm. Algunos espacios porosos (derecha) con precipitado de calcita



**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 10,2%,

**SO-05**

**Formación de Calcarenitas+margas+calizas**

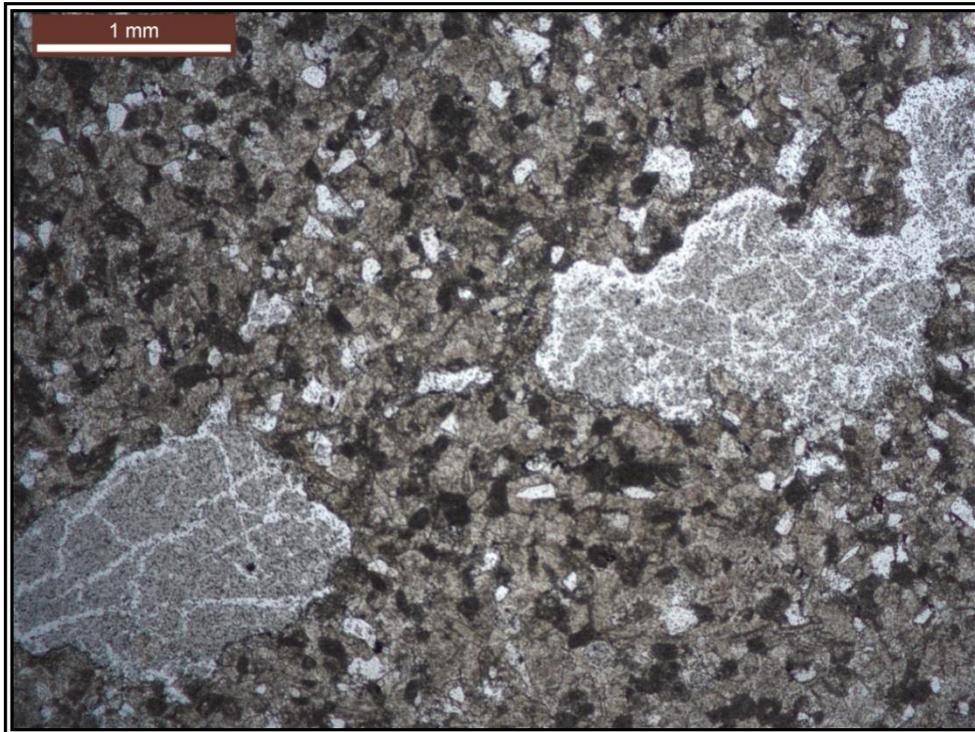
**FÁBRICA:** Packstone. Cemento esparítico y algo de matriz micrítica . Componentes: bioclastos escasos (foraminíferos, albeolinidos) No esqueléticos: peloides, granos de cuarzo

**CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA:** Clase Petrofísica 2

**VUGGY POROSITY:** Vuggy porosity generalizada en la lamina. Algunas vacuolas superan los varios mm.

**FRACTURAS Y ESTILOLITOS:** Fracturas selladas casi en su totalidad

Figura 1: Detalle de la porosidad vacuolar, tamaños en torno al mm.



**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 0,10,6%, Vuggy porosity muy localizada

SO-07

**Formación de Calcarenitas+margas+calizas**

**FÁBRICA:** Packstone Cemento esparítico abundante y matriz micrítica . Componentes: bioclastos dominante frente al los no esqueléticos (foraminíferos, albeolinidos)No esqueléticos: peloides

**CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA:** Clase Petrofísica 2

**VUGGY POROSITY:** Vuggy porosity accesoria

**FRACTURAS Y ESTIOLITOS:** No presenta

Figura 1: Panorámica de la lámina.

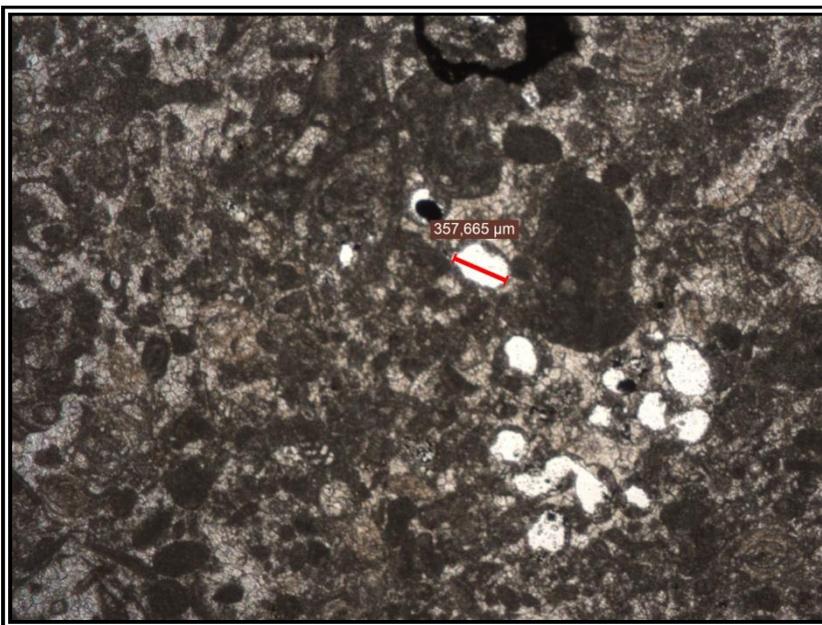
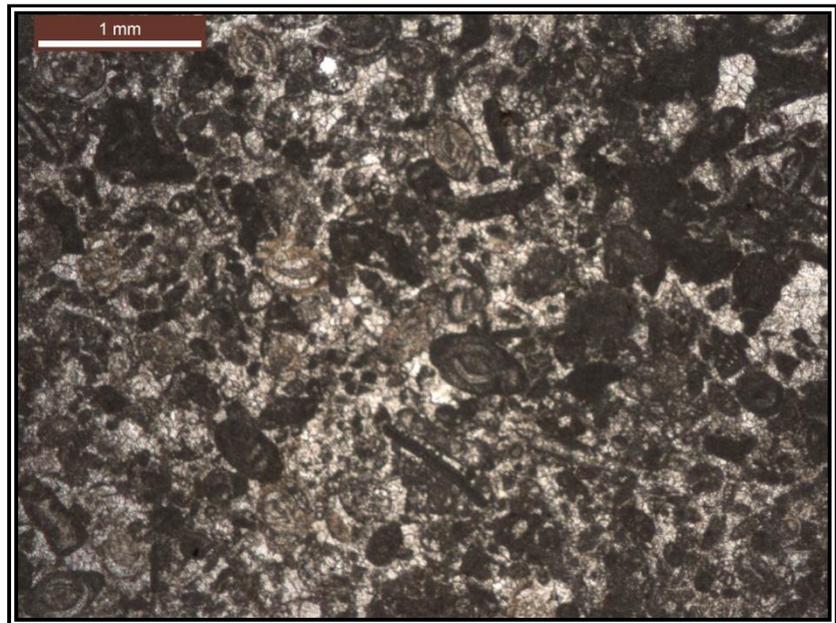


Figura 2: Espacios vacuolares, formas subredondeados y tamaños de 0,3-0,5 mm .

**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 10,6%, Vuggy porosity muy localizada

**SO-41**

**Formación Utrillas**

**FÁBRICA:** Mudstone

Matriz micrítica

**CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA:** Clase Petrofísica 3

**VUGGY POROSITY:** MUESTRA altamente porosa.

**FRACTURAS Y ESTILOLITOS:** Microfracturas presentes abiertas

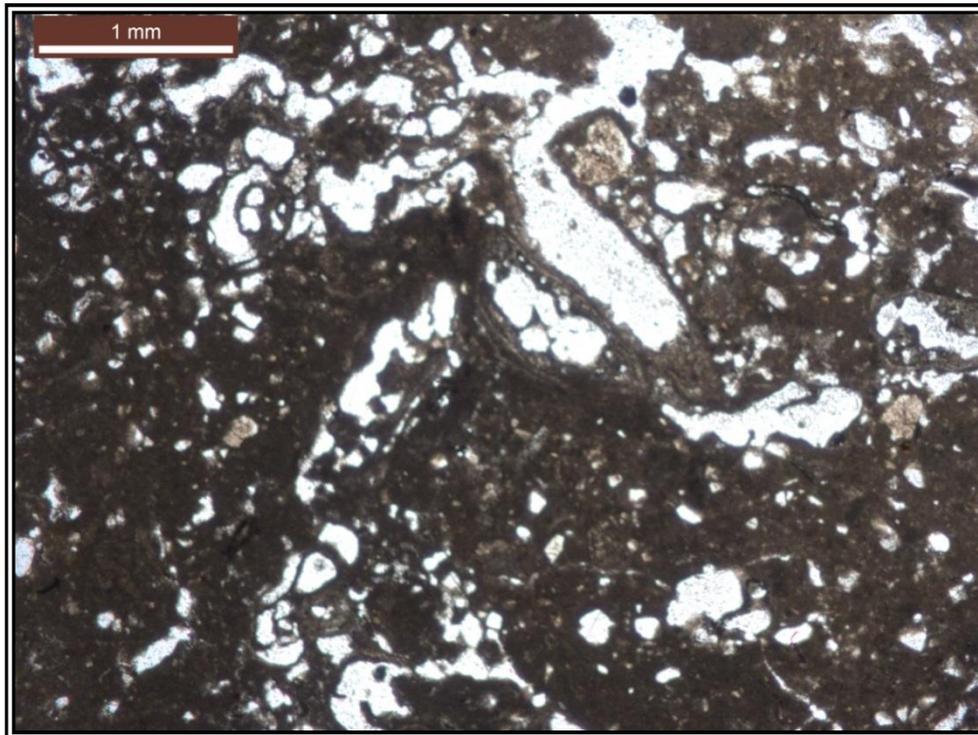


Figura 1: Panorámica de la muestra donde se aprecia su alta porosidad, espacios muy irregulares con tamaños variables. Continúa en toda la lámina.

**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 32,9%

SO-23

Formación Franco

FÁBRICA: Mudstone

CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA: Clase Petrofísica 3

VUGGY POROSITY: Vuggy porosity de gran tamaño. Dispersa en la lámina.

FRACTURAS Y ESTIOLITOS: Algunas microfracturas selladas

Figura 1: Vacuola de varios mm en

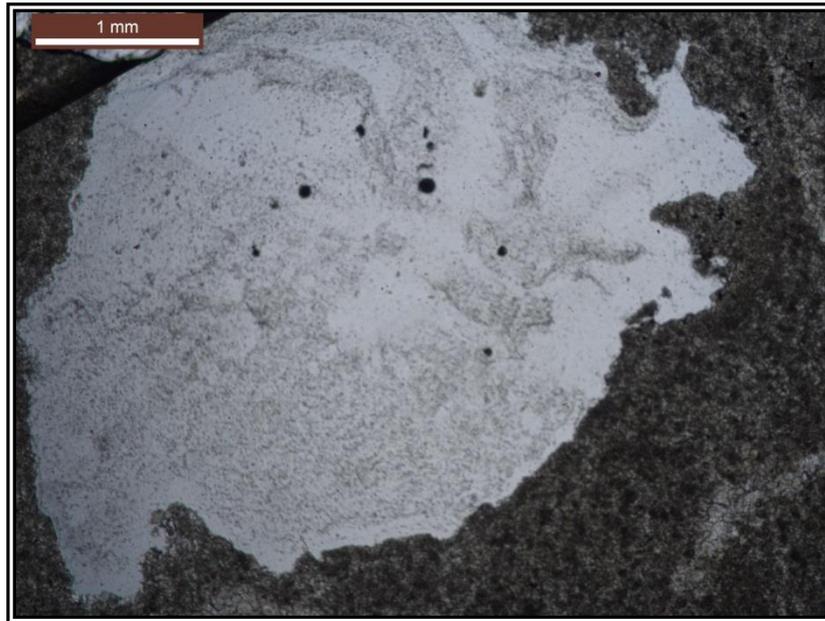


Figura 2: Algunos rellenos de microfracturas incompletos. Detalle de un poro abierto



OBSERVACIONES: Porosidad abierta del 23,1%,

**SO-24**

**Formación Franco**

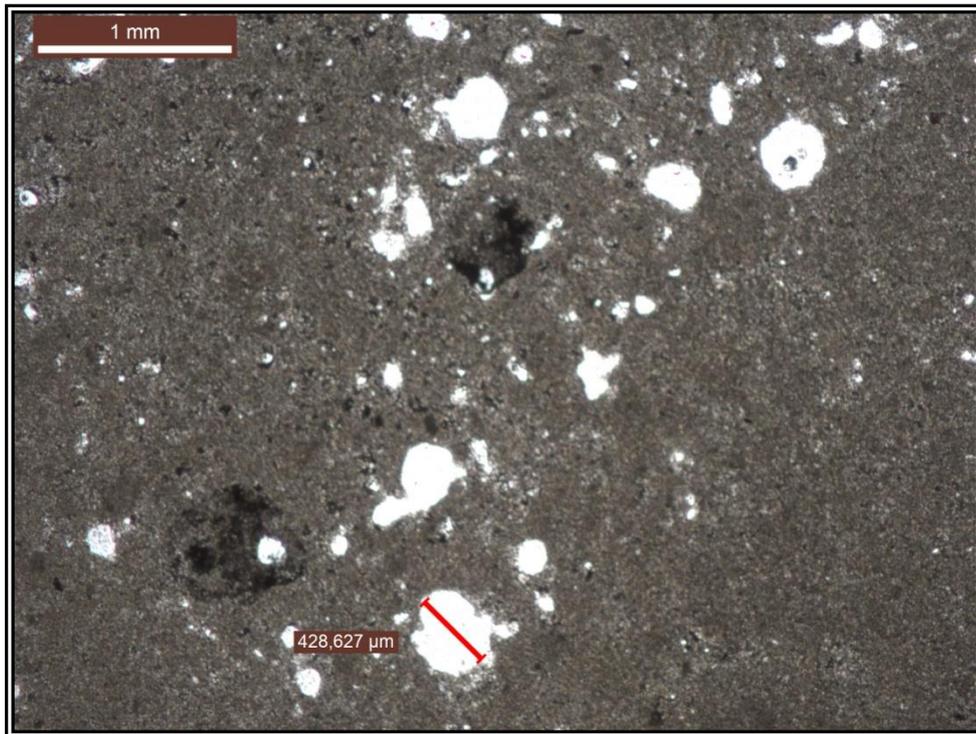
**FÁBRICA:** Mudstone, matriz micrítica

**CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA:** Clase Petrofísica 3

**VUGGY POROSITY:** Vuggy porosity muy generalizada en la lamina. Tamaño medio, formas redondeadas

**FRACTURAS Y ESTILOLITOS: NO PRESENTES**

Figura 1: Vacuola de formas subredondeadas, en torno a 0,4-0,5 mm.



**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 3 %,

**SO-25**

**Formación Franco**

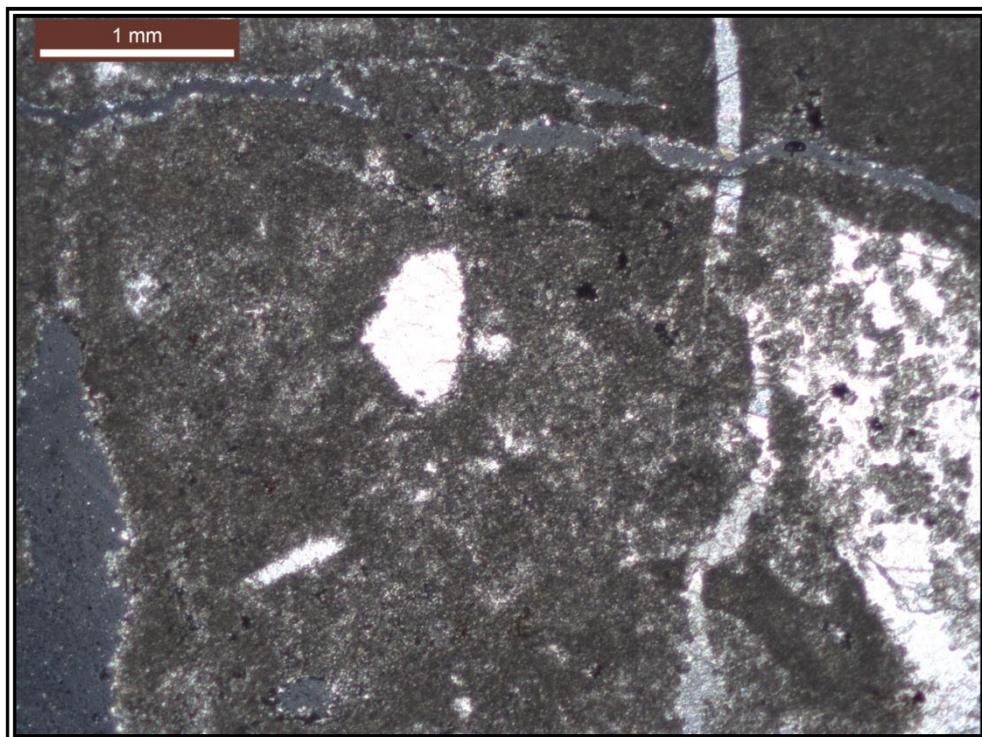
**FÁBRICA:** Mudstone

**CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA:** Clase Petrofísica 3

**VUGGY POROSITY:** Porosidad vacuolar abundante, de tamaño muy variable, aunque predominan los de mayor tamaño. .

**FRACTURAS Y ESTILOLITOS:** Microfracturas parcialmente selladas .Otras, totalmente abiertas.

Figura 1: Detalle de la microfracturación (horizontal abierta, vertical sellada) y espacios abiertos de mas de 1 mm. (zona izquierda de la lámina)



**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 11,4%,

**SO-16**

**Formación Benejama**

**FÁBRICA:** Dolopackstone grano-dominado

**CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA:** Clase Petrofísica 2

**VUGGY POROSITY:** Presente en la lamina

**FRACTURAS Y ESTILOLITOS:** Microfracturas parcialmente selladas .Otras, totalmente abiertas.

Figura 1: Detalle de la microfracturación

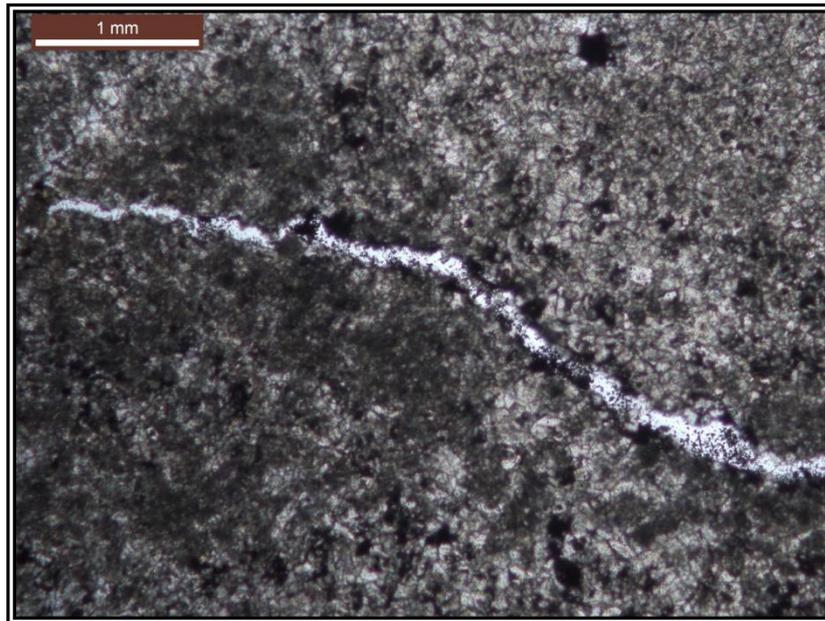


Figura 2: Detalle de touching vuggy porosity



**OBSERVACIONES:** Porosidad abierta del 5,3%,

**(b)Tabla de resultados**

En la **tabla 1** se recoge, a modo de resultado, cada una de las muestras clasificadas según el esquema de Dunham (1962) y las clases petrofísicas a las que pertenecen según Lucía (1998), espacio poroso y fracturas y estilolitos

Muestra	Formación	Fabrica	Clasificación Petrofísica	Vuggy porosity	Fracturas y estilolitos	Interpar. porosity (%)
SO-27	C1	Dolopackstone	CLASE 2	Ocasional	Fracturas selladas casi en su totalidad	0,7
SO-28	C1	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar de desaparición de posibles cristales previos. Generalizado en la lamina	Microfracturas irregulares sin sellar	4,0
SO-29	C1	Dolograinstone	CLASE 1	Accesoría	Microfracturas selladas	2,3
SO-30	C1	Dolopackstone	CLASE 2	Bastante fracturada aunque las fracturas están selladas de posterior calcita. Tamaño de grano muy heterogéneo		5,3
SO-31	C1	Dolograinstone	CLASE 1	Alguna vacuola totalmente accidental		5,1
SO-32	C1	Dolopackstone	CLASE 2	Espacios abiertos en los que ha precipitado calcita parcialmente, dejando visibles oquedades en la misma. Parece haber pellets que parcialmente parecen haber resistido a la dolomitización.	Microfracturas abiertas	7
SO-33	C1	Dolopackstone	CLASE 2			2,6
SO-34	C1	Dolograinstone	CLASE 1	Roca de alta porosidad debido a la los poros vacuolares. Se trata de poros secundarios formados fundamentalmente en una etapa tardía de la diagénesis por procesos de disolución.	También fractura de tamaño considerable sellada con carbonatos.	8,2
SO-35	C1	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar accesoría y localizada	Fracturas selladas con precipitados de calcita	6,9
SO-1	C4	Packstone Cemento esparítico con algo de matriz micrítica	CLASE 2	Puntual ,según zonas		2,6
SO-2	C4	Packstone Cemento	CLASE 2		Microfracturas selladas	2,5
SO-3	C4	Wackestone Matriz micrítica	CLASE 3	Numerosas vacuolas generadas por la disolución de materiales previos. Queda una orla teñida en torno a las mismas.		10,2
SO-5	C4	Packstone Cemento esparítico y algo de micrita	CLASE 2	Vuggy porosity generalizada en la lamina. Algunas superan los varios mm.		10,6
SO-6	C4	Wackestone Matriz micrítica	CLASE 3	No observada		2,1
SO-7	C4	Packstone	CLASE 2	Porosidad vacuolar accesoría		0,5
SO-8	C4	Packstone Cemento esparítico abundante y matriz micrítica muy escasa.	CLASE 2	Porosidad vacuolar accesoría		4,4
SO-9	C4	Packston/ Wakestone	CLASE 3	Vuggy porosity presente en la muestra, generalizada.		11,6
SO-10	C3	Wackestone Matriz micrítica	CLASE 3	No presenta	Microfracturas selladas y	1,6

					espacios rellenos con precipitado de carbonato	
SO-11	C3	Packstone	CLASE 2	No presenta		0,8
SO-12	C3	Mudstone	CLASE 3	No presenta		1,3
SO-13	C3	Dolograinstone	CLASE 1	No presenta		1,5
SO-14	C3	Wackestone	CLASE 3	No presenta		3,7
SO-15	C3	Dolopackstone grano-dominada	CLASE 2	No presenta	Alguna microfractura cementada	6,1
SO-16	C3	Dolopackstone grano-dominada	CLASE 2	Vuggy porosity	Microfracturas abiertas.	5,3
SO-17	C3	Dolopackstone grano-dominada	CLASE 2	No presenta	Microfracturas selladas	0,5
SO-18	C3	Dolopackstone grano-dominada	CLASE 2	Algunas vacuolas, pequeño tamaño, accesorias		1,1
SO-19	C3	Dolograinstone	CLASE 1		Algunas microfracturas selladas	5,3
SO-20	C2	Mudstone Matriz micrítica Arcillas dolomíticas	CLASE 3	Porosidad vacuolar de pequeño tamaño dispersa en la lámina.	Microfracturas parcialmente selladas	4,5
SO-21	C2	Packstone Matriz micrítica Bioclastos muy transformados	CLASE 3	Concentración de vacuolas de gran tamaño. Muy irregulares		6
SO-22	C2	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 3	Vuggy porosity muy generalizada en la lamina. Diferentes tamaños y formas tanto irregulares como redondeadas		10,7
SO-23	C2	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 3	Vuggy porosity de gran tamaño. Dispersa en la lámina.	Algunas microfracturas selladas	23,1
SO-24	C2	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 3	Vuggy porosity muy generalizada en la lamina. Tamaño medio, formas redondeadas		3
SO-25	C2	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 2	Porosidad vacuolar abundante, de tamaño muy variable, aunque predominan los de mayor tamaño. .	Microfracturas parcialmente selladas .Otras, totalmente abiertas.	11,4
SO-26	C2	Dolopackstone grano-dominada	CLASE 1	Roca recristalizada y con accesoria porosidad		1,3
SO-36	C2	Dolopackstone grano-dominada	CLASE 3	Vuggy porosity abundante		6,2
SO-37	C2	Dolograinstone	CLASE 3	Alta porosidad. Grandes espacios abiertos.		1,6
SO-38	C2	Dolograinstone	CLASE 2	Espacios vacuolares abiertos.	Microfracturación sin sellar	9
SO-39	C2	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 1	Vuggy porosity de tamaño controlado y continuo. Formas redondeadas. Porosidad alta		27
SO-40	C2	Packstone	CLASE 3	Roca parcialmente recristalizada.	Amplias fracturas parcialmente selladas por calcita.	2,5
SO-41	C0	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 3	Altamente poroso. Vuggy porosity ,muy alta,	Presencia de abundantes microfracturas	32,9

Tabla 1. Clasificación de microfacies y clase petrofísicas de las muestras del acuífero Solana.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las muestras que han sido estudiadas del acuífero de Solana conservan parcialmente la textura deposicional, lo que nos permite clasificarlas según los esquemas propuestos por Folk o Dunham. Algunas formaciones muestran un proceso de dolomitización generalizado, es el caso de la Formación Quesada y la Formación Benejama, en las que la textura original esta transformada.

Generalmente estamos ante muestras de porosidad muy variable, tanto entre formaciones como dentro de las mismas. Así se deduce de las observaciones mediante microscopía de transmisión y los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta (0,5m(%) m32,9). La porosidad abierta es la determinante desde el punto de vista de la roca como almacén de fluidos. Tenemos que tener en cuenta que la microscopía óptica de polarización es un método indicado para vacíos superiores a 10  $\mu\text{m}$  (la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5  $\mu\text{m}$ ). Por tanto, es importante resaltar la baja capacidad de resolución de la esta técnica para poros por debajo de 1  $\mu\text{m}$ . Como consecuencia de esto, la determinación de la porosidad más fina requiere la utilización de técnicas y medidas complementarias (Microscopía Electrónica de Barrido y Análisis Digital de Imagen), que recomendamos hacer en futuros estudios. Por otro lado, las microfracturas y los espacios porosos vacuolares son frecuentes en las láminas estudiadas y se identifican fácilmente, si bien en algunos casos aparecen muy localizadas, en general están presentes como elemento textural común. Las microfracturas de sellado completo o parcial que suelen presentar las láminas estudiadas repercute en la porosidad final de la muestra.

Por formaciones o edades, obtenemos los siguientes datos:

- **Formación Utrillas:** solo se ha estudiado una muestra de esta formación, por lo que la representatividad de la misma está muy limitada. Se trata de un mudstone, clase petrofísica 3, con espacios vacuolares heterogéneos en cuanto al tamaño y muy continuos en toda la lámina, y microfracturas abiertas abundantes.
- **Formación Quesada:** se trata de un paquete dolomitizado, con fábricas entre dolograinstone y dolopackestone, y por tanto clases petrofísicas 1 y 2. Los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta se mueven en los valores de 0,7 m(%) m8,2. Presencia de microfracturas generalmente selladas, si no en su totalidad, si parcialmente. Espacios vacuolares presentes,

frecuentemente ocasionales, con tamaños muy variables, alcanzando en algunos caso varios mm de diámetro.

- **Formación Franco:** formación compuesta tanto por paquetes dolomitizados como por facies más lodosas parcialmente dolomitizadas. Predominan los mudstone, con generalizada porosidad vacuolar, alcanzando incluso varios mm y microfracturas abiertas. En los dolopackstone también con frecuentes los espacios vacuolares generalmente, sin llegar al mm de diámetro, con formas subredondeadas. Los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta se mueven en los valores de 1,3 m(%) m27. Clases petrofísicas 2 y 3
- **Formación Benejama:** formación heterogénea en cuanto a la fábrica de las muestras estudiadas, con algunos paquetes también dolomitizados. Clases petrofísicas 1, 2 y 3. Los espacios vacuolares son muy accesorios en general y la microfracturación es escasa y aparece sellada. Los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta se mueven en los valores de 0,8 m(%) m6,1.
- **Formación calcarenitas+margas+calizas (Cretácico Superior):** formación con facies packestone y mudstone, y por tanto clases petrofísicas 2 y 3. Porosidades variables, los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta se mueven en los valores de 0,5 m(%) m11,6. .Al microscopio se observa una vuggy porosity generalizada en algunos casos, mientras que en otras es muy accesorio. La microfracturación es prácticamente inexistente.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archie, G.E., 1950. Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 36: 278-298.
- Bertrand, J.P., 1969. Cours de petrography, apliquee a l.étude des problemas petroliers. Tome 1: Etude des roches. Technip, Paris, 130 p.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Am. Assoc. Petrol. Geol Mem 1*: 108-121.
- Dürrast, H. and Siegesmund, S., 1999. Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rocks. *Int. Journ. Earth Sciences*, 88: 392-408.
- Elf-Aquitaine, 1977. Essai de caracterisation sedimentologique: des depats carbonates. 2. Elements d'interpretation. Elf-Aquitaine, Bousens et Pau, 230 p.
- Folk, R. L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *Am. Assoc. Petrol.Geol. Bull*, 43: 1-38.
- Folk, R. L., 1969. Spectral subdivision of limenstone types. *Am. Assoc. Petrol. Geol Mem 1*: 62-84.
- Logan, B. W and Semeniuk, V. (1976). Dynamic metamorphism, processes and products in Devonian carbonate rocks, Canning Basin, Western Australia. *Geol. Soc. Austral. Spec Publ.* 6: 1-183.
- Lucia, F. J., 1983. Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space. *J. Petrol Tech.*, 35: 626-637.
- Lucia, F. J., 1995. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 79: 1275-1300.
- Lucia, F. J., 1999. Carbonate reservoir characterization. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 1-226.
- Nelson, R. A., 1985. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. Gulf Publishing, Houston, pp 1-320.
- Selley, R. C., 1982. An introduction to sedimentology. Academic Press, London, 417 pp.
- Van Golf-Racht, TD., 1996. Naturally fractured carbonate reservoirs. In: Chilingarian GV, Mazullo SJ; Rieke HH (eds) Carbonate reservoir characterization: a geologic-engineering analysis, part II. Elsevier, Amsterdam, pp 683-771.



## ANEXO III. ANÁLISIS DE LABORATORIO

### INFORME DE LABORATORIO Nº 13/0099

#### 1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.

Se han recepcionado en el centro de laboratorios del IGME 40 muestras<sup>1</sup> identificadas por el solicitante con la siguiente referencia.

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO
SO-1	4339-01
SO-2	4339-02
SO-3	4339-03
SO-5	4339-05
SO-6	4339-06
SO-7	4339-07
SO-8	4339-08
SO-9	4339-09
SO-10	4339-10
SO-11	4339-11
SO-12	4339-12
SO-13	4339-13
SO-14	4339-14
SO-15	4339-15
SO-16	4339-16
SO-17	4339-17
SO-18	4339-18
SO-19	4339-19
SO-20	4339-20
SO-21	4339-21
SO-22	4339-22
SO-23	4339-23
SO-24	4339-24
SO-25	4339-25
SO-26	4339-26
SO-27	4339-27

<sup>1</sup> La muestra nº4 (SO-4, caliza), figura en la solicitud de ensayos pero no ha sido entregada al laboratorio.

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO
SO-28	4339-28
SO-29	4339-29
SO-30	4339-30
SO-31	4339-31
SO-32	4339-32
SO-33	4339-33
SO-34	4339-34
SO-35	4339-35
SO-36	4339-36
SO-37	4339-37
SO-38	4339-38
SO-39	4339-39
SO-40	4339-40
SO-41	4339-41

## 2. DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (GEOTEK).

La susceptibilidad magnética se determina con el sensor puntual de contacto Bartington MS2E, incorporado al equipo de testificación geofísica multisensor MSCL Geotek.

El sensor MS2E está diseñado para realizar medidas de alta resolución de susceptibilidad magnética a lo largo de superficies lisas con una rugosidad inferior a un 1mm. Tiene un área de respuesta aproximada de 1 cm<sup>2</sup> y una capacidad de penetración 3.8 mm de profundidad en la muestra. Su precisión es del 5%, a 20°C.

El sensor está calibrado de fábrica, y antes de comenzar las medidas se ha efectuado un test de comprobación con el patrón estándar de susceptibilidad magnética que proporciona el fabricante.

Los datos de lectura directa que se obtienen con este equipo corresponden a susceptibilidad magnética volumétrica (Volume Specific Susceptibility) o Kuncor, que es adimensional, y se puede expresar en unidades SI ( $K \cdot 10^{-5}$  ud SI) o CGS ( $K \cdot 10^{-6}$  ud CGS).

Las medidas se han efectuado de forma manual, apoyando el sensor sobre cada una de las dos bases cortadas en cada muestra. Se han efectuado tres medidas en distintos puntos de cada una de las superficies, anotándose la media aritmética de cada cara y, a su vez, la media de las dos caras de cada muestra, como se refleja en los resultados.

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	UNIDADES *10 <sup>5</sup> SI		UNIDADES *10 <sup>-5</sup> SI	UNIDADES *10 <sup>-6</sup> cgs
		Cara 1	Cara 2		
SO-1	4339-01	-10	-15	<b>-12,5</b>	-9,947
SO-2	4339-02	-5	-5	<b>-5,0</b>	-3,979
SO-3	4339-03	-3	0	<b>-1,5</b>	-1,194
SO-5	4339-05	-1	-2	<b>-1,5</b>	-1,194
SO-6	4339-06	-3	-3	<b>-3,0</b>	-2,387
SO-7	4339-07	-3	-3	<b>-3,0</b>	-2,387
SO-8	4339-08	-3	-2	<b>-2,5</b>	-1,989
SO-9	4339-09	-2	-1	<b>-1,5</b>	-1,194
SO-10	4339-10	-2	-3	<b>-2,5</b>	-1,989
SO-11	4339-11	-3	-1	<b>-2,0</b>	-1,592
SO-12	4339-12	1	-2	<b>-0,5</b>	-0,398
SO-13	4339-13	-3	-3	<b>-3,0</b>	-2,387
SO-14	4339-14	-3	-2	<b>-2,5</b>	-1,989
SO-15	4339-15	-3	-2	<b>-2,5</b>	-1,989
SO-16	4339-16	-4	0	<b>-2,0</b>	-1,592
SO-17	4339-17	-3	-3	<b>-3,0</b>	-2,387
SO-18	4339-18	0	-3	<b>-1,5</b>	-1,194
SO-19	4339-19	-3	-2	<b>-2,5</b>	-1,989
SO-20	4339-20	0	-1	<b>-0,5</b>	-0,398
SO-21	4339-21	6	-3	<b>1,5</b>	1,194
SO-22	4339-22	-2	-2	<b>-2,0</b>	-1,592
SO-23	4339-23	-2	-2	<b>-2,0</b>	-1,592
SO-24	4339-24	-5	-3	<b>-4,0</b>	-3,183
SO-25	4339-25	-3	-3	<b>-3,0</b>	-2,387
SO-26	4339-26	-3	-2	<b>-2,5</b>	-1,989
SO-27	4339-27	-3	-3	<b>-3,0</b>	-2,387
SO-28	4339-28	-2	-1	<b>-1,5</b>	-1,194
SO-29	4339-29	-5	-4	<b>-4,5</b>	-3,581
SO-31	4339-31	-1	-3	<b>-1,0</b>	-0,796
SO-32	4339-32	-1	-1	<b>-3,0</b>	-2,387
SO-33	4339-33	-3	-3	<b>-3,0</b>	-2,387

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	UNIDADES *10 <sup>-5</sup> SI		UNIDADES *10 <sup>-5</sup> SI	Valor medio (cgs)
		Cara 1	Cara 2		
SO-34	4339-34	-2	-2	<b>-2,0</b>	-1,592
SO-35	4339-35	-3	-4	<b>-3,5</b>	-2,785
SO-36	4339-36	-6	-4	<b>-5,0</b>	-3,979
SO-37	4339-37	-2	0	<b>-1,0</b>	-0,796
SO-38	4339-38	-6	-3	<b>-4,5</b>	-3,581
SO-39	4339-39	-2	-2	<b>-2,0</b>	-1,592
SO-40	4339-40	-2	-2	<b>-2,0</b>	-1,592
SO-41	4339-41	-1	-1	<b>-1,0</b>	-0,796

### 3. MÉTODOS DE ENSAYO PARA PIEDRA NATURAL. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE Y LA POROSIDAD ABIERTA. UNE-EN 1936:2007 Apartado 8.1. (PTE-ET-041 ED.8 y PTE-ET-041-A ED.0)<sup>2</sup>

Tipo de probeta	<b>Irregular<sup>3</sup></b>
Tamaño de grano	<b>No aplica</b>
Acabado superficial	<b>Corte con sierra</b>
Acondicionamiento antes de ensayar	<b>Secado en estufa</b>

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Incertidumbre (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
SO-1	4339-01	<b>2635</b>	0,77	<b>2,6</b>	<0,1
SO-2	4339-02	<b>2639</b>	0,93	<b>2,5</b>	<0,1
SO-3	4339-03	<b>2425</b>	0,57	<b>10,2</b>	<0,1
SO-5	4339-05	<b>2406</b>	0,73	<b>10,6</b>	<0,1
SO-6	4339-06	<b>2647</b>	0,68	<b>2,1</b>	<0,1
SO-7	4339-07	<b>2676</b>	0,57	<b>0,5</b>	<0,1
SO-8	4339-08	<b>2583</b>	0,27	<b>4,4</b>	<0,1

<sup>2</sup> No incluido en el alcance de la acreditación de ENAC nº 62/LE 127 rev.10 por no cumplir la norma correspondiente en todos sus apartados.

<sup>3</sup> Debido a las características de las muestras suministradas, se han cortado probetas irregulares de similar relación superficie/volumen.

SO-9	4339-09	<b>2385</b>	0,25	<b>11,6</b>	<0,1
REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Incertidumbre (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
SO-10	4339-10	<b>2659</b>	0,31	<b>1,6</b>	<0,1
SO-11	4339-11	<b>2679</b>	0,31	<b>0,8</b>	<0,1
SO-12	4339-12	<b>2664</b>	0,31	<b>1,3</b>	<0,1
SO-13	4339-13	<b>2786</b>	0,32	<b>1,5</b>	<0,1
SO-14	4339-14	<b>2662</b>	0,31	<b>3,7</b>	<0,1
SO-15	4339-15	<b>2591</b>	0,30	<b>6,1</b>	<0,1
SO-16	4339-16	<b>2646</b>	0,31	<b>5,3</b>	<0,1
SO-17	4339-17	<b>2694</b>	0,31	<b>0,5</b>	<0,1
SO-18	4339-18	<b>2663</b>	0,31	<b>1,1</b>	<0,1
SO-19	4339-19	<b>2734</b>	0,34	<b>3,0</b>	<0,1
SO-20	4339-20	<b>2610</b>	0,31	<b>4,5</b>	<0,1
SO-21	4339-21	<b>2666</b>	0,30	<b>6,0</b>	<0,1
SO-22	4339-22	<b>2544</b>	0,32	<b>10,7</b>	<0,1
SO-23	4339-23	<b>2608</b>	0,32	<b>3,0</b>	<0,1
SO-24	4339-24	<b>2178</b>	0,27	<b>23,1</b>	<0,1
SO-25	4339-25	<b>2495</b>	0,30	<b>11,4</b>	<0,1
SO-26	4339-26	<b>2776</b>	0,33	<b>1,3</b>	<0,1
SO-27	4339-27	<b>2675</b>	0,31	<b>0,7</b>	<0,1
SO-28	4339-28	<b>2715</b>	0,33	<b>4,0</b>	<0,1
SO-29	4339-29	<b>2739</b>	0,32	<b>2,3</b>	<0,1
SO-30	4339-30	<b>2663</b>	0,32	<b>5,3</b>	<0,1
SO-31	4339-31	<b>2649</b>	0,32	<b>5,1</b>	<0,1
SO-32	4339-32	<b>2582</b>	0,31	<b>7,0</b>	<0,1
SO-33	4339-33	<b>2620</b>	0,32	<b>2,6</b>	<0,1
SO-34	4339-34	<b>2562</b>	0,31	<b>8,2</b>	<0,1
SO-35	4339-35	<b>2596</b>	0,31	<b>6,9</b>	<0,1
SO-36	4339-36	<b>2515</b>	0,31	<b>6,2</b>	<0,1
SO-37	4339-37	<b>2639</b>	0,32	<b>1,6</b>	<0,1
SO-38	4339-38	<b>2522</b>	0,31	<b>9,0</b>	<0,1

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Incertidumbre (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
SO-39 <sup>4</sup>	4339-39	<b>2144</b>	0,37	<b>24,8</b>	<0,1
		<b>2607</b>	0,40	<b>27,5</b>	<0,1
SO-40	4339-40	<b>2692</b>	0,32	<b>2,5</b>	<0,1
SO-41	4339-41	<b>1798</b>	0,23	<b>32,9</b>	<0,1

---

<sup>4</sup> De la muestra SO-39 se obtuvieron dos probetas