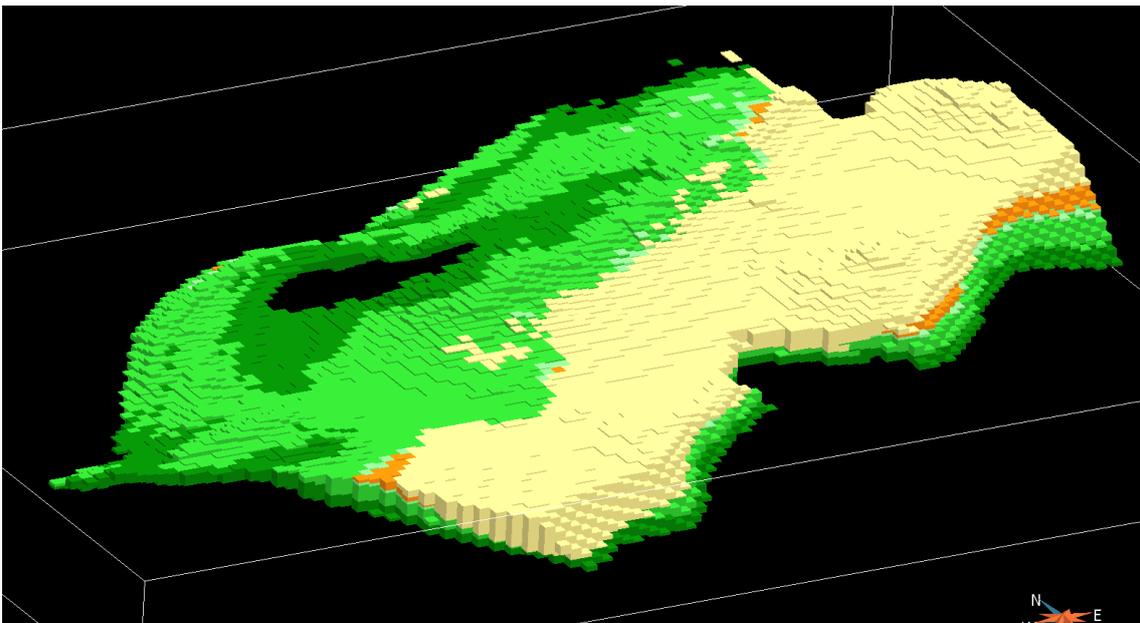


## DESARROLLOS METODOLÓGICOS EN GEOLOGÍA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS PROFUNDOS DE LA PROVINCIA DE ALICANTE (HIDROPROAL)

### MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE SERRAL- SALINAS Y EVALUACIÓN DE LAS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA



Enero de 2014

Carlos Marín Lechado  
Sergio Martos Rosillo  
José Luís García Lobón  
Concepción Fernández Leyva



# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	7
1.1	Justificación del estudio y antecedentes .....	7
1.2	Localización.....	8
1.3	Objetivos.....	9
2	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.....	11
2.1	Geología.....	11
2.1.1	Encuadre geológico.....	11
2.1.2	Estratigrafía .....	12
2.1.3	Estructura.....	17
2.2	Hidrogeología .....	19
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 .....	35
3.2.1	Estudio petrográfico.....	35
3.2.2	Porosidad abierta.....	36
3.3	Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas .....	36
4	RESULTADOS.....	37
4.1	Modelización 3D .....	37
4.2	Sistema poroso.....	49
4.3	Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas .....	51
4.4	Implicaciones hidrogeológicas del modelo.....	53
5	CONCLUSIONES .....	55
6	REFERENCIAS.....	59
	ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL ENTREGADA.....	65
1.	ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL.....	65
2.	ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE .....	67
3.	ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO SALINAS .....	69
4.	LISTADO DE FICHEROS.....	71
	ANEXO II. ESTUDIO PETROGRÁFICO .....	74
	ANEXO III. ANALISIS DEL LABORATORIO .....	110

# ÍNDICE FIGURAS

- Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. 8
- Figura 2. Mapa geológico del área estudiada. Fuente: Mapa GEODE del Prebético E. 1:50.000. (IGME). Límite del acuífero estudiado en azul. 11
- 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. 13
- Figura 4. Panel de correlación estratigráfica en Sierra de Salinas. Límite del acuífero estudiado en azul. 15
- Figura 5. Mapa hidrogeológico del acuífero de Serral- Salinas (DPA-IGME, 2013, in prep.). 20
- Figura 6. Evolución del nivel piezométrico en el acuífero de Serral- Salinas (DPA-IGME, 2013, in prep.). 21
- Figura 7. Distribución de datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de Serral-Salinas. 25
- Figura 8. Diagrama de flujo del procesado de los datos para la realización del modelo geológico. 27
- Figura 9. Perfiles sísmicos RV-63, RV-78 y RV-80 en formato digital seg y profundidad en tiempo doble. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos. La posición de los perfiles se indica en la figura 7. 29
- Figura 10. Transformación realizada en las curvas con el programa RSLW.exe. 30
- Figura 11. Vista 3D de los SEDT y el modelo de resistividades de cada sondeo con el programa Gocad. 31
- Figura 12. Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Salinas con Global Mapper. 32
- Figura 13. Modelo voxet de Sierra de Salinas. Cada celda tiene un atributo litológico. 33
- Figura 14. Vista 3D del muro del Cenomaniense del Acuífero de Serral-Salinas junto con los sondeos mecánicos, los SEDTs y la línea RV-80. 37
- Figura 15. Cortes geológicos realizados al modelo 3D generado en el proyecto. La posición de los cortes se muestran en las figuras 16, 17, 18 y 19. 39
- Figura 16. Mapa de isobatas del muro de la unidad Neógena. 40
- Figura 17. Mapa de isobatas del muro de la unidad Senonense (metros sobre el nivel del mar). 43
- Figura 18. Mapa de isobatas del muro de la unidad Cenomaniense (metros sobre el nivel del mar). 44
- Figura 19. Mapa de isobatas del muro de la unidad Aptiense-Albiense (metros sobre el nivel del mar). 45
- Figura 20. A) Mapa geológico del sector este de Sierra de Salinas donde se representan los sondeos que cortan las dolomías y calizas jurásicas. Se estima la distribución en planta de las rocas jurásicas a partir de los afloramientos y de los sondeos. B) Corte geológico N-S que muestra la distribución de los afloramientos jurásicos. La geometría de las unidades cretácicas proviene del modelo geológico 3D realizado para este proyecto. 47
- Figura 21. Histograma de los valores de porosidad abierta de las muestras recogidas en el acuífero de Serral. Salinas. 49
- Figura 22. Curva de reservas del acuífero de Serral-Salinas obtenida a partir del modelo 3D. Las líneas verticales discontinuas indican la cota máxima (470 m.s.n.m.) y mínima (-330 m.s.n.m.) de la curva de explotación desde el sondeo Garrincho. 51
- Figura 23. Límite actual y límite propuesto para el acuífero de Serral-Salinas. 57

## ÍNDICE TABLAS

*Tabla 1. Correlación entre la serie estratigráfica, unidades acuíferas y unidades geológicas modelizadas..... 17*

*Tabla 2. Datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de Serral-Salinasõ ..23*

*Tabla 3. Datos incorporados al modelo 3D para cada unidad modelizadaõ õ õ õ õ õ õ õ õ õ õ õ ..38*

*Tabla 4. Principales estadísticos de posición de la densidad y porosidad de las muestras de roca analizadasõ ..õ õ õ õ 50*

*Tabla 5. Valores medianos de porosidad de las muestras de roca analizadas clasificadas por edad litológicaõ ..50*



# 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 y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo [SEDTs]). 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). En concreto, el subsuelo de la Sierra de Salinas fue estudiado como posible almacén de CO<sub>2</sub>.

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 Salinas, que comprende el acuífero de Serral-Salinas definido por la DPA (DPA, 2007). Desde el punto de vista metodológico, el área investigada representa a un acuífero localizado entre la provincia de Murcia y Alicante en el que la información geofísica principal corresponde a una malla de perfiles sísmicos longitudinales y transversales a la estructura. Otra información geofísica de más difícil interpretación corresponde a una campaña de SEDTs. La información geológica de superficie está bien expuesta en las Sierras de Serral y Salinas, si bien la exposición del acuífero es sólo parcial al estar gran parte del mismo confinado bajo los sedimentos neógenos y cuaternarios, al sur de la Sierra de Salinas.

## 1.2 Localización

El acuífero de Serral-Salinas se localiza en las provincias de Alicante y Murcia, entre el río Vinalopó y la Sierra del Carche respectivamente. Dentro de la provincia de Alicante está localizado entre las comarcas del Alto y el Medio Vinalopó. El acuífero tiene una extensión total de 198 km<sup>2</sup> de los que un 27% corresponde a la provincia de Murcia.

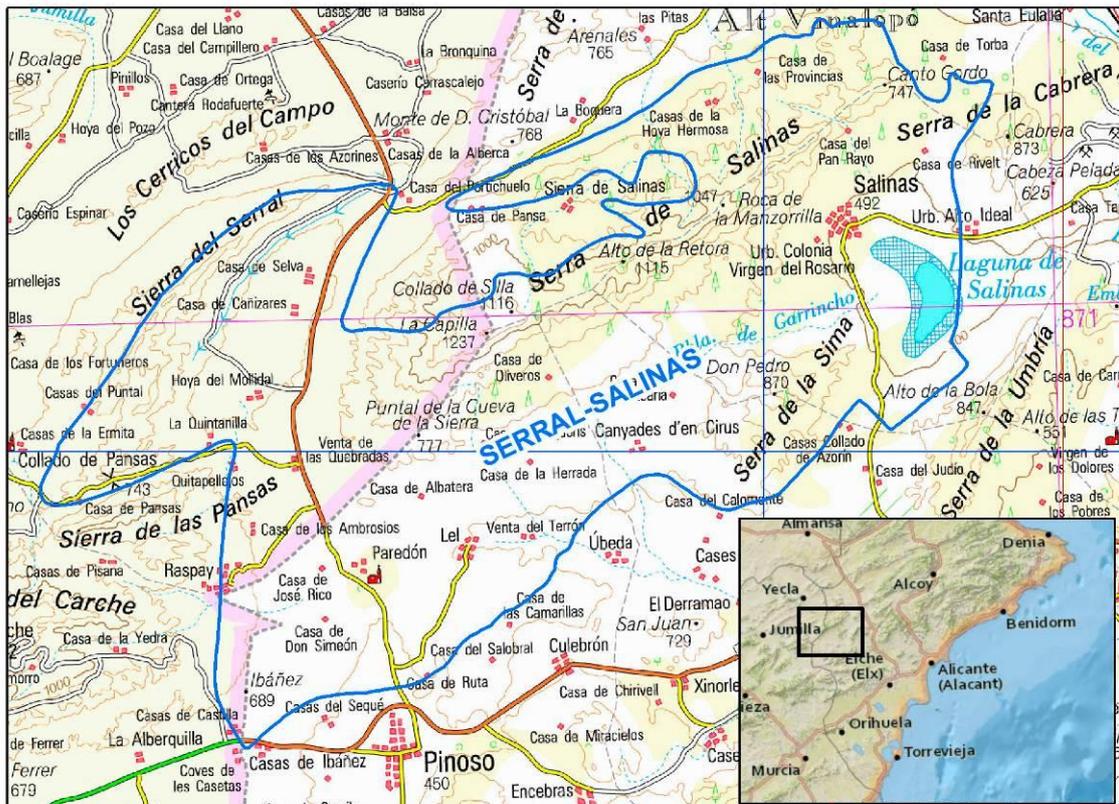


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Las sierras que forman el acuífero estudiado son las Sierras de Serral y Salinas y la Sierra de la Sima en la zona sur del acuífero. La altitud máxima corresponde al Pico de la Capilla de 1237 m.s.n.m. en la Sierra de Salinas. Al sur de esta sierra se encuentra la laguna endorreica de Salinas a la que vierte aguas la Rambla de Garrincho. La principal población que existe entre los límites del acuífero es Salinas, localizada al sureste de la Sierra de Salinas.

### **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 al acuífero de Serral-Salinas.

El subsuelo de esta región se caracteriza por haber sido estudiado a partir de sondeos de investigación hidrogeológica con profundidades de hasta 800 metros. También se puede caracterizar el subsuelo de la región a partir de la campaña de sísmica de reflexión realizada en los años 80 con fines de exploración de hidrocarburos y finalmente a partir de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo que el IGME llevó a cabo en la región (ITGE, 1992). La integración de esta información junto con la obtenida en superficie a partir de las cartografías geológicas MAGNAs y la fotointerpretación permite 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 investigación hidrogeológica.

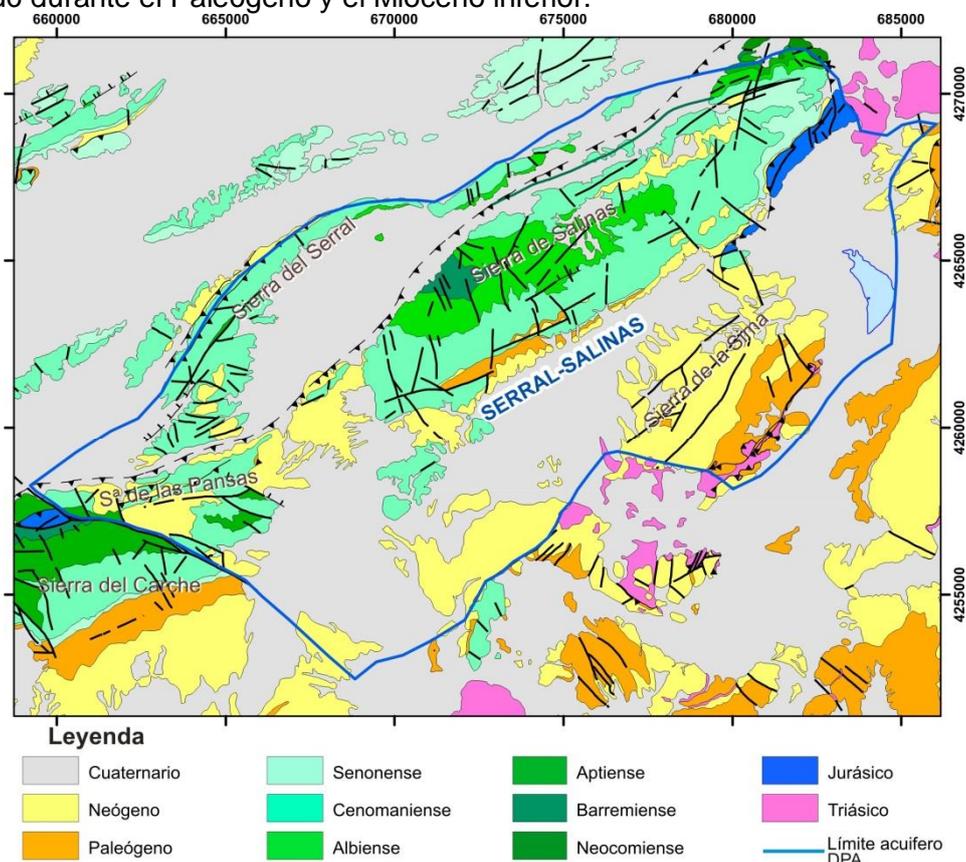


## 2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

### 2.1 Geología

#### 2.1.1 Encuadre geológico

El acuífero de Serral-Salinas (figura 2) se localiza en el Prebético interno más septentrional 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). Mientras que el Prebético externo se localiza 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 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 GEODE del Prebético E. 1:50.000. (IGME). Límite del acuífero estudiado en azul.

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 muestra una dirección estructural principal SO-NE (figura 2), 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 y paleógenas mientras que los valles corresponden a sinclinales rellenos por sedimentos neógenos y cuaternarios.

El diapiro triásico del Vinalopó aflora en el extremo oriental del área de estudio y corta al anticlinal 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. Otros diairos de menor entidad como el localizado cerca de la población de Úbeda corta al pliegue anticlinal neógeno de la Sierra de la Sima.

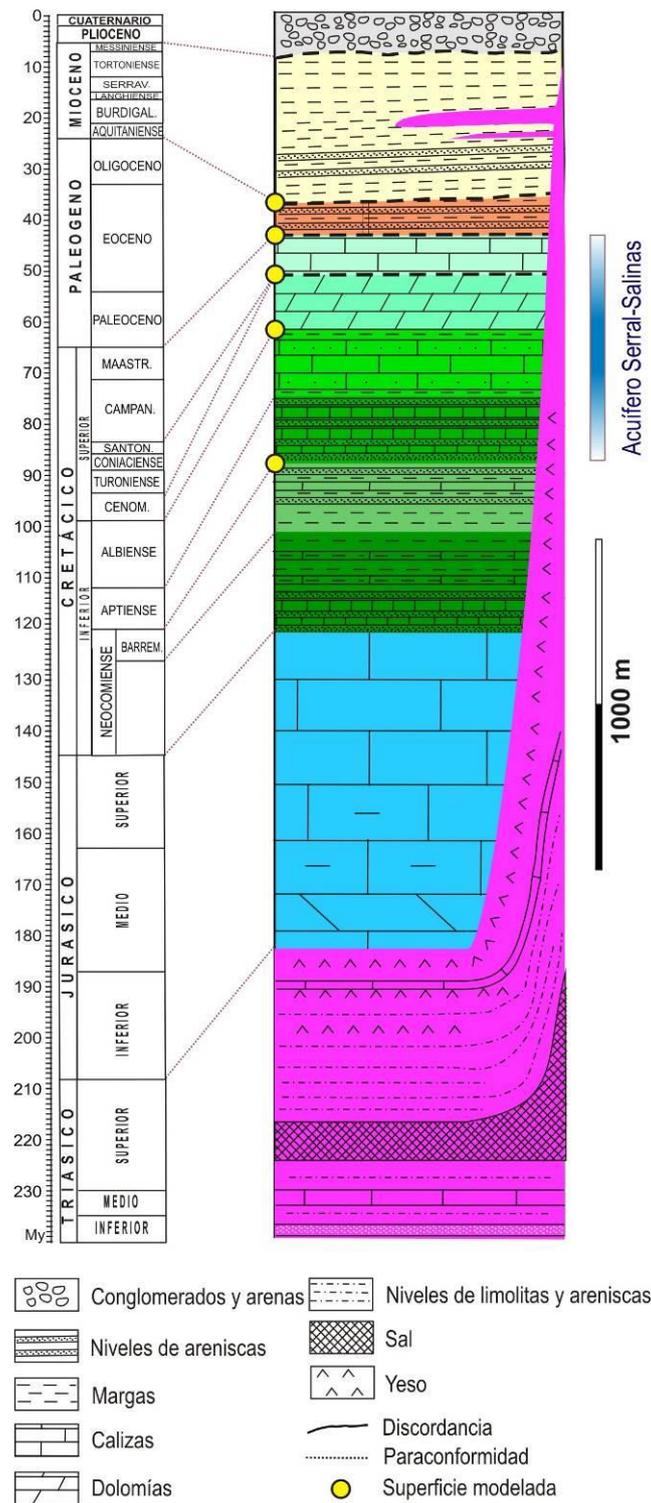
## 2.1.2 Estratigrafía

La sucesión estratigráfica en el sector estudiado comprende rocas de edad triásica a cuaternaria (figura 3). En la figura 4 se representa un panel de correlación estratigráfica a partir de las series levantadas en las cartografías geológicas y de las columnas litoestratigráficas de los sondeos más profundos, en la que se puede observar la variación de espesores de las diferentes unidades, la presencia de discordancias y la variación lateral de facies dentro de una misma unidad.

El Triásico de la región corresponde litológicamente a arcillas y margas rojas con yesos. Estas materiales triásicos afloran en la región como consecuencia del diapirismo prebético. Como consecuencia de ello, el Triásico aflora en el Diapiro del Vinalopó localizado en el límite oriental del Acuífero de Serral-Salinas. También existe otro afloramiento en el entorno de la población de Úbeda, posiblemente ligado a otro diapiro de menor entidad. En esta zona los sondeos Don Ciro I, II y III, Lel-2 y Collado-2 cortan sedimentos de triásico interestratificados de hasta 240 metros de espesor entre las margas del Mioceno.

Los únicos afloramientos de rocas jurásicas del acuífero de Serral-Salinas se localizan en el sureste de la Sierra de Salinas en el paraje conocido como Sierra del Collado y Barranco de la Boquera. En este sector se puede observar la serie completa Lías-Dogger-Malm compuesta por dolomías y calizas. Este afloramiento de unos 2 km<sup>2</sup> de extensión se dispone directamente encima de una banda de margas blancas de edad Langhiense. El sondeo Collado-2 corta a la base del Jurásico unas brechas triásicas. La geometría del afloramiento, cuya base es paralela a la estratificación miocena y cretácica infrayacente y la reducida extensión lateral hacia el SE, parece indicar que puede tratarse de un gran olistolito asociado al diapiro del Vinalopó.

La serie más antigua del Cretácico inferior que aflora en la región corresponde al Berriasiense. Esta unidad estratigráfica aflora únicamente en el área de El Pescado+y La Caseta de la Boquera+ al noreste de la Sierra de Salinas. Aflora encima de sedimentos del Cretácico inferior más jóvenes sobre un contacto mecánico. Por lo tanto, al no aflorar el muro y el techo de esta unidad no se puede determinar el espesor total de esta unidad. Litológicamente corresponde a calizas arenosas y calizas de aspecto masivo y calizas margosas e intraclásticas en general muy fosilíferas. No es descartable que estos afloramientos pudieran tener un origen diapírico similar a la unidad jurásica.



**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.

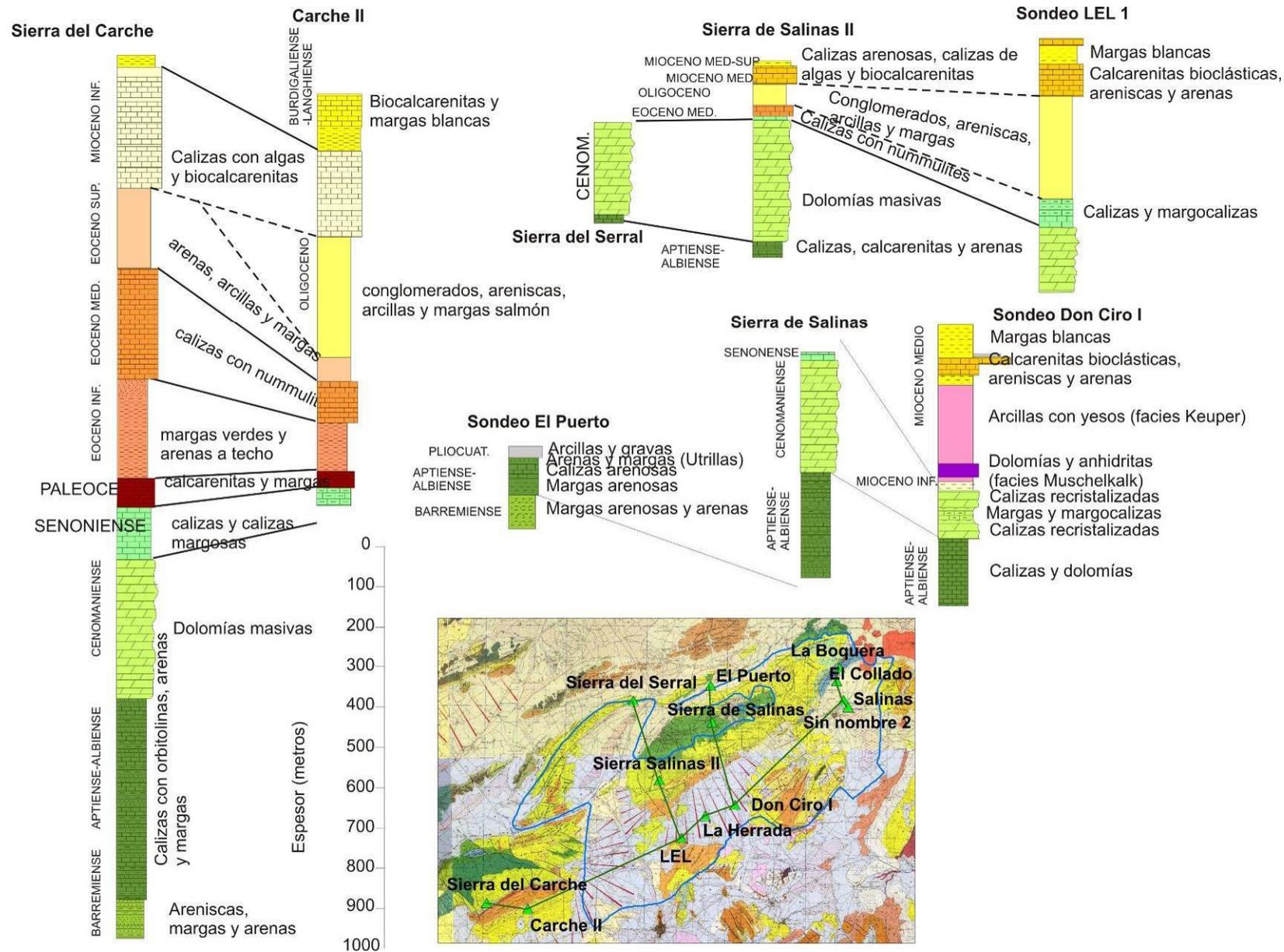
La siguiente serie del Cretácico inferior que aflora en el área estudiada es el Barremiense. Esta unidad aflora en el Cerro del Recodo al noreste de la Sierra de Salinas con una potencia de unos 60 metros, aunque no se observa el muro de la

unidad. Corresponde a arenas, arcillas y calizas. El sondeo El Puerto, corta unos 87 metros de esta unidad pero no alcanza el muro.

Inmediatamente encima, se dispone la serie Aptiense y está formada por calizas con Toucasias, arenas y calcarenitas. El espesor de esta unidad aumenta espectacularmente de este a oeste, pasando de los 80 metros de potencia en la Umbría Alta (noreste de la Sierra de Salinas) a los 200 metros en la Sierra del Carche (oeste de Sierra de Salinas). En los sondeos situados al sur de la Sierra de Salinas es difícil diferenciar esta unidad de la unidad Albiense suprayacente debido a la similitud entre sus facies.

El piso Albiense de la Sierra de Salinas corresponde a calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas, arenas y margas. Afloran en el Cerro del Recordo, pero sobre todo ampliamente en el núcleo anticlinal de la Sierra de Salinas. Esta unidad se perfora ampliamente al sur de Sierra de Salinas, en los sondeos Don Ciro I y II, La Herrada, El Collado-2, Casa Valdés I y IV y El Puerto. Sin embargo en estos sondeos no es posible diferenciar esta unidad de la infrayacente debido a la similitud en las litologías.

El Cretácico superior es fundamentalmente dolomítico con calizas y margocalizas a techo. La primera serie estratigráfica presente en la región estudiada es el Cenomaniense. El Cenomaniense de la Sierra de Salinas está constituido por una potente formación de dolomías masivas negras karstificadas y aflora en todo el anticlinal de Sierra de Salinas y en la Sierra del Serral. Estas dolomías podrían correlacionarse con la formación Quesada de la litología dolomítica que aflora en la vecina Sierra de Solana. Las formaciones dolomíticas Franco del Cenomaniense superior y Benejama del Turoniense no se habrían depositado en esta zona debido a la existencia de un umbral que impidió el depósito de estas formaciones. Los sondeos localizados al sur de Sierra



**Figura 4.** Panel de correlación estratigráfica en Sierra de Salinas. Límite del acuífero estudiado en azul.

de Salinas perforan esta unidad cenomaniense bajo el relleno neógeno de la cuenca. Las litologías perforadas muestran un cambio lateral de facies de norte a sur. De esta forma, los sondeos Lel-2, Don Ciro-1 y Don Ciro-2 cortaron facies calizo-dolomíticas con algunas pasadas margosas. Este cambio de facies se realiza en un corto espacio (inferior a 1 kilómetro), pues mientras que en el sondeo de La Herrada el Cenomaniense es todavía dolomítico, en el sondeo Lel-2, por ejemplo, es ya calizo-dolomítico con intercalaciones margosas.

En el área de estudio, el **Senoniense inferior** (Coniaciense y Santoniense) no se depositó debido a la presencia del mismo umbral mencionado para el Cenomaniense superior y el Turoniense. El **Senoniense superior** (Campaniense y Maastrichtiense) sí aflora al este de Sierra de Salinas y está formado por calizas y calizas margosas de color blanco con intercalaciones margosas. Se depositó en discordancia erosiva sobre las dolomías grises cenomanienses. El techo de esta unidad se encuentra generalmente erosionado por sedimentos paleógenos y neógenos, por lo que el espesor es variable. Esta unidad se ha perforado bajo el relleno neógeno del sector sureste bajo la población de Salinas. Sin embargo en los sondeos localizados en el paraje La Herrada y cercanos a la población de Lel, el Senonense superior está erosionado.

El **Paleógeno** aflora ampliamente en la Sierra del Carche (al este de Sierra de Salinas y Serral). También aflora en el límite sureste del acuífero de Serral-Salinas. Sin embargo los afloramientos de edad paleógena son muy reducidos en la Sierra de Salinas y están localizados en la falda sureste del Alto de la Capilla con afloramientos de calizas eocenas y conglomerados, areniscas, arcillas y margas oligocenas. En la Sierra de la Sima, al sureste de Sierra de Salinas, también afloran en el núcleo de un anticlinal sedimentos oligocenos y en menor medida eocenos. Bajo el relleno neógeno los sondeos no perforan sedimentos paleógenos, aunque el sondeo Lel-1 podría cortar un paquete oligoceno de margas y margocalizas.

El **Mioceno** está representado al sur de la Sierra de Salinas donde aflora ampliamente y presenta potencias en los sondeos que en algún caso alcanza los 600 metros. La litología de esta unidad es principalmente margosa y calcarenítica, esencialmente en facies marinas con depósitos que abarcan desde el Aquitaniense al Tortoniense. Estos depósitos se disponen discordantes sobre los materiales infrayacentes.

Finalmente, el **Plio-Cuaternario** está representado por sedimentos en facies continentales fluviales, fluvio-lacustres y aluviales que llegan a alcanzar un mayor desarrollo al norte de la población de Salinas y en la Hoya del Modillar. Los sondeos en estos sectores perforan 150 metros de sedimentos plio-cuaternarios compuestos por conglomerados poligénicos, gravas, arenas y arcillas.

Sistema-Serie		Piso	Unidad acuífera	Unidad modelo 3D
Plio-Cuaternario			Acuitardo	
Neógeno				Neógeno
Paleógeno				Paleógeno
Cretácico	superior	Senonense	Acuífero	Senonense
		Cenomaniense		Cenomaniense
	inferior	Albiense		Aptiense-Albiense
		Aptiense		
		Barremiense	Acuitardo	
		Berriasiense		
Jurásico			Acuífero	
Triásico			Acuitardo	

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

### 2.1.3 Estructura

El acuífero de Serral-Salinas se encuentra ubicado dentro del Prebético Interno. Este dominio tiene un estilo estructural típico de un cinturón de cabalgamiento y plegamiento algo más alejado del *foreland* con una cobertera bastante potente. Este cinturón de plegamiento y cabalgamiento, consecuencia de la orogenia alpina, tiene superpuesto el efecto de la deformación debido al diapirismo triásico.

La dirección estructural general de los ejes de los pliegues y las fallas inversas de esta región es N56E. La alineación montañosa de la **Sierra de Salinas** corresponde a la charnela de un gran anticlinal paralelo y cilíndrico con una longitud de 18 km y vergencia noroeste. De esta forma, en el anticlinal de Sierra de Salinas, el flanco NO está vertical o invertido mientras que el flanco SE tiene buzamientos moderados de unos 20° al SE. Hacia el este, el anticlinal de Sierra de Salinas queda interrumpido por el diapiro triásico del Vinalopó de dirección NNO-SSE. Hacia el oeste el anticlinal tiene su cierre periclinal que se ve interrumpido por una falla de gran longitud de dirección NO-SE que limita la Sierra del Carche con la Sierra de las Pansas. Esta falla hunde el bloque occidental de la Sierra del Carche.

En el flanco noroeste del pliegue anticlinal de la Sierra de Salinas se desarrolla una falla inversa lítrica de traza curvada, que en profundidad posiblemente despegan sobre las arcillas triásicas de facies Keuper. Las trazas de estas fallas inversas generalmente quedan ocultas bajo los sedimentos cuaternarios. El plegamiento y las fallas inversas deforman los sedimentos miocenos, por lo que se puede concluir que este tipo de deformación es de edad miocena. Además de las fallas inversas, la Sierra de Salinas está afectada por pequeñas fallas normales de pequeño salto perpendiculares a la traza axial de los pliegues. También existen fallas de pequeña longitud y salto reducido, paralelas a la traza axial del pliegue de Salinas.

La **Sierra del Serral** es un bloque separado de la Sierra de Salinas de unos 15 km de longitud en forma de arco de dirección NE-SO con una intensa fracturación paralela a la estructura, pliegues apretados y fallas inversas sucesivas en el flanco norte, lo que motiva la repetición de la serie así como una disposición vertical e invertida de las capas. Este bloque cabalga hacia el NO sobre el Prebético externo. La Sierra del Serral está formada por una potente cobertera dolomítica del Cretácico superior.

La **Sierra de las Pansas** situada entre la Sierra del Carche y la Sierra del Serral presenta un alto grado de complejidad estructural con pliegues ENE-OSO a NE-SO. La falla inversa frontal de esta sierra está recubierta por sedimentos cuaternarios.

El valle plano situado al sureste de la Sierra de Salinas corresponde a una depresión neógena. Consiste en una gran sinforma, con el desarrollo de pequeños anticlinales de buzamientos suaves como el de la Sierra de la Sima. Al frente de estos anticlinales existen fallas inversas lístricas de pequeño salto.

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 oriental 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. Debido al diapirismo triásico existen direcciones estructurales anómalas cerca de los diapiros, a veces ortogonales a las principales NE-SO. Por ejemplo, la Sierra de Cabrera cercana al Diapiro del Vinalopó tiene una dirección NNE-SSO o los afloramientos paleógenos de la pedanía de Encebras junto al Diapiro de Pinoso tienen una dirección NO-SE.

## 2.2 Hidrogeología

El acuífero de Serral-Salinas se sitúa entre las provincias de Alicante y Murcia, en parte de las comarcas alicantinas del Alto y Medio Vinalopó y en la comarca del Altiplano de Murcia. Este acuífero consiste en la principal fuente de abastecimiento a las poblaciones de su entorno y resulta esencial para el suministro de agua de riego e industrial. La intensa explotación a la que se encuentra sometido ha provocado el secado de los manantiales que lo drenaban y la alimentación subterránea que se realizaba hacia la Laguna de Salinas (DPA-IGME, 2007, 2013, in prep.).

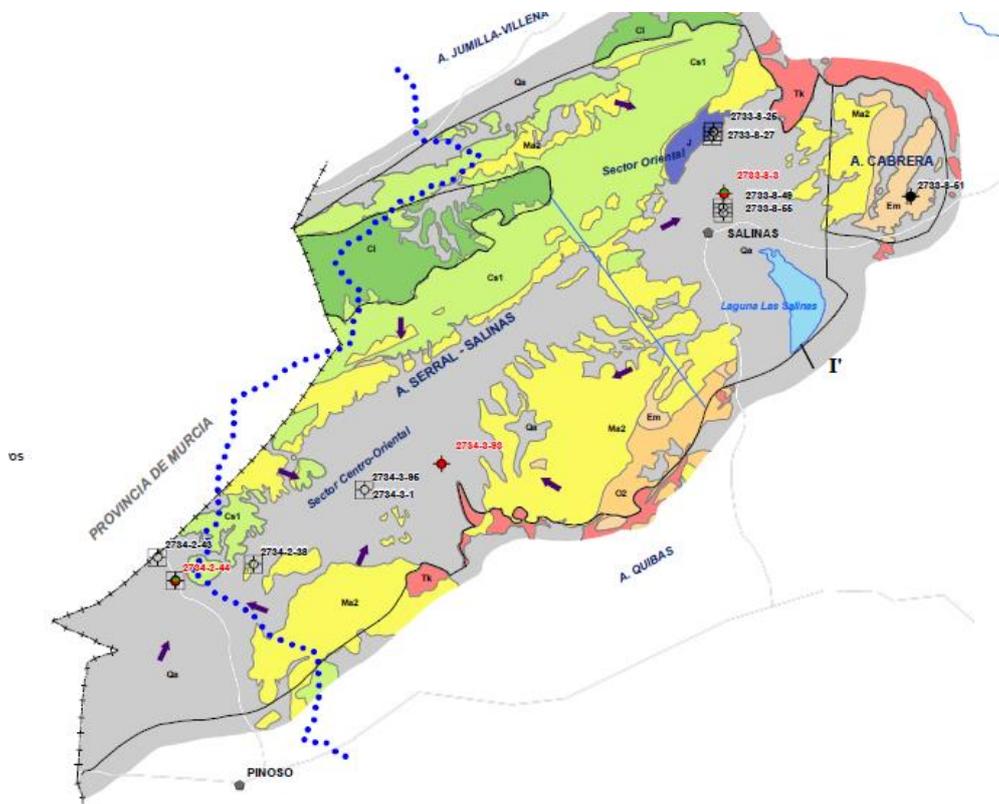
Uno de los primeros estudios hidrogeológicos llevados a cabo para caracterizar sistemas acuíferos sometidos a explotación intensiva, en el sureste español, se realiza en 1979 por el IGME, en el sistema hidrogeológico de Carche . Salinas (IGME, 1979), en el que quedaba incluido el actual acuífero de Serral- Salinas. Destaca en este trabajo la especial importancia que se dedica a la evaluación de sus reservas, dada la escasa cantidad de recursos renovables del sistema y la, ya entonces, importante explotación a la que estaba sometido. Desde esa fecha a la actualidad, se han realizado un buen número de estudios hidrogeológicos. Un detallado análisis de la bibliografía existente al respecto se puede encontrar en DPA-IGME (2007), y en Molina (2009). Con todo, deben ser destacados los trabajos realizados para el cálculo de reservas en el Prebético de Murcia (IGME, 1993), donde se evalúan unas reservas totales del acuífero de Serral-Salinas (1400 hm<sup>3</sup>), y la actualización del conocimiento hidrogeológico y los modelos de flujo en régimen estacionario y transitorio que se presentan en DPA-IGME (2007).

El clima de la zona es de tipo mediterráneo seco con carácter continental. La precipitación media anual que alcanza al acuífero es de 350 mm/año y la temperatura media anual de 14°C. La evapotranspiración potencial, calculada con la expresión de Thornwaithe, resulta próxima los 900 mm/año (DPA-IGME, 2007).

Desde el punto de vista geológico, está formado por materiales, fundamentalmente carbonáticos, pertenecientes al Dominio Prebético interno más septentrional. Superpuestos sobre los anteriores se depositaron materiales neógenos y pliocuaternarios. El acuífero según los límites definidos por la DPA cuenta con una extensión total de 198 km<sup>2</sup> y una superficie permeable aflorante, de materiales carbonáticos, de unos 53 km<sup>2</sup>, por lo que se encuentra confinado en buena parte de su extensión. En este proyecto se investigan los materiales y se evalúan las reservas de las formaciones mesozoicas, dado que estas constituyen las principales formaciones acuíferas de interés. El muro del acuífero, considerado en esta investigación, lo define el límite de las rocas carbonáticas del conjunto Aptiense-Albiense con el Barremiense. Se trata por tanto de un acuífero, fundamentalmente, cretácico, si bien, existe un importante afloramiento de materiales jurásicos que aflora al este de Salinas, en la Sierra del Collado y Barranco de la Boquera. Así descrito, y de muro a techo, el acuífero lo forman entre 215 y 275 m de calizas con Orbitolinas, calizas con Toucasias, arenas y margas del Cretácico inferior (Aptiense-Albiense), de 290 a 320 m de calizas y dolomías del Cenomaniense y 80 m de calizas del Senoniense. Por otro lado, de forma discordante a las formaciones cretácicas se depositaron, margas y calcarenitas de facies marinas del Mioceno y, coronando la serie, afloran materiales continentales plio-cuaternarios compuestas en su mayoría por conglomerados, gravas, arenas y arcillas. Con la actual definición, los límites laterales del acuífero se consideran cerrados al flujo subterráneo. Al norte el acuífero limita con los materiales acuitados del Cretácico inferior (norte de la sierra de Salinas). En la sierra de Serral, el límite se define por los materiales del Cretácico inferior junto con un cabalgamiento que pone en contacto los materiales cretácicos con el Mioceno margoso. El límite oriental, lo definen

los materiales arcillosos y yesíferos del Trías. El límite meridional se divide en dos sectores. En su margen oriental el acuífero se enfrenta al Trías de la alineación Cañada Roja, y en el sector occidental, el límite viene definido por el cambio de facies dentro del Cretácico, que pasa a ser margoso, cambio coincidente con el cabalgamiento al norte de Pinoso. Por último, el límite oeste, según la definición de la DPA, lo configuran los materiales margosos del Mioceno, estando subyacentes los bloques del Cretácico y quedando la sierra del Carche desconectada de la sierra de Salinas mediante la depresión miocena al norte de Pinoso.

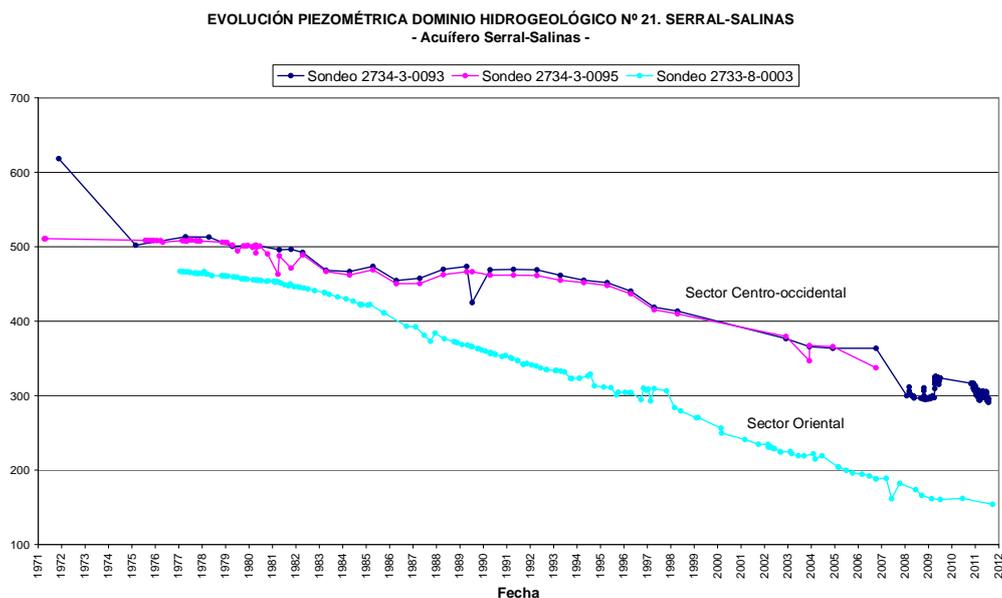
Respecto a los parámetros hidráulicos del acuífero, la interpretación de diferentes ensayos de bombeo ha permitido conocer que al noreste de Salinas, en el, hoy abandonado, sondeo Salinas, se determinó una transmisividad de 2400 a 12000 m<sup>2</sup>/día y un coeficiente de almacenamiento del 1%. Asimismo, en el sector central del acuífero se cuenta con el ensayo de bombeo del sondeo Regina, en el que se evaluó una transmisividad próxima a los 700 m<sup>2</sup>/día. En lo que a la porosidad de los materiales acuíferos se refiere, en IGME (1979) las reservas se evaluaron en el sistema de Carche. Salinas considerando una porosidad del 5%, mientras que en IGME (1993), en el acuífero de Serral. Salinas fueron evaluadas con porosidades comprendidas entre el 3 y el 5 %. Por otro lado, los modelos unicelulares de evaluación de la recarga aplicados en DPA-IGME (2003) se calibraron con coeficientes de almacenamiento comprendidos entre el 1 y el 0,5%. En DPA-IGME (2007), se facilitan datos de vaciado de acuífero y de reservas consumidas en el periodo 1956-2006, de los que se deduce un porosidad media drenada de 0,7%, en el sector oriental del acuífero, y del 1%, en el centro-occidental (figura 5). Cabe destacar, que en este último trabajo, para la calibración del modelo de flujo en régimen transitorio se utilizaron coeficientes de almacenamiento comprendidos entre 0,05 y 0,5%. Asimismo, en la calibración del modelo presentado en DPA (2010) se consideró una porosidad eficaz y un S de 0,1% y de  $6 \times 10^{-5}$ , respectivamente.



**Figura 5.** Mapa hidrogeológico del acuífero de Serral- Salinas (DPA-IGME, 2013, in prep.).

Este acuífero, sometido a un consumo continuado de reservas desde la década de los años sesenta del siglo anterior, descargaba sus recursos, cuando funcionaba en régimen natural, hacia el sector de la Laguna de Salinas, donde se ubicaba el manantial de Salinas, a 475 m.s.n.m. Ese manantial presentaba un caudal medio del orden de 40 l/s en los años sesenta del siglo anterior (DPA-IGME, 2007), por lo que, probablemente, se producirían unas notables salidas ocultas hacia la laguna y hacia alguno de los barrancos que la alimentaban en su día.

En IGME (1979) se presenta una piezometría, correspondiente a mayo de 1977, de la que se deduce que el flujo en régimen natural (en esta época el acuífero ya estaba en explotación) se dirigía del suroeste, con cotas máximas del orden de los 500-520 m s.n.m. hacia el noreste, hacia el manantial de Salinas (475-470 m.s.n.m.). En este informe ya se comenta la existencia de algunos saltos piezométricos entre sondeos próximos, de distinta profundidad, que parecen evidenciar diferentes potenciales hidráulicos entre las formaciones mesozoicas. En ese sentido, en los gráficos de evolución temporal de la piezometría, que se han tomado de DPA-IGME (2013, in prep.), se comprueba la existencia de un importante salto piezométrico entre el sector norte y el sector sur del acuífero, que es evidente desde 1977 (del orden de 30 m) y que se ha ido incrementando hasta la actualidad, hasta llegar a ser del orden de los 150 m (figura 6).



**Figura 6.** Evolución del nivel piezométrico en el acuífero de Serral-Salinas (DPA-IGME, 2013, in prep.).

En la actualidad existe cierta controversia respecto a la posible desconexión hidrogeológica entre el sector nororiental y el sector centro-occidental del acuífero (figura 5). En DPA-IGME (2007) se indica que el importante salto piezométrico entre ambos sectores requiere de una compartimentación del acuífero, sin embargo, no existe ningún argumento geológico sólido que justifique esta compartimentación. Lo que sí es evidente, es la existencia de un considerable vaciado del acuífero, evaluado para el periodo comprendido entre 1956 y 2006, en 300 m (154 hm<sup>3</sup>), en el sector oriental, y en 140 m (167 hm<sup>3</sup>) en el centro-occidental (DPA-IGME, 2007). Actualmente, el flujo se dirige hacia los dos grandes conoides de bombeo, el primero y más

concentrado, en el sector nororiental, al norte de Salinas, y el segundo, algo más disperso que el anterior, en el sector centro . occidental del acuífero, entre las localidades de Canyades d'en Cirus y Lel.

La recarga del acuífero de Serral-Salinas se produce fundamentalmente por la infiltración de lluvia. Por su parte, las salidas se realizan mediante la explotación de los numerosos pozos de bombeo que se destinan al regadío y abastecimiento urbano e industrial de las poblaciones limítrofes. En el sector alicantino del acuífero, el agua explotada se destina al abastecimiento de Elda, Salinas, Pinoso, La Romana y Algueña, y al riego del valle del Vinalopó y de Pinoso. El balance hídrico medio del acuífero, en la provincia de Alicante, se indica a continuación (DPA-IGME, 2013, in prep.). De este se deduce un consumo medio anual de reservas de 8 hm<sup>3</sup>/año.

**Entradas (hm<sup>3</sup>/año)**

Infiltración de lluvia	4,00
Total entradas	4,00

**Salidas (hm<sup>3</sup>/año)**

Bombes urbanos y agrícolas	12,00
Total salidas	12,00

En DPA-IGME (2013, in prep.) se indica que el agua subterránea del acuífero de Serral-Salinas es hidroquímicamente muy heterogénea. En el sector oriental los sondeos que captan el Jurásico, al norte de Salinas, tienen facies bicarbonatadas cálcico-magnésicas, con conductividades eléctricas (CE) del orden de 500 µs/cm, y temperaturas próximas a los 21°C. En este mismo sector el resto de sondeos presenta facies bicarbonatada-sulfatada mixta o bicarbonatada- clorurada mixta, con aguas más mineralizadas y con temperaturas del orden de 30°C. En el sector centro-occidental los sondeos situados al noroeste y que captan el Cretácico inferior, presentan una facies clorurada sódico- magnésica y temperaturas en torno a los 24°C. Más al sur, en el sector central, las facies son bicarbonatada-clorurada cálcico-magnésica o bicarbonatada-clorurada mixta, con CE comprendidas entre 590 y 965 µs/cm. Con todo, en términos generales, las aguas son aptas para todo uso.

### 3 METODOLOGÍA

Para el cálculo del volumen de reservas totales del acuífero de Serral-Salinas se ha realizado un modelo geológico 3D. Se han utilizado los códigos *Gocad* y *3D GeoModeller*, donde se ha integrado información cartográfica y estructural, geofísica (sísmica de reflexión y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo), 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 Serral-Salinas, ha permitido reconstruir 5 superficies geológicas y 13 fallas que limitan a 5 unidades geológicas del modelo 3D (tabla 1). 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: 845-Yecla, 870-Pinoso	Cartografía Magna,
	Datos estructurales	373 medidas de dirección y buzamiento estratificación	Cartografía geológica y fotointerpretación
	Ortofotografías MDT	Ortofotografías y MDT 10m	IGN
Subsuelo	Sondeos	38 sondeos	DPA e IGME
	Líneas sísmicas	RV-60, RV-78, RV-79, RV-63, RV-64 y RV-80 115 km de líneas a interpretar	Repsol e IGME
	SEDT	94 SEDT	IGME

Tabla 2. Datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de Serral-Salinas.

Los datos de superficie corresponden principalmente a los contactos litológicos entre las formaciones y los contactos de falla. Estos contactos provienen de la cartografía geológica 1:50.000 del IGME (IGME, 1984a y b), 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 y de nuevos datos adquiridos a partir de fotointerpretación. El total de datos de buzamiento incorporado al modelo es de 373.

Para la construcción del modelo geológico 3D se han utilizado las columnas litológicas de 38 sondeos mecánicos. Esta información proviene de la base de datos del grupo de Ciclo Hidrológico de la DPA y de la base de datos de sondeos del IGME. Los sondeos de la DPA 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 390 metros, siendo el sondeo Pozo Garrincho el más profundo con 820 metros.

También se han incorporado al modelo geológico 3D los horizontes sísmicos interpretados y convertidos a profundidad de las líneas RV-60, RV-78, RV-79, RV-63, RV-64 y RV-80. Algunas de estas líneas se encuentran en formato digital *seg-y* y han sido cedidas por la compañía Repsol. Otras se han recopilado de la base de datos del IGME en formato analógico y se han convertido a formato *seg-y*. Se han interpretado un total de 115 kilómetros de líneas sísmicas.

En todo el valle con relleno cuaternario y terciario al sureste de la Sierra de Salinas, se realizó una campaña de SEDTs. Se han utilizado los modelos de capas de las curvas de resistividad (ITGE 1992).

La distribución de los datos de superficie y subsuelo que han permitido construir el modelo 3D se representan en la figura 7. 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).

#### 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*.

### WORKFLOW MODELIZACIÓN GEOLÓGICA 3D

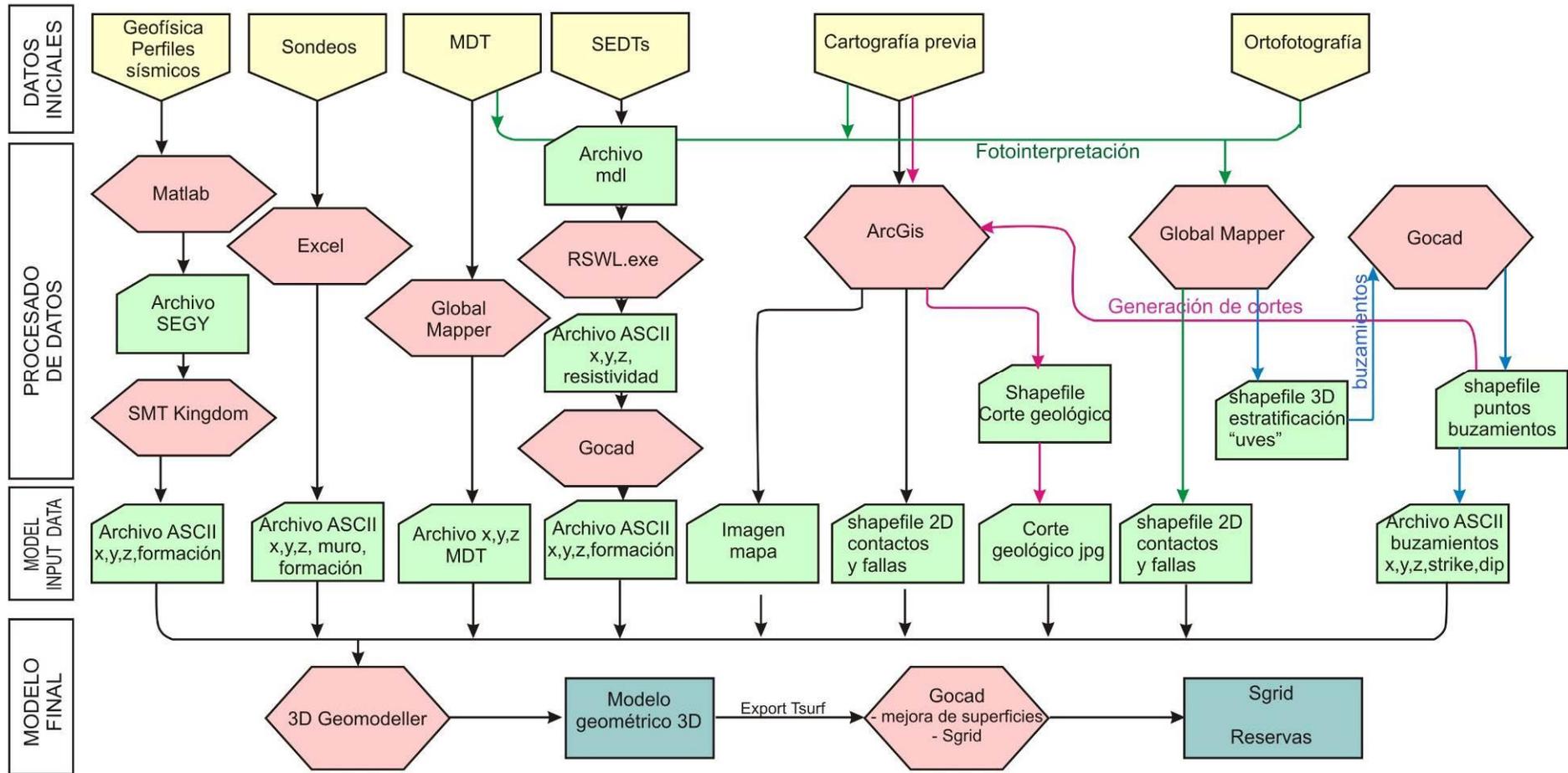


Figura 8. Diagrama de flujo del procesamiento de los datos para la realización del modelo geológico.

### 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 usado para la exportación del MDT al formato xyz requerido por *3D Geomodeller*. También se ha utilizado para la digitalización en un entorno 3D de la intersección de la estratificación con la topografía.

### 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 electromagnéticos en el dominio del tiempo a los formatos requeridos por *3D Geomodeller* y *Gocad*.

En los siguientes párrafos se describirá brevemente la secuencia metodológica utilizada para la construcción del modelo geológico 3D (figura 8).

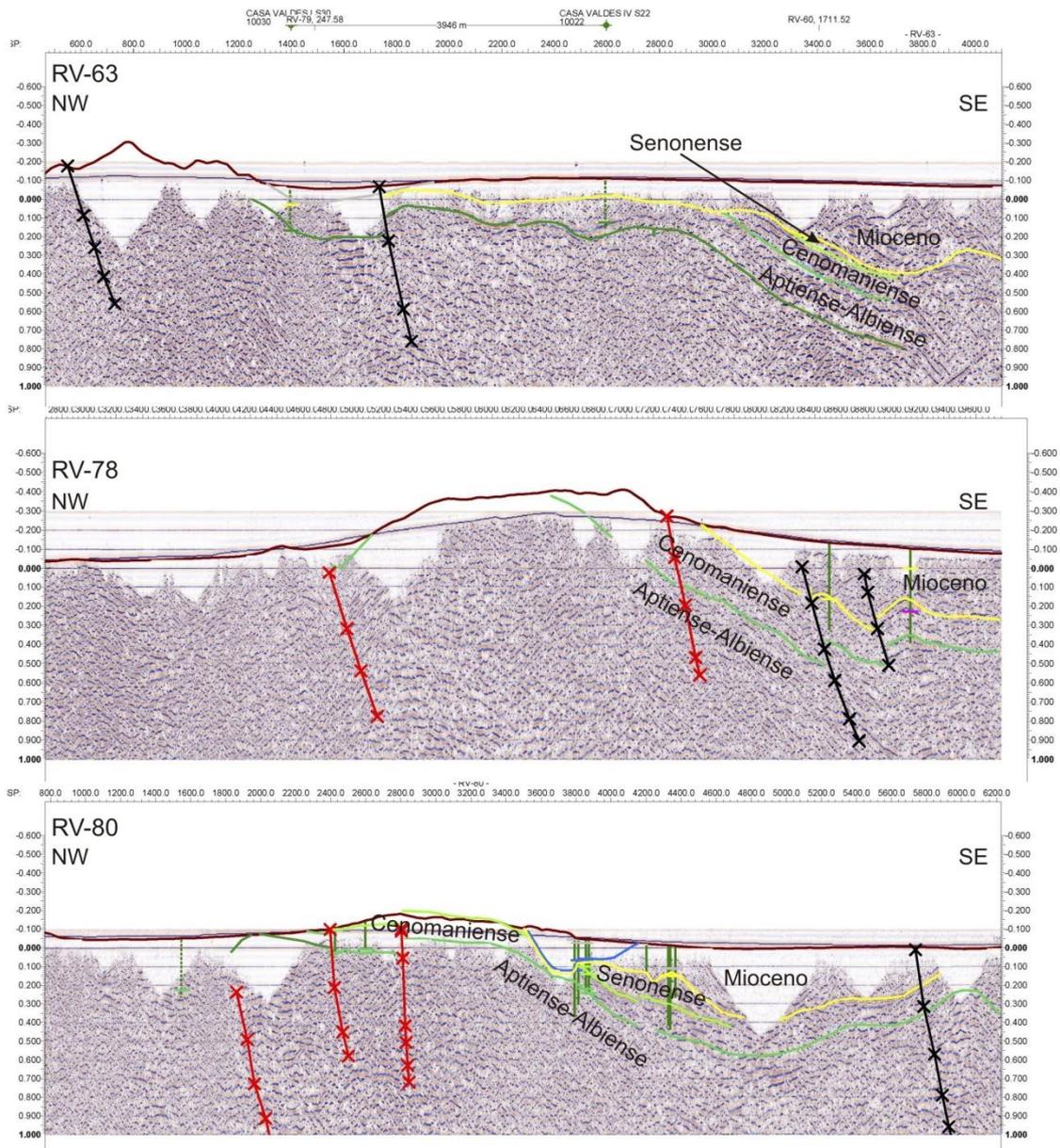
### **Perfiles sísmicos**

Parte de los perfiles sísmicos utilizados en este proyecto se encuentran originalmente en formato digital *seg-y* por lo que se pueden importar directamente al programa *SMT Kingdom* para interpretar los reflectores sísmicos de interés. (RV-79 y RV-60). El resto de perfiles utilizados en este proyecto se encuentran originalmente en formato analógico (imagen tif escaneada del papel de las líneas RV-63, RV-78, RV-64 y RV-80) en la base de datos geofísica del IGME. Por tanto, el primer paso que se realiza es el de la transformación de estos perfiles a un formato digital estándar *seg-y*. Para ello se ha utilizado la aplicación *Image2segy* (Farrán, 2007) que se ejecuta desde el programa *Matlab*. Los archivos *seg-y* obtenidos se pueden cargar en el programa *SMT Kingdom* y de esta forma se pueden interpretar los reflectores de interés.

Los reflectores interpretados han sido el muro de la unidad Aptiense-Albiense, el muro de la unidad Cenomaniense, el muro de la unidad Senonense, el muro de la unidad Paleógena y el muro de la unidad Neógena (figura 9).

Desafortunadamente no existe ningún sondeo profundo que corte las formaciones jurásicas ni datos de velocidad de las formaciones obtenidas en pozo. No obstante, se ha realizado un intento de transformación a profundidad de los horizontes interpretados utilizando los datos de velocidades NMO generados durante el procesado sísmico. A partir de la velocidad NMO se obtuvo una ecuación polinómica de segundo grado que se ajustaba 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 redujeron en un 15%. Una vez calculada la ley de transformación tiempo velocidad, se transforman las columnas litológicas de los sondeos mecánicos de profundidad a tiempo para determinar que reflectores corresponden a las unidades cortadas por los sondeos. 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. No obstante, 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 dos líneas disponibles y convertidos a profundidad se exportan a un archivo ASCII (x, y, z, formación). Este archivo se importará desde *3D Geomodeller* para utilizarlos en la construcción del modelo geológico 3D (figura 8).



**Figura 9.** Perfiles sísmicos RV-63, RV-78 y RV-80 en formato digital seg-y y profundidad en tiempo doble. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos. La posición de los perfiles se indica en la figura 7.

### **Sondeos mecánicos**

Los sondeos mecánicos recopilados en la base de datos del IGME y suministrados por la DPA 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 electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT)

Los SEDTs se han obtenido de la base de datos del IGME. Se han utilizado los modelos finales de resistividad-espesor de capas con el siguiente formato:

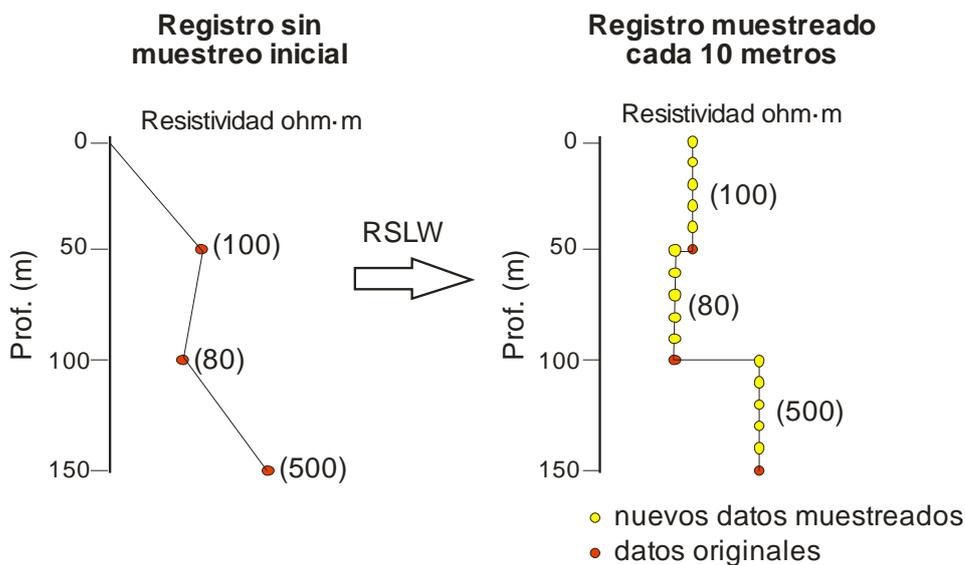
```

                                CESSR15

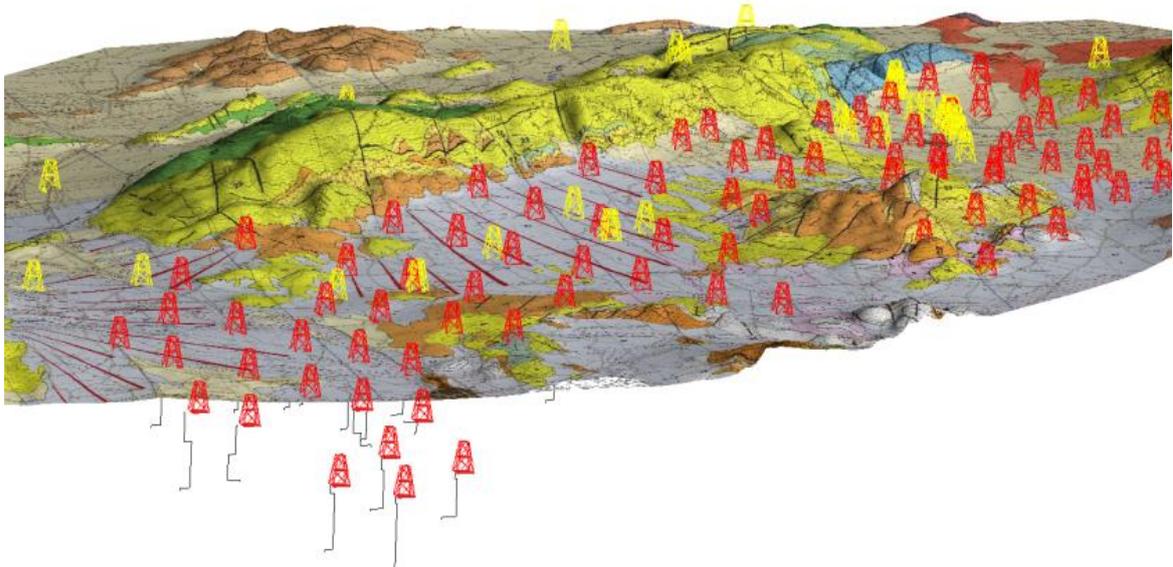
MODEL:      3 LAYERS

RESISTIVITY THICKNESS      ELEVATION      CONDUCTANCE (S)
(OHM-M)      (M)          (M)      (FEET)    LAYER      TOTAL
-----
38.00        5.0          0.0       0.0       0.1       0.1
112.00       367.0        -5.0      -16.4     3.3       3.4
28.00
  
```

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 10). 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 11).



**Figura 10.** Transformación realizada en las curvas con el programa *RSLW.exe*



**Figura 11.** Vista 3D de los sondeos mecánicos (amarillo) y SEDT (rojo) 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*.

En el proceso de fotointerpretación se ha podido visualizar las superficies de estratificación sobre el MDT. Al digitalizar estas superficies se obtiene una línea 3D que se corresponde con la intersección de la estratificación con la topografía. Esta línea 3D está directamente relacionada con la dirección y buzamiento de la estratificación. Para obtener estos datos, se ha digitalizado en *Global Mapper* la estratificación. Las líneas 3D se han importado al programa *Gocad* y se han obtenido los planos de estratificación que se ajustan a estas líneas (figura 12). Mediante este procedimiento se han conseguido 86 nuevos datos de dirección y buzamiento adicionales a los datos medidos en campo o indicados en los mapas geológicos previos. El conjunto de datos de buzamiento se importan en *3D Geomodeller* como datos de entrada que condicionan el modelo matemático de superficies de potencial. Además estos datos se utilizan para la realización de los cortes geológicos 2D, como se describe a continuación.



**Figura 12.** Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Salinas con Global Mapper.

Los cortes geológicos son datos fundamentales para la construcción de superficies en *3D Geomodeler*. 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.

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 Geomodeler* construye un modelo geométrico 3D de las superficies que limitan las unidades geológicas del acuífero de Serral-Salinas.

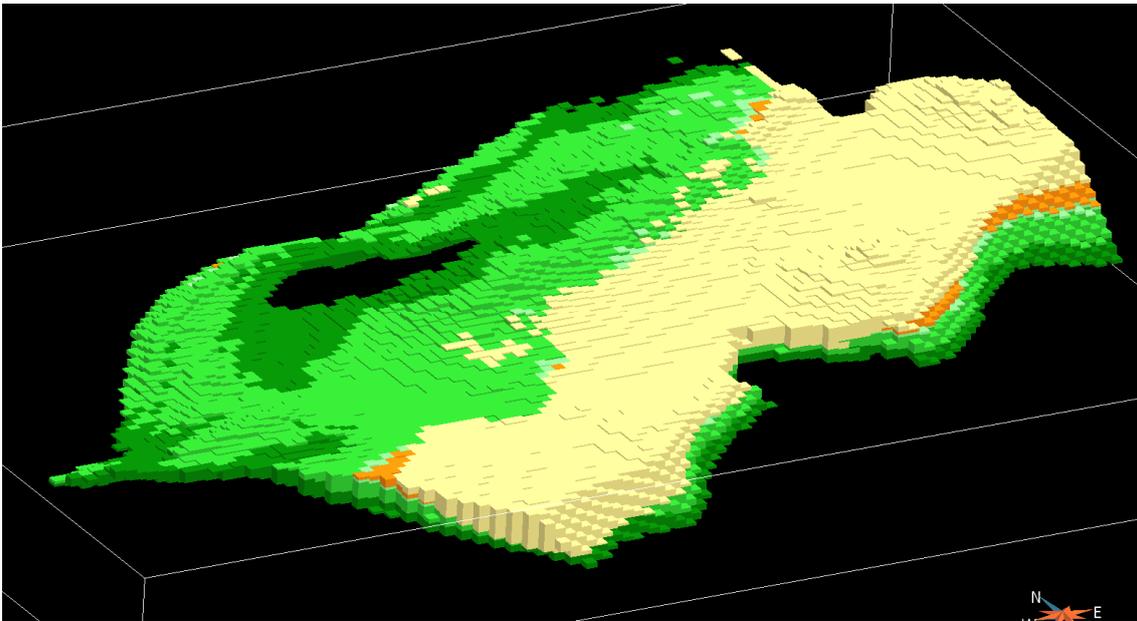
### **Edición en Gocad**

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 Geomodeler* 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 demasiado 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 este proyecto se ha generado un *voxet* (figura 13), es decir, una malla tridimensional con los ejes X, Y y Z donde cada celda tiene una propiedad litológica. Este *voxet* se ha construido en *3DGeomodeller* y posteriormente se ha importado a *Gocad*.



**Figura 13.** Modelo *voxet* de Sierra de Salinas. Cada celda tiene un atributo litológico.

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 Serral-Salinas se está realizando un estudio petrográfico y se ha calculado la porosidad de 44 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 7. 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 ( $p_o$ ), 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

Actualmente, se está realizando un estudio petrográfico de las muestra recogidas en los afloramientos carbonáticos del acuífero de Serral-Salinas. El objeto de este trabajo consiste en establecer la correlación entre la fábrica de las rocas carbonáticas y sus propiedades físicas (Dürrast y Siegesmund, 1999). Se identificaran los principales elementos texturales y se clasificaran las muestras según los esquemas propuestos por Dunham (1962), Folk (1959, 1962) y Lucia (1995). Asimismo, se caracterizará la morfología y el tamaño de los poros, y la existencia y distribución de fisuras en las muestras estudiadas.

Para el estudio petrográfico se utiliza 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 realizan 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 44 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 elástico de las formaciones acuíferas.

Una vez calculado el modelo geológico 3D del acuífero de Serral-Salinas se procede a la construcción de un *stratigraphic 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.

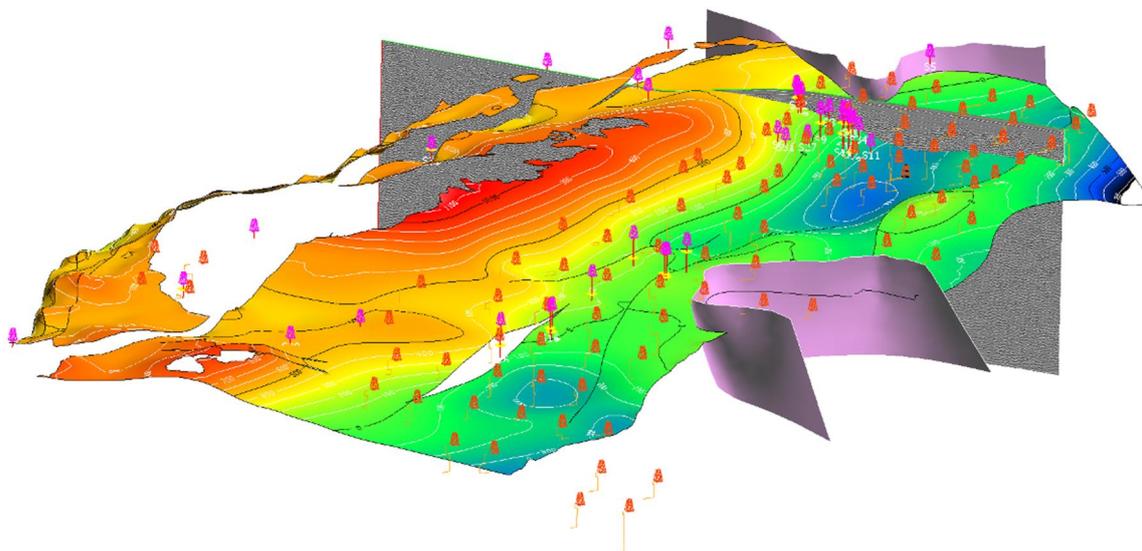
De esta forma se han calculado las curvas de reservas subterráneas que resultan de aplicar porosidades abiertas que corresponden a los percentiles 25 y 75 de la muestras recogidas en campo (Anexos II y III) y los correspondientes coeficientes de almacenamiento elástico de cada una de las formaciones 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 (IGME, 2007) 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.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Modelización 3D

El modelo geológico 3D del acuífero de Serral-Salinas 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 5 unidades o formaciones geológicas, limitadas a techo y muro por superficies estratigráficas y lateralmente por fallas y diapiros triásicos.



**Figura 14.** Vista 3D del muro del Cenomaniense del Acuífero de Serral-Salinas junto con los sondeos mecánicos (violeta), los SEDTs (rojo) y la línea sísmica RV-80.

Las formaciones geológicas modelizadas son las siguientes:

- Unidad Neógena
- Unidad Paleógena
- Unidad Senonense
- Unidad Cenomaniense
- Unidad Aptiense-Albiense

El modelo geológico 3D está limitado al noroeste por el cabalgamiento frontal de la Sierra del Serral y Sierra de Salinas sobre el Prebético externo. El límite sureste corresponde aproximadamente al mismo límite del acuífero definida por la DPA y que corresponde a un cabalgamiento que separa La Sierra de la Sima y la Laguna de Salinas del Diapiro de Pinoso y la Sierra de la Umbría. El límite noreste estaría definido por el diapiro del Vinalopó o de Villena y el límite suroeste por la falla que separa la Sierra del Carche (fuera del modelo) de la Sierra de las Pansas.

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 7 se mostró

la distribución espacial en planta de los datos utilizados para construir el modelo geológico.

En la tabla 3 se muestran los diferentes tipos de datos utilizados para cada una de las unidades modelizadas.

Unidades modelizadas	Nuevos buzam. adquiridos	Nuevos contactos cartograf.	Número de sondeos que perforan la unidad	Horizontes sísmicos interpretados	Interpr. SEDT
Neógeno	No	Si	26	SI	SI
Paleógeno	Si	Si	1?	SI	?
Senonense	Si	Si	9	SI	?
Cenomaniense	Si	Si	12	SI	?
Aptiense-Albiense	No	Si	10	SI	?

*Tabla 3. 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 de la unidad. En la figura 15 se muestran cortes geológicos realizados al modelo 3D.

### **Unidad Neógena**

Esta unidad incluye a sedimentos neógenos y cuaternarios que afloran al sur de la Sierra de Salinas. Encima de estos sedimentos se desarrolla una formación cuaternaria de potencia generalmente reducida aunque en el sector de la población de Salinas puede alcanzar potencias de hasta 150 m (Sondeo Salinas).

La unidad se encuentra discordante sobre el Paleógeno, Senoniense y Cenomaniense. La geometría de esta unidad es la de un sinclinal principal de dirección N60E con el desarrollo de anticlinales adyacentes hacia el SE del sinclinal en la Sierra de la Sima. La vergencia de estos anticlinales es hacia el NO. El buzamiento medio del flanco NO de la sinforma es de unos 20° hacia el SE. Los anticlinales situados más la sur muestran buzamientos de los flancos más moderados entre 10-20°.

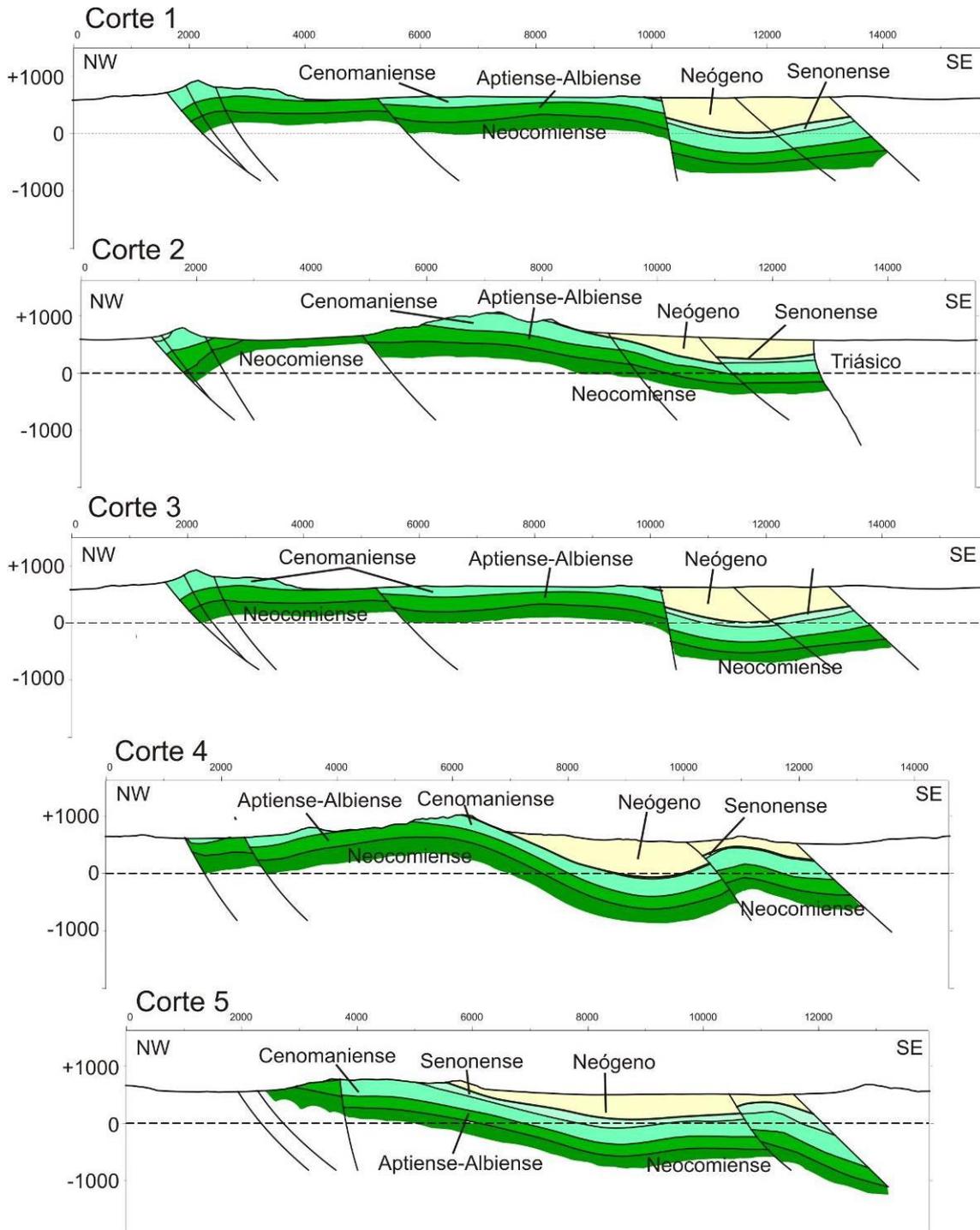
La profundidad de esta unidad se puede observar en el mapa de isobatas del muro de la unidad (figura 16). Las máximas profundidades se encuentran en el eje del sinclinal principal con profundidades medias de 40 metros sobre el nivel del mar.

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 570 metros. La máxima potencia de esta unidad estaría situada al sur de la población de Salinas y alcanza un espesor de 670 metros. En el sector situado al sur de la población de Lel la unidad neógena alcanza un espesor máximo de 620 m.

Esta unidad se ha modelizado a partir de diversos tipos de datos. Los modelos de resistividad de los sondeos electromagnéticos 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 o cenomanienses infrayacentes, aunque no se puede descartar que el aumento de la resistividad esté relacionada con calizas o calcarenitas resistivas miocenas.

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 y de los sondeos mecánicos que cortan al Neógeno y convertidos a tiempo según la ley de velocidad obtenida. Un total de 26 sondeos cortan la base de la unidad o no llegan a perforarla en su totalidad.

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



**Figura 15.** Cortes geológicos realizados al modelo 3D generado en el proyecto. La posición de los cortes se muestran en las figuras 16, 17, 18 y 19.

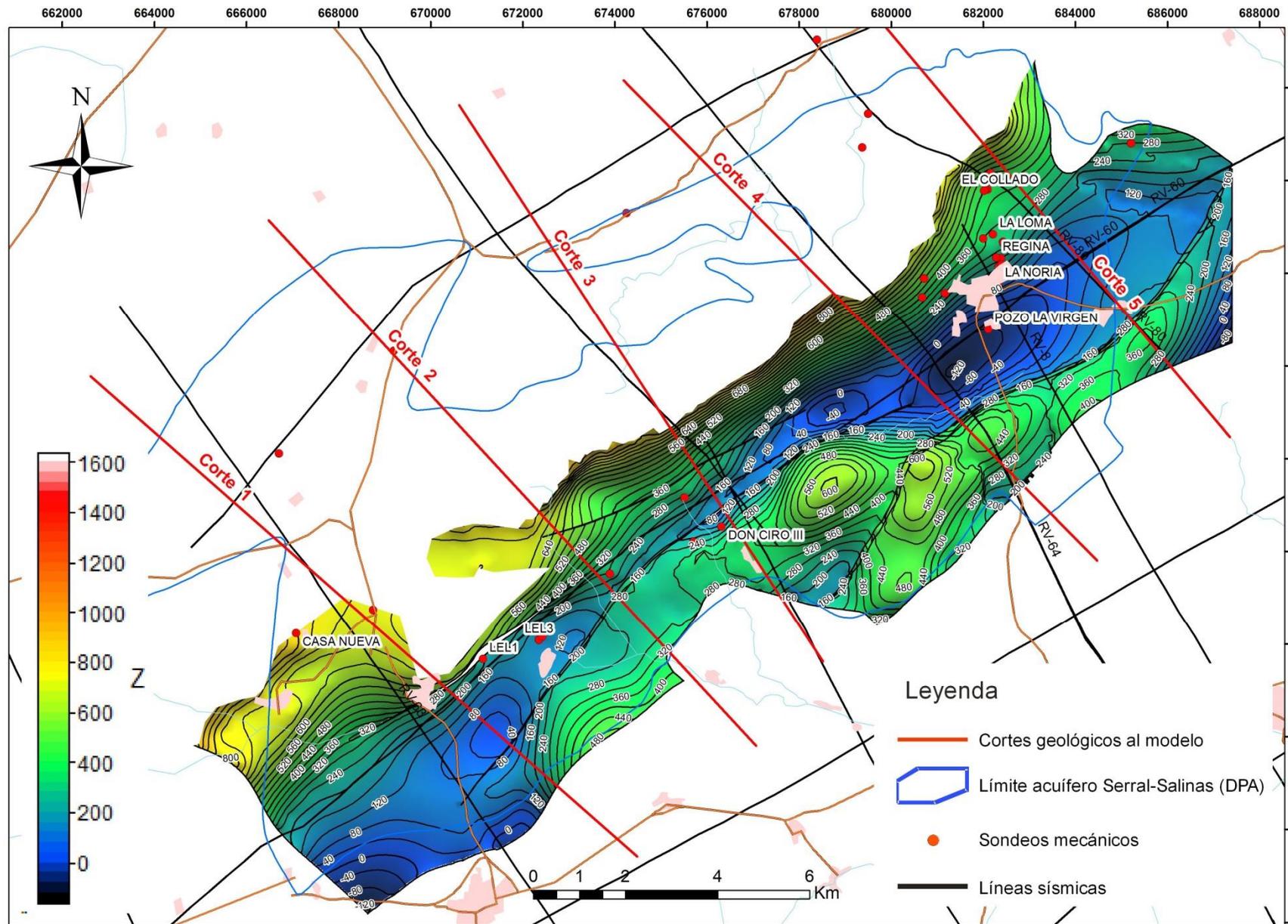


Figura 16. Mapa de isobatas del muro de la unidad Neógena.

## **Unidad Paleógena**

Mientras que los sedimentos paleógenos que afloran en la Sierra del Carche alcanzan los 500 metros de espesor, dentro de los límites del acuífero de Serral-Salinas apenas existen afloramientos de esta unidad que se encuentra generalmente erosionada por el Mioceno suprayacente. Además, bajo el relleno neógeno, ningún sondeo perforó sedimentos paleógenos, aunque el sondeo Lel-1 podría cortar un paquete oligoceno de margas y margocalizas. El modelo geológico 3D muestra que en su mayor parte el paleógeno se encuentran erosionado, a excepción de la alineación Lel . Sierra de la Sima donde el espesor del Paleógeno tendría unos 200 metros de potencia. En la Sierra de la Sima, el muro de la unidad estaría situado a unos 300 m s.n.m. En cualquier caso, la fiabilidad de la geometría de esta unidad en el modelo 3D es muy pequeña debido a la ausencia de datos de sondeos y que no existen apenas afloramientos de la unidad.

## **Unidades del Cretácico**

Las unidades del Cretácico Superior formadas principalmente por las calizas del Senonense y por las dolomías masivas del Cenomaniense, pertenecientes ambas unidades al acuífero de Serral-Salinas.

### **Senonense**

La unidad Senonense aflora únicamente en el sector oriental de la Sierra de Salinas, mientras que en la zona central y occidental de la sierra está erosionada al igual que en la Sierra del Serral y en la Sierra de las Pansas. Bajo la depresión Neógena, al sureste de la Sierra de Salinas, esta unidad está cortada generalmente por los sondeos mecánicos. Sin embargo en el área de la Herrada los sondeos Lel-2, Lel-3, La Herrada y Don Ciro I,II y III el Mioceno está directamente sobre el Cenomaniense por lo que en este sector la unidad Senonense está erosionada.

La geometría de esta unidad al igual que se observa para la unidad neógena es un sinclinal adyacente al anticlinal de la Sierra de Salinas de dirección N50°E (figura 17). Los buzamientos en el flanco norte de este sinclinal son de unos 22° hacia el sureste. En el sector SE de este sinclinal se desarrollan pequeños anticlinales con desarrollo de fallas inversas al frente de los anticlinales. La vergencia de estos anticlinales como el de la Sierra de la Sima es hacia el noroeste. La potencia o espesor medio de esta unidad es de unos 80 metros. Las profundidades máximas alcanzadas para el muro de la unidad se encuentran en el eje del sinclinal al sur de la población de Salinas con cotas de -150 m. s.n.m (figura 17).

La construcción de esta superficie se ha realizado a partir datos cartográficos de superficie y buzamientos de la unidad, sondeos mecánicos y la interpretación de los horizontes sísmicos a partir de estos sondeos. La geometría 3D de esta unidad tiene lógicamente una mayor fiabilidad en las áreas en las que está perforada por los sondeos. Por lo tanto, el sector más meridional de la unidad donde hay ausencia de sondeos es menos verosímil o está sujeta a una mayor interpretación.

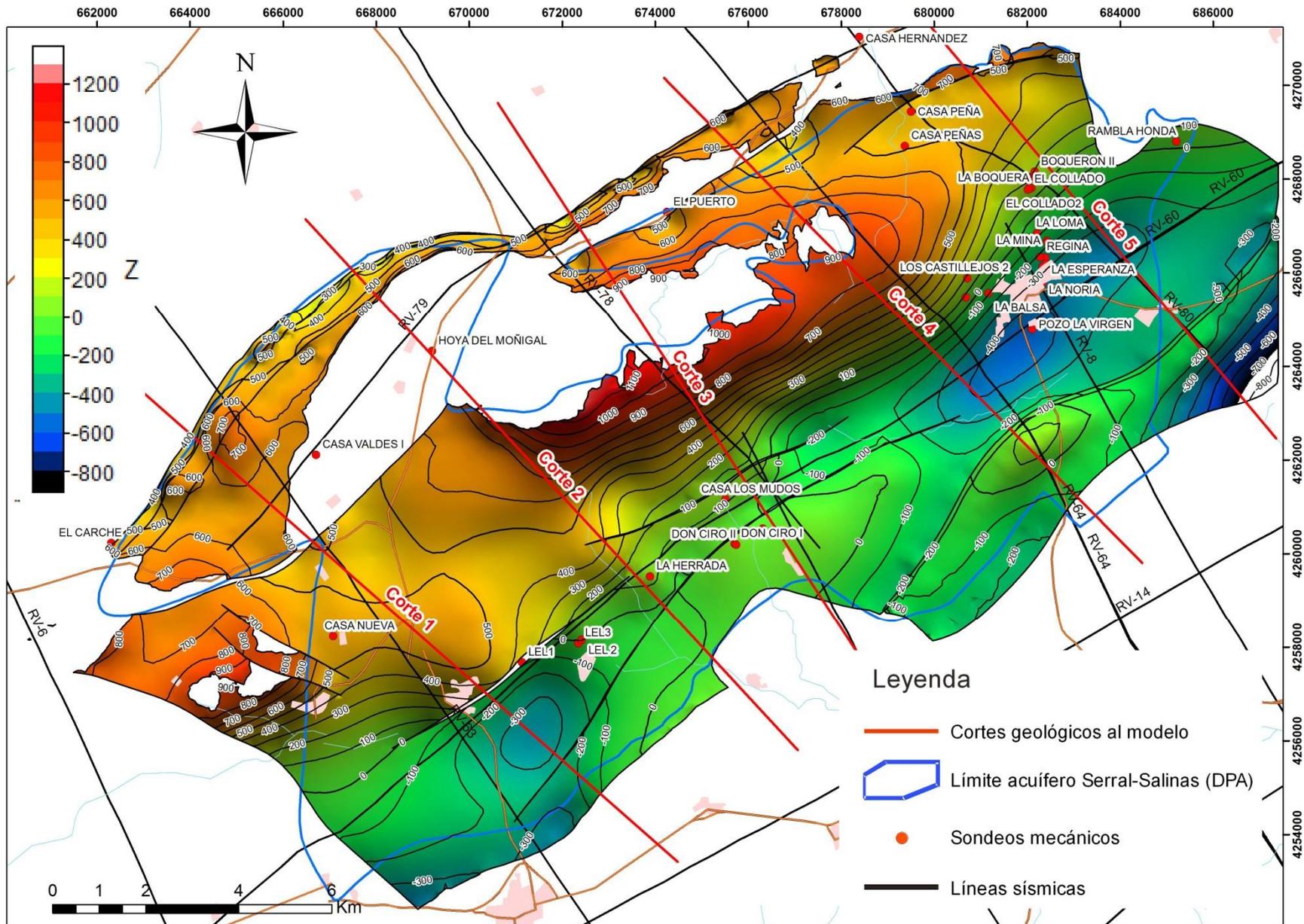
### **Cenomaniense**

El Cenomaniense aflora ampliamente en toda la Sierra de Salinas, Serral y Las Pansas. En la central-occidental de la Sierra de Salinas se puede reconocer el muro de la unidad que descansa sobre el Albiense y en la región oriental se observa el techo de la unidad con el Senonense encima. En la Sierra del Serral se reconocen en algunos

afloramientos la base de la unidad con la estratificación buzando fuertemente hacia el noroeste.

La geometría de la Sierra de Salinas corresponde a anticlinal paralelo y cilíndrico con una longitud de 18 km y vergencia noroeste, donde el flanco noroeste está vertical o invertido mientras que el flanco SE tiene buzamientos moderados de unos 20° al sureste. Hacia el oeste el anticlinal tiene su cierre periclinal que se ve interrumpido por una falla de gran longitud de dirección NO-SE que limita la Sierra del Carche con la Sierra de las Pansas. En el flanco noroeste del pliegue anticlinal se desarrolla una falla inversa lístrica.





**Figura 18.** Mapa de isobatas del muro de la unidad Cenomaniense (metros sobre el nivel del mar).

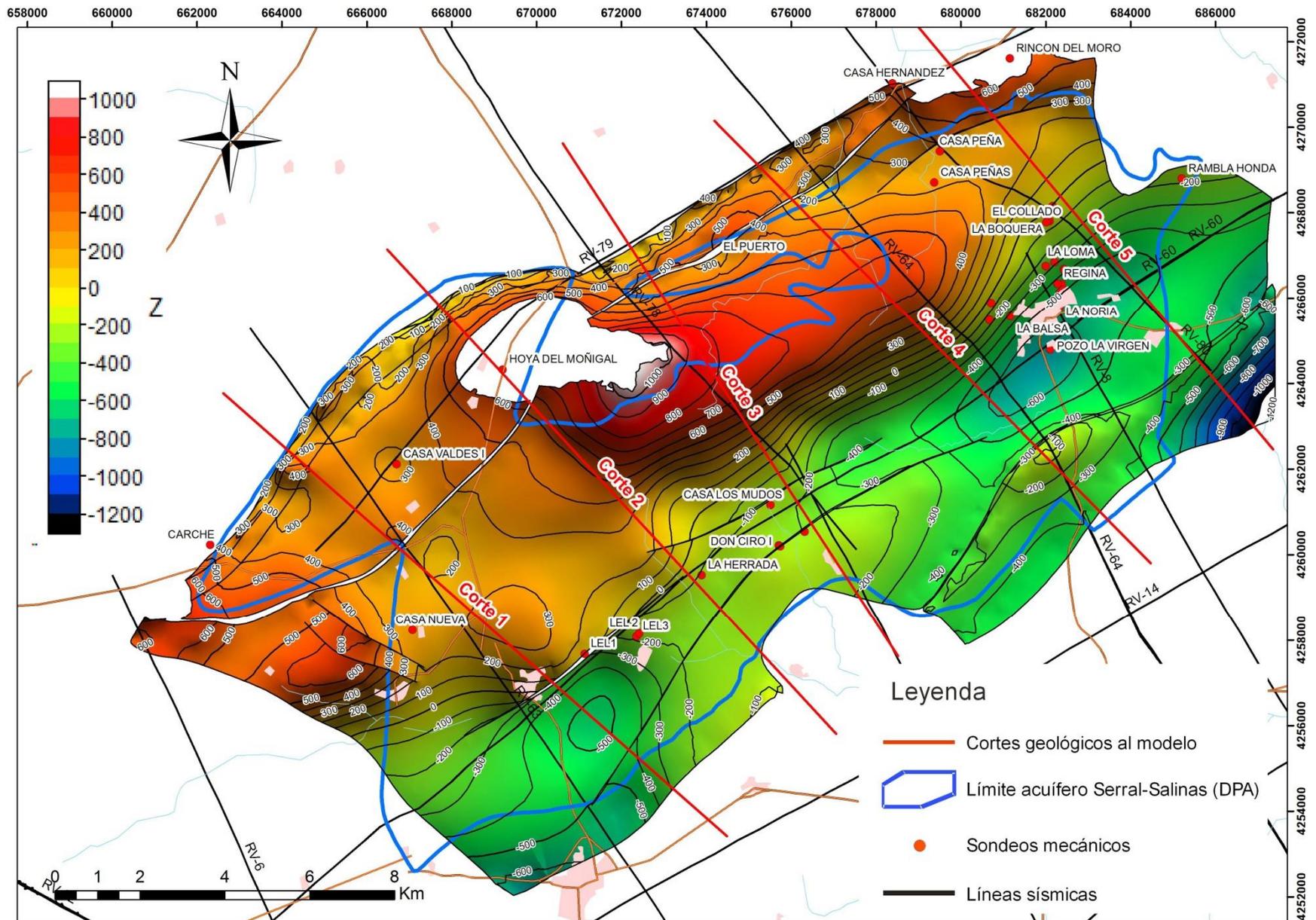


Figura 19. Mapa de isobatas del muro de la unidad Apto-Albiense (metros sobre el nivel del mar).

Sin embargo el salto parece normal ya que pone en contacto la unidad Albiense-Aptiense en el bloque de muro con la unidad Cenomaniense en el bloque de techo. Esto se podría explicar debido a que esta falla funcionase como normal en el Cretácico y posteriormente sufriera una inversión tectónica durante la compresión alpina que no lograra recuperar la extensión original. Al sur de la Sierra de Salinas se desarrolla el sinclinal y anticlinales menores de la Sierra de la Sima al igual que en la unidad Senonense.

En la Sierra del Serral el Cenomaniense se encuentra intensamente fracturado con pliegues apretados y fallas inversas sucesivas en el flanco norte, lo que motiva la repetición de la serie y la disposición vertical e invertida de las capas. Sin embargo, esta complejidad tectónica no ha sido modelizada debido a la escala del modelo 3D. En la Sierra de las Pansas se desarrollan pliegues suaves de dirección ENE-OSO a NE-SO.

El espesor medio de esta unidad es de unos 300 metros aunque varía de oeste a este en la Sierra de Salinas, siendo más potente en el sector occidental con unos 320 m y menos potente en el sector oriental con unos 290 metros. En la Sierra del Serral esta unidad tiene un espesor medio de 490 metros debido repeticiones tectónicas de la unidad. Las mayores profundidades de la unidad se alcanzan en el eje sinclinal bajo la depresión neógena con valores máximos de -460 m.s.n.m para el muro de la unidad Cenomaniense (figura 18).

Al igual que para la unidad Senonense, la construcción de esta superficie se ha realizado a partir datos cartográficos de superficie y buzamientos de la unidad, sondeos mecánicos y la interpretación de los horizontes sísmicos a partir de estos sondeos. Esta unidad ha sido perforada por unos 12 sondeos alcanzándose el muro de la unidad en 9 de los sondeos.

#### Unidad Aptiense-Albiense

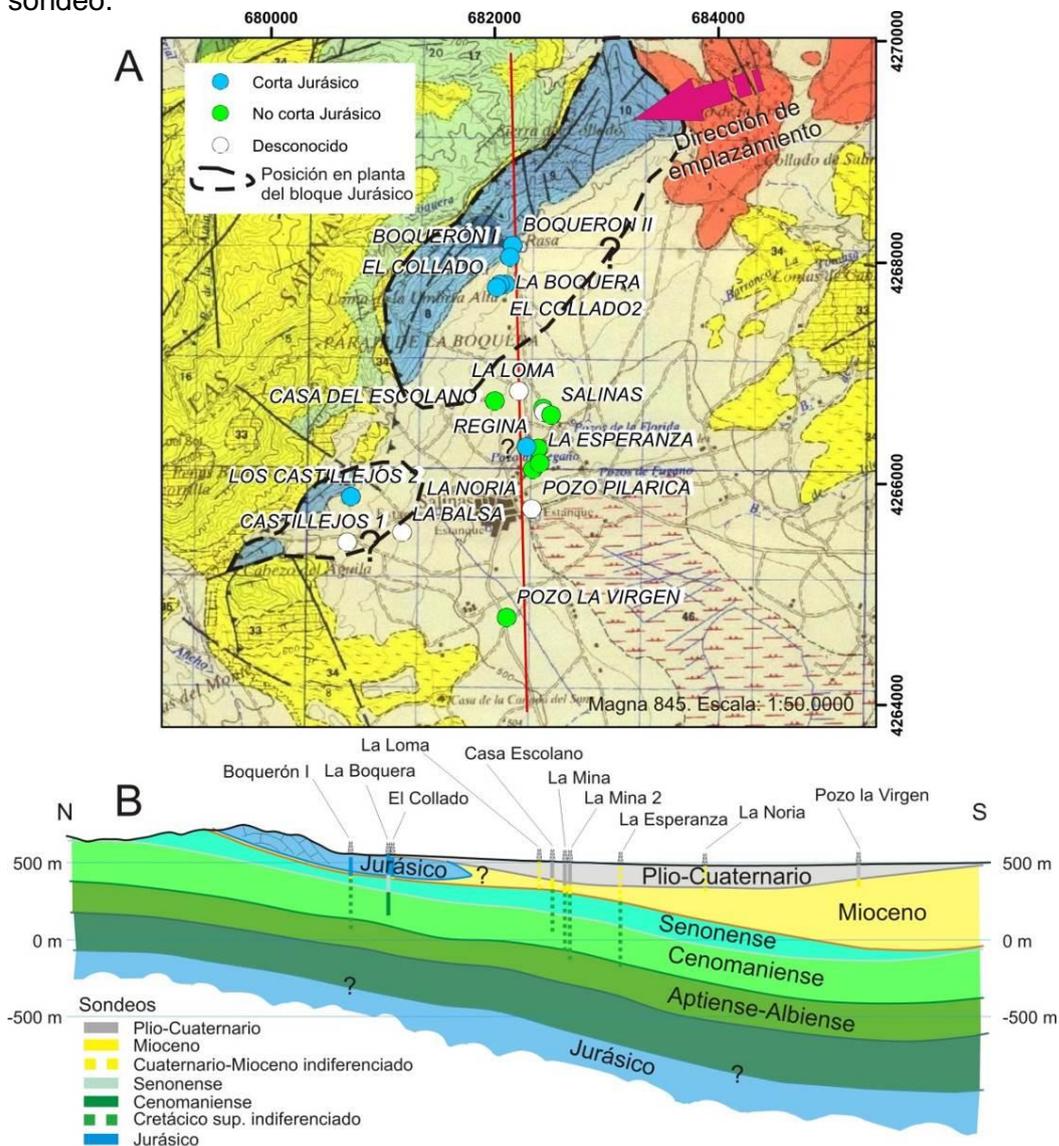
Esta unidad comprende las calizas con Toucasias, arenas y calcarenitas del Aptiense y las calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas, arenas y margas del Albiense. Se han agrupado en el modelo 3D las dos unidades estratigráficas por la dificultad para diferenciar ambas unidades en los sondeos y a que debido a la similitud litológica pueden tener un comportamiento acuífero similar. Esta unidad aflora en el núcleo anticlinal de la Sierra de Salinas en el sector central y occidental. También aflora en el paraje Umbría Alta y en el Cerro del Recodo en el noreste de la Sierra de Salinas. También aflora a la base de las dolomías cenomanienses en la Sierra del Serral y en la depresión cuaternaria de la Hoya del Modillar.

Es destacable el aumento de potencia desde el oeste en la vecina Sierra del Carche con 400 metros de espesor para el Aptiense y Albiense hasta el este en la terminación oriental de la Sierra de Salinas con 200 metros de potencia. En general la potencia media para esta unidad es de 220 m. En la depresión del Modillar la potencia de la unidad es de unos 275 m, mientras que en el sector oriental de la Sierra de Salinas es de unos 215 metros. La profundidad del muro de la unidad, al igual que para las unidades cretácicas suprayacentes es mayor en el sinclinal situado bajo la depresión neógena al sureste de Sierra de Salinas con valores máximos de -680 m.s.n.m. (figura 19).

Esta unidad ha sido perforada en 10 sondeos, aunque en sólo tres de ellos, Casa Valdés I y IV y El Puerto se ha alcanzado el muro del Aptiense. Debajo de la unidad Aptiense-Albiense se sitúa el Barremiense y el Neocomiense de carácter acuitardo, pero la ausencia de datos no ha permitido modelizar esta unidad.

## Jurásico

Los únicos afloramientos de **rocas jurásicas** del acuífero de Serral-Salinas se localizan en el sureste de la Sierra de Salinas en el paraje conocido como Sierra del Collado y Barranco de la Boquera. En este sector se puede observar la serie completa Lías-Dogger-Malm compuesta por dolomías y calizas. La geometría de este bloque jurásico se corresponde con una losa de base plana y paralela a la estratificación cretácica y miocena infrayacente. La geometría interna de la losa muestra un anticlinal cortado por la base de la losa. El límite sureste de esta losa se puede estimar a partir de la desaparición de las rocas jurásicas en los sondeos de Casa Escolano, La Mina, La Mina 2 y La Esperanza. De esta manera, la superficie en planta estimada del bloque Jurásico es de unos 5 km<sup>2</sup>. Según los registros del sondeo Regina de la base de datos de la DPA, este sondeo cortaría rocas de edad jurásica hasta los 600 metros de profundidad (-105 m.s.n.m), si bien este dato es incompatible con la interpretación de los sondeos cercanos, por lo que habría que reinterpretar la columna de este sondeo.



**Figura 20.** A) Mapa geológico del sector este de Sierra de Salinas donde se representan los sondeos que cortan las dolomías y calizas jurásicas. Se estima la distribución en planta de las rocas jurásicas a partir de los afloramientos y de los sondeos. B) Corte geológico N-S que muestra la distribución de los afloramientos jurásicos. La geometría de las unidades cretácicas proviene del modelo geológico 3D realizado para este proyecto.

El origen de este afloramiento de rocas jurásicas estaría relacionado con el diapiro del Vinalopó o de Villena, adyacente al afloramiento jurásico. Este emplazamiento se debió de producir en el Langhiense, dado que a muro de las calizas jurásicas hay margas de esta edad. Este afloramiento corresponde a un olistolito de cresta diapírica, es decir, se ha deslizado desde la cresta del diapiro del Vinalipó. Este tipo de olistolitos es muy común en todo el Prebético, como por ejemplo el megaolistolito del Puig Campana formado por rocas jurásicas sobre un mioceno marino.

Se puede realizar una estimación del volumen de roca correspondiente a este olistolito. Suponiendo una superficie en planta de  $5 \text{ km}^2$  y unos 100 metros de potencia media, el volumen de roca total será de unos  $500 \text{ hm}^3$ . La porosidad media obtenida para las nueve muestras jurásicas obtenidas en campo es de 2,5%, lo que supone un volumen de huecos total para el olistolito de unos  $12.5 \text{ hm}^3$ .

## **Fallas**

Se han modelizado un total de 13 fallas que son aquellas que tienen un salto significativo para la escala del modelo 3D.

Las fallas de mayor longitud en el modelo 3D corresponde a fallas inversas de dirección NE-SO con trazas curvas y que generalmente quedan ocultas bajo los sedimentos cuaternarios, por lo que la posición real de las trazas de las fallas podrían variar ligeramente en algún caso.

En el flanco noroeste del pliegue anticlinal de la Sierra de Salinas se desarrolla una falla inversa lístrica de traza curvada, que en profundidad posiblemente despegan sobre las arcillas triásicas de facies Keuper. Sin embargo muestra un salto normal de 300 metros. Esto podría explicarse como una falla que ha sufrido inversión tectónica que no recupera el salto normal inicial. Otra posibilidad es que fuera una falla normal durante toda su evolución. Existen otras fallas de menor longitud paralelas a la traza axial del pliegue de Sierra de Salinas que muestran saltos normales de 220 a 530 metros. Por ejemplo, la falla situada entre las poblaciones de El Paredon y La Herrada tiene un salto de 530 metros y es necesario para explicar las diferencias de profundidades entre el Cenomaniense aflorante y el cortado por el sondeo Le1-1. Otra posible explicación para este salto podría ser la verticalización del flanco sur del pliegue de Salinas, aunque lateralmente no se observa este efecto.

En la depresión neógena al sur de Sierra de Salinas, también se han modelizado fallas lístricas al frente de los anticlinales y de reducido salto.

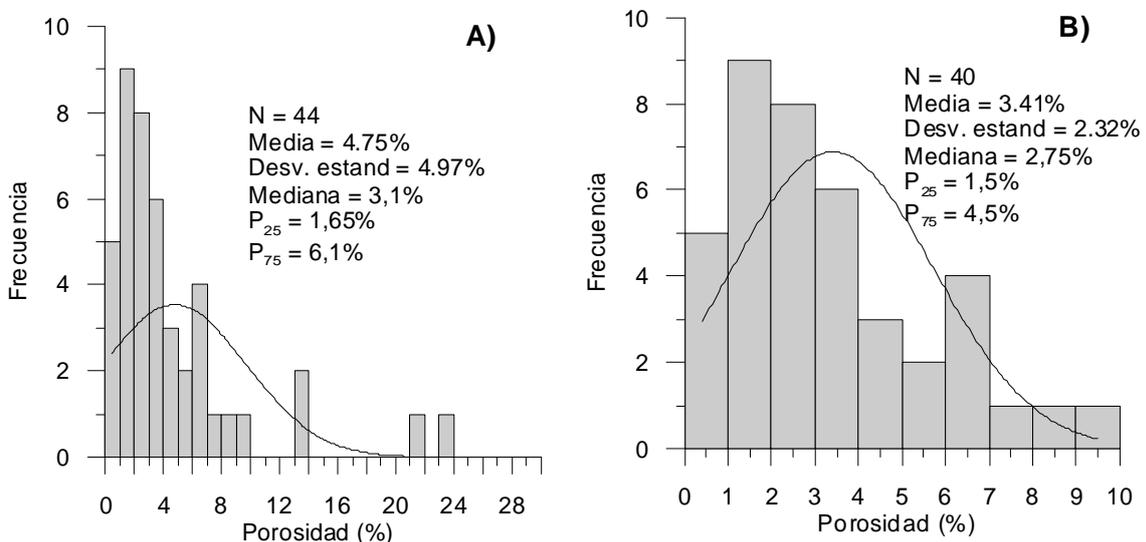
Existen otras pequeñas fallas de pequeño salto y dirección NO-SE como las modelizadas en la Sierra de las Pansas. Paralela a esta fallas se ha modelizado otra que corresponde al límite oriental del modelo y es una falla vertical de salto normal a oblicuo que limita el bloque de la Sierra de las Pansas con el bloque de la Sierra del Carche.

En la Sierra del Serral existen fallas inversas sucesivas en el flanco norte que motivan la repetición de la serie. En límite noreste del modelo 3D corresponde a unas fallas inversas que cabalgan la Sierra del Serral y Sierra de Salinas hacia el noroeste sobre el Prebético externo.

## 4.2 Sistema poroso

La distribución estadística de los valores de porosidad abierta determinados por inmersión en cámara de vacío se representa en la figura 21. La muestra estadística estudiada no se ajusta a una distribución normal y el valor medio de la porosidad abierta y la desviación estándar asociada es  $4,75 \pm 4,97\%$ . En la figura 21A se observa la presencia de varias muestras con porosidades anómalas ( $>12\%$ ) que se deben a la existencia de algunas fracturas abiertas en las probetas. En todo caso, la mediana y los percentiles 25 y 75 de la porosidad abierta de la totalidad de las muestras son de 3,1, 1,65 y 6,1 %, respectivamente. Se ha considerado conveniente eliminar los resultados de porosidad anómalos y tomar como representativos de la muestra estadística total a los estadísticos de posición que se presentan en la tabla 1 y cuyo histograma se representa en la figura 21B. Resultan por tanto, para un total de 40 muestras, una media y una desviación estándar de  $3,41 \pm 2,32\%$ , una mediana de 2,75% y unos percentiles 25 y 75 de 1,5 y 4,5%, respectivamente.

El valor de la mediana de la porosidad (tabla 4) es ligeramente superior al valor medio registrado en calizas y dolomías de la Cordillera Bética, que es del 3% (Pulido-Bosch *et al.*, 2004). Por otro lado, anteriores evaluaciones de reservas realizadas en este acuífero consideraron porosidades comprendidas entre el 3 y el 5% (IGME, 1979, 1993). Asimismo, debe ser destacado que la porosidad del volumen de roca vaciado entre 1956 y 2006 se ha promediado entorno al 1%, por lo que sería más próxima a la porosidad del percentil 25 de la muestra estadística considerada en esta investigación.



**Figura 21.** Histograma de los valores de porosidad abierta de las muestras recogidas en el acuífero de Serral. Salinas.

	Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) N=44	Porosidad (%) N=44	Porosidad (%) N=40
Media	2612	4,75	3,41
Des. vest	149	5,02	2,35
Mediana	2644	3,10	2,75
P25	2599	1,65	1,50
P75	2690	6,10	4,52
Máx.	2782	23,4	9,5
Mín.	2074	0,4	0,4

*Tabla 4. Principales estadísticos de posición de la densidad y porosidad de las muestras de roca analizadas.*

En la tabla 5 se muestran los valores de la mediana de la porosidad y el número de muestras consideradas correspondientes a las principales unidades geológicas modelizadas.

<b>Unidad</b>	<b>N</b>	<b>Porosidad (%)</b>
Jurásico	9	2,5
Aptiense-Albiense	13	2
Cenomaniense	18	4,15
Senonense	4	4,9

*Tabla 5. Valores medianos de porosidad de las muestras de roca analizadas clasificadas por edad litológica.*

El limitado número de muestras empleado en este trabajo no permite fijar un valor medio representativo por edades, pero, a grandes rasgos se puede observar que son las dolomías del Cenomaniense y las calizas del Senonense las representan un valor mayor mediano de porosidad abierta.

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

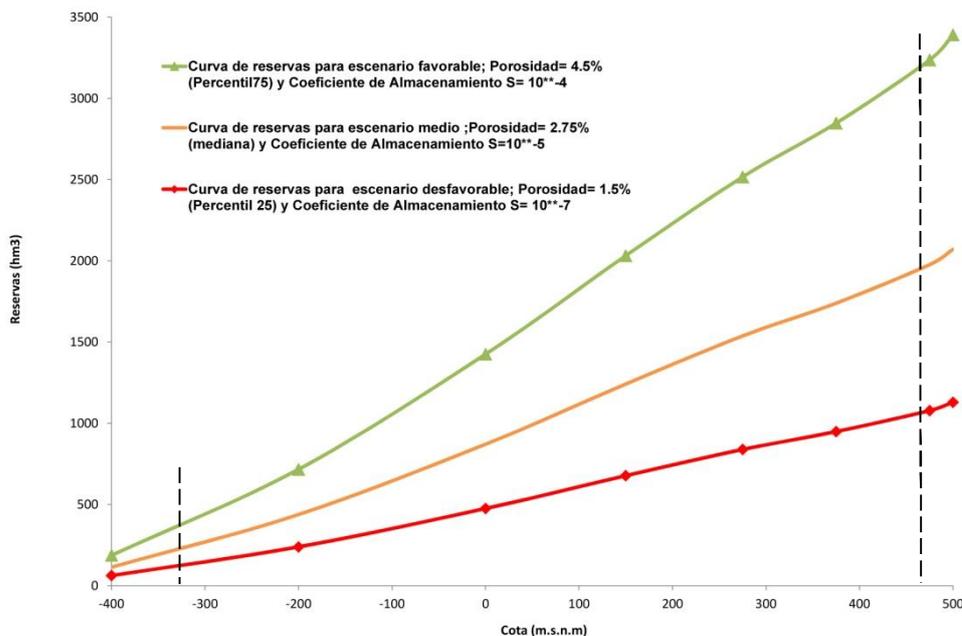
Los valores de reservas de agua subterránea calculados en el acuífero de Serral-Salinas, con los nuevos límites descritos con motivo de este trabajo se resumen en la gráfica de la figura 22, en la que se ha representado la curva de reservas correspondiente.

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 realizadas con motivo del modelo de flujo calibrado en régimen permanente en DPA-IGME (2007). Se ha considerado que el nivel piezométrico en esta situación quedaría entorno a los 510-520 m.s.n.m. en la zona de suroccidental, y que el punto de menor potencial coincide con el del manantial de Salinas, con 475 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 (1,5%) y un coeficiente de almacenamiento elástico de  $10^{-7}$ .
- ii) Estimación más favorable. En este caso se considera el valor de porosidad del percentil 75 de la muestra estadística (4,52%) y un S elástico de  $10^{-4}$ .
- iii)
- iv) Estimación media. Se ha considerado el valor de la mediana de la porosidad (3,41%) y un S elástico de  $10^{-5}$ .

Las reservas dinámicas que resultan en la situación más desfavorable son de  $51 \text{ hm}^3$ . 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  $155 \text{ hm}^3$ . El valor medio entre ambos extremos sería de  $95 \text{ hm}^3$ .



**Figura 22.** Curva de reservas del acuífero de Serral-Salinas obtenida a partir del modelo 3D. Las líneas verticales discontinuas indican la cota máxima (470 m.s.n.m.) y mínima (-330 m.s.n.m.) de la curva de explotación desde el sondeo Garrincho.

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 475 m.s.n.m., los cálculos se han realizado suponiendo que la superficie piezométrica es horizontal. Los resultados se indican en la figura 22. Las reservas máximas que resultan, según los cálculos realizados, están comprendidas entre 1129 y 3391 hm<sup>3</sup>. Con el valor mediano de la porosidad (2,75%) y un S de  $10^{-5}$  se consiguen unas reservas totales de 2071 hm<sup>3</sup>.

Las ecuaciones de las curvas de reservas representadas en la figura 22 se indican a continuación:

Reservas correspondientes al percentil 25 de porosidad ( $P_0 = 1,5\%$   $S=10^{-7}$ )

$$\text{Reservas (hm}^3\text{)} = -5 \cdot 10^{-07}x^3 + 0,0003x^2 + 1,2482x + 476,19$$

Reservas correspondientes al percentil 75 de porosidad ( $P_0 = 4.5\%$   $S=10^{-4}$ )

$$\text{Reservas (hm}^3\text{)} = 3 \cdot 10^{-11}x^5 \cdot 5 \cdot 10^{-9}x^4 \cdot 9 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,0017x^2 + 4,1049x + 1419,2$$

Reservas correspondientes a la mediana de la porosidad ( $P_0 = 2.75\%$   $S=10^{-5}$ )

$$\text{Reservas (hm}^3\text{)} = 2 \cdot 10^{-11}x^5 \cdot 3 \cdot 10^{-9}x^4 \cdot 5 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,001x^2 + 2,5078x + 867,29$$

Donde x es igual a la cota del nivel piezométrico.

## 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 Serral-Salinas. 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 Serral-Salinas (DPA-IGME, 2007), y se entiende que debería volver a hacerse, a la luz de los nuevos datos geológicos y geométricos aportados por el modelo geológico 3D que se presenta en este trabajo.

Además de la evaluación de reservas a diferente cota piezométrica del acuífero de Serral-Salinas, 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 del acuífero de Serral-Salinas. La estructura que define el acuífero de Serral-Salinas tiene continuidad geológica y no se han encontrado criterios geológicos que permitan dividir esta estructura en dos compartimentos hidrogeológicos independientes. No obstante, todo parece indicar que los principales tramos acuíferos, constituidos por las dolomías del Cenomaniense y las calizas de Senonense tienen diferente potencial hidráulico. Se entiende que, con los nuevos datos geológicos se debería establecer un nuevo modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero de Serral-Salinas, diferenciando la información piezométrica según la formación captada por cada sondeo.

b) En relación a los límites del acuífero, son en general coincidentes con los propuestos por la DPA. Sin embargo, se considera que la superficie total del acuífero y sus límites deberían ser ligeramente modificados. En primer lugar, el afloramiento albiense del núcleo de la Sierra de Salinas forma parte del acuífero, ya que es permeable y tiene continuidad hacia el SE donde queda confinado. Por otro lado, a partir del modelo geológico 3D, parece existir continuidad geológica entre la Sierra de las Pansas y la Sierra de Salinas bajo el relleno cuaternario. Por tanto, el límite occidental se debería extender hasta la falla que separa la Sierra del Carche de la Sierra de las Pansas. La citada falla, que constituye una discontinuidad geológica mayor, pone en contacto las calizas y arenas del Albiense con las dolomías del Cenomaniense, por lo que se debería estudiar la posible transferencias lateral de recursos hídricos entre el Acuífero del Carche y el Acuífero de Serral-Salinas. En la figura 23, se presenta el nuevo límite propuesto para el acuífero de Serral-Salinas. De esta forma la superficie total del acuífero pasa a ser de 266 km<sup>2</sup>, de los que 83 km<sup>2</sup> corresponderían a afloramientos carbonáticos permeables.

c) 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 un nuevo modelo 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.

e) 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.

f) 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 Serral-Salinas. El acuífero investigado corresponde a una tipología de acuífero sin una gran complejidad estructural y localizado en el Prebético interno 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 una información geofísica moderada de distinto tipo (sísmica y SEDTs).

Para este acuífero se ha aplicado la metodología descrita en el apartado 3.1 que se caracteriza por integrar los datos geofísicos junto con los datos de superficie. Como conclusión, la metodología utilizada para la construcción del modelo 3D del acuífero de Serral-Salinas es de gran interés por su aplicabilidad en los acuíferos del Prebético de Alicante con una tipología de datos similar.

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 5 unidades geológicas de la región y 13 fallas principales con una extensión superficial de unos 266 km<sup>2</sup> y alcanza profundidades de -600 m.s.n.m. La mejora en el conocimiento consiste principalmente en la caracterización geométrica 3D de las unidades geológicas que forman el acuífero. A partir de esta mejora en el conocimiento del acuífero se pueden derivar implicaciones en relación a su modelo de funcionamiento hidrogeológico y en las posibles relaciones laterales con otros acuíferos de la región (apartado 5.1).

La geometría del modelo geológico 3D del acuífero de Serral-Salinas corresponde a un anticlinal de edad miocena, de vergencia noroeste que está interrumpido hacia el este por el diapiro triásico del Vinalopó. En el flanco noroeste de este pliegue se desarrolla una falla inversa lítrica. También se han modelizado fallas normales menores perpendiculares y paralelas a la traza axial de los pliegues. En la Sierra del Serral el modelo muestra un bloque separado en forma de arco de dirección NE-SO. Hacia el sureste el modelo 3D representa una depresión neógena correspondiente a una sinforma que desarrolla hacia el sur pequeños anticlinales como el de la Sierra de la Sima. 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. Servicio para adaptación de los modelos numéricos de simulación en los embalses subterráneos Serral-Salinas, Mediodía, y Muro de Alcoy al Sistema de Información Hidrológica 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. 2003. Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero de Serral-Salinas (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Instituto Geológico y Minero de España y Diputación Provincial de Alicante. 93 pp.
- DPA-IGME. 2007. Estudio del funcionamiento y aplicación de modelos numéricos en acuíferos carbonatados explotados intensivamente: Serral-Salinas (Murcia-Alicante). Instituto Geológico y Minero de España y Diputación Provincial de Alicante. 91 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.
- Dulliem, 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

- 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. 1979. Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Alta de los Ríos Júcar y Segura. Sistema Hidrogeológico de Carche-Salinas+. Informe 32706.
- 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. 1993. Estudio de las reservas de los embalses subterráneos de la Unidad Prebético de Murcia. Instituto Geológico y Minero de España. 67 pp.
- ITGE. 1992. Campaña de geofísica electromagnética (S.E.M.) en el área de Carche-Salinas. Murcia. Informe 40412.
- 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.

- Molina, J.L. 2009. Análisis integrado y estrategias de gestión de acuíferos en zonas semiáridas. Aplicación al caso de estudio del Altiplano (Murcia, SE España). Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 274 pp.
- 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 and 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.

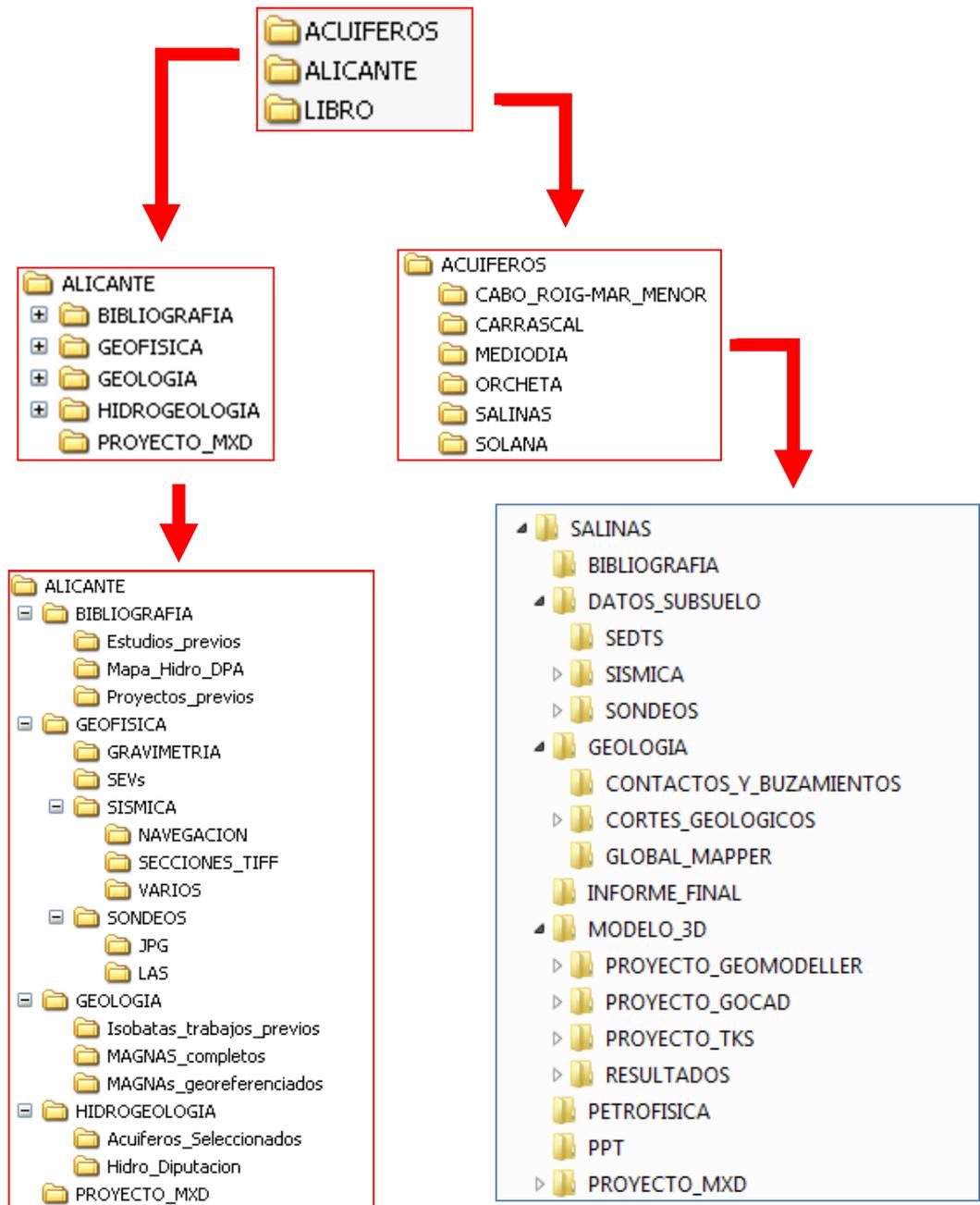


## **ANEXOS**



# ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL ENTREGADA

## 1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL





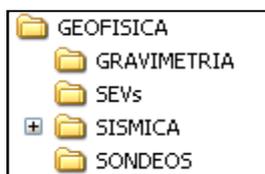
## 2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE

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.

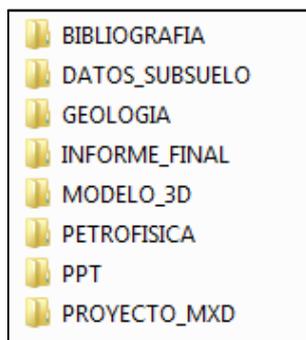
### 3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO SALINAS

La información digital del acuífero Salinas 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 Salinas en estudio.

#### **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 formato JPG.

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

 **GLOBAL\_MAPPER** Contiene el proyecto en Global Mapper del acuífero Salinas. También existen archivos como el MDT, ortofotos, diversos shaps generados durante el estudio de la geología, etc.

## **PROYECTO\_MXD**

Proyecto MXD generado durante el estudio, junto con sus archivos (MDT, MAGNAs, cortes, isobatas, 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 Salinas. Contiene a su vez las siguientes carpetas:

### **SISMICA**

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

 **SEGY** Esta carpeta contiene archivos seg-y.

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

 **PROCESADO** Archivos Excel del cálculo de la ley de velocidad.

 **SEDTS** Archivos relacionados con los SEDTs (sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo).

 **SONDEOS** Información sobre los sondeos de la zona (.dbf y .xls). También incluye una carpeta con información de la Litoteca de Peñarroya del IGME.

## **PETROFISICA**

Contiene archivos Excel, JPG y PDF de la curva de reservas.

## **MODELO\_3D**

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

 **PROYECTO\_GOCAD** Proyecto Gocad con todos los objetos modelizados del acuífero Salinas (superficies, sondeos, sísmica, sgrid, etc.).

 **PROYECTO\_TKS** Proyecto Geographix o de Kingdom Suite del acuífero Salinas.

 **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, junto con sus archivos.



## **INFORME\_FINAL**

Informe final del acuífero Salinas.

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

El listado de los archivos entregados se encuentra en el Excel Listado\_archivos\_Serral-Salinas.xls dentro del directorio INFORME\_FINAL.





## ANEXO II. ESTUDIO PETROGRÁFICO

### ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>75</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>75</b>
2.1. Formaciones geológicas muestreadas; ubicación de las muestras analizadas .....	78
2.2. Técnicas de estudio de rocas carbonatadas: preparación de muestras y equipo petrográfico.....	80
2.3. Análisis de las muestras pertenecientes a la zona de estudio.....	81
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>89</b>
3.1. Estudios petrográficos.....	89
3.2. Tabla de resultados.....	104
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>107</b>
<b>5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>109</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

En el actual anexo se recogen los **estudios petrográficos** para la caracterización de las microfacies pertenecientes a los afloramientos carbonatados del acuífero Serral-Salinas en la provincia de Alicante (Hoja nº845, Yecla). 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). Este estudio incluye las características del espacio poroso, así como la descripción de las microfracturas y su distribución 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 Interno de las Cordilleras Béticas en las Sierras de Salinas y del Serral, y las muestreadas en este estudio son las siguientes:

- **Mioceno Medio:** Aflora ampliamente al sur de la Sierra de Salinas. Litología principalmente margosa y calcarenítica
- **Jurásico:** Los afloramientos se localizan en el paraje conocido como Sierra del Collado y Barranco de la Boquera, en el sureste de la Sierra de Salinas y está compuesta de dolomías y calizas.
- **Cretácico:** En el sector de la Sierra de Salinas el Cretácico aparece muy desarrollado distinguiéndose a grandes rasgos el Cretácico Inferior y el Superior
  - ✓ **Cretácico Inferior**, formado por calizas arenosas con rudistas y orbitolinas, con niveles de arcillas y arenas intercaladas
  - ✓ **Cretácico Superior**, fundamentalmente dolomítico con calizas y margocalizas a techo. La unidad dolomítica está constituida en detalle por unas dolomías masivas, negras y carstificadas. Es una formación azoica, de calizas esparíticas recristalizadas y afectadas por un proceso de dolomitización secundaria que ha borrado toda huella de fauna. Por encima de este complejo se desarrolla una segunda unidad formada por calizas y calizas margosas.

En el listado que a continuación se proporciona 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).

ID-Muestra	Litología	Formación (Según MAGNA 845)	X_UTM	Y_UTM	Edad
SA-23	Caliza	33_Calizas de algas y/o biocalcarenitas	677841	4267701	Mioceno Medio
SO-24	Caliza	33_Calizas de algas y/o biocalcarenitas	677876	4267598	Mioceno Medio
SO-39	Caliza	33_Calizas de algas y/o biocalcarenitas	679812	4269063	Mioceno Medio
SA-1	Dolomía	7_Dolomía brechoide	682087	4268163	Jurásico
SA-2	Dolomía	7_Dolomía brechoide	682020	4268234	Jurásico
SA-3	Caliza	8_Dolomías masivas y calizas oolíticas	681698	4268405	Jurásico
SA-7	Caliza	10_Caliza masiva gris	682162	4268142	Jurásico
SA-8	Caliza	10_Caliza masiva gris	683270	4269630	Jurásico
SA-9	Caliza parcialmente dolomitizada	10_Caliza masiva gris	683404	4269624	Jurásico
SA-34	Caliza	10_Caliza masiva gris	683459	4269129	Jurásico
SA-35	Caliza	10_Caliza masiva gris	683370	4269150	Jurásico
SA-36	Caliza	10_Caliza masiva gris	683336	4269213	Jurásico
SA-10	Caliza	13_Calizas con Toucasias	679971	4270640	Cretácico Inferior
SA-11	Caliza	13_Calizas con Toucasias	679880	4270625	Cretácico Inferior
SA-12	Dolomía	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	680164	4270530	Cretácico Inferior
SA-13	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	680013	4270522	Cretácico Inferior
SA-14	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	670829	4263941	Cretácico Inferior
SA-15	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	671255	4263939	Cretácico Inferior
SA-16	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	671434	4263729	Cretácico Inferior
SA-17	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	671943	4263405	Cretácico Inferior
SA-18	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	672247	4263086	Cretácico Inferior
SA-25	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	677908	4267329	Cretácico Inferior
SA-26	Dolomía	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	678106	4267235	Cretácico Inferior
SA-27	Caliza, incipiente dolomitización	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	678417	4266946	Cretácico Inferior
SA-33	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	678585	4266700	Cretácico Inferior
SA-42	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	669614	4266638	Cretácico Inferior
SA-43	Caliza	15_Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas	669650	4266652	Cretácico Inferior
SA-19	Dolomía	16_Dolomías masivas	672444	4262976	Cretácico Superior

<b>SA-20</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	672503	4262882	Cretácico Superior
<b>SA-21</b>	Caliza, incipiente dolomitización	16_Dolomías masivas	672575	4262767	Cretácico Superior
<b>SA-22</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	672456	4262733	Cretácico Superior
<b>SA-28</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	678457	4266927	Cretácico Superior
<b>SA-29</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	678584	4266846	Cretácico Superior
<b>SA-30</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	678617	4266875	Cretácico Superior
<b>SA-31</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	678636	4266890	Cretácico Superior
<b>SA-32</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	678628	4266809	Cretácico Superior
<b>SA-40</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	669542	4266747	Cretácico Superior
<b>SA-41</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	669570	4266718	Cretácico Superior
<b>SA-44</b>	Dolomía	16_Dolomías masivas	669694	4266682	Cretácico Superior
<b>SA-4</b>	Caliza	17_Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	681399	4268397	Cretácico Superior
<b>SA-5</b>	Caliza parcialmente dolomitizada	17_Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	681210	4268366	Cretácico Superior
<b>SA-6</b>	Caliza parcialmente dolomitizada	17_Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	681648	4268436	Cretácico Superior
<b>SA-37</b>	Caliza	17_Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	679639	4269258	Cretácico Superior
<b>SA-38</b>	Caliza	17_Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	679665	4269197	Cretácico Superior

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

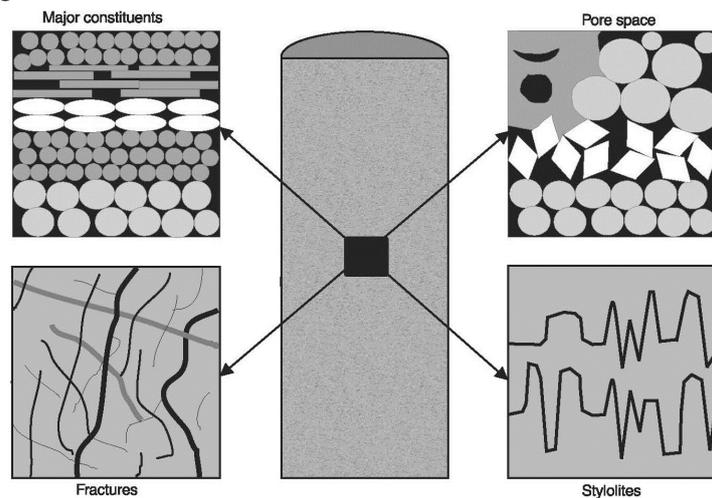
Se han tomado un total de 44 muestras en campo, de las que se han preparado sus correspondientes láminas delgadas para la realización del estudio petrográfico. Este estudio petrográfico se basa fundamentalmente en el análisis de láminas delgadas preparadas mediante microscopía óptica de polarización. En esta ocasión 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 los poros, necesaria para establecer 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.

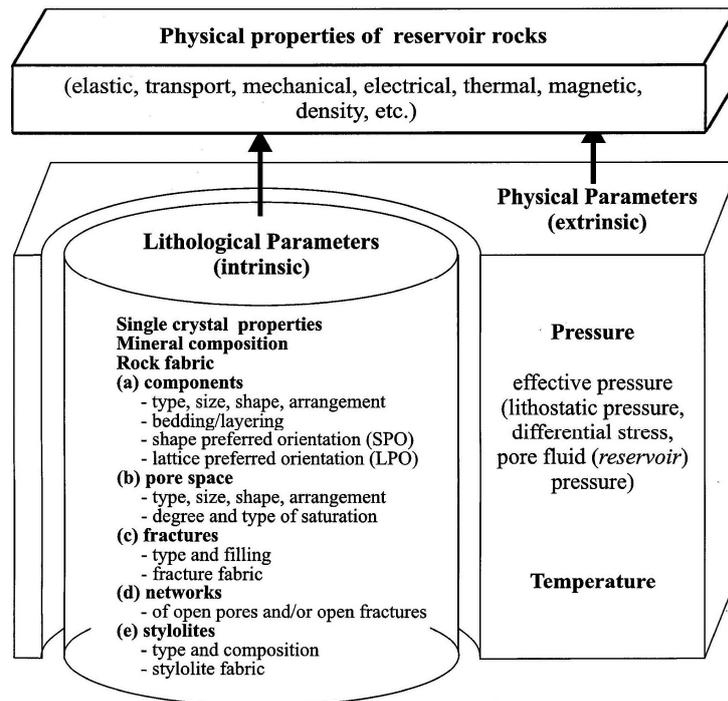
### 2.3. Análisis de las muestras pertenecientes a la zona de estudio

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).

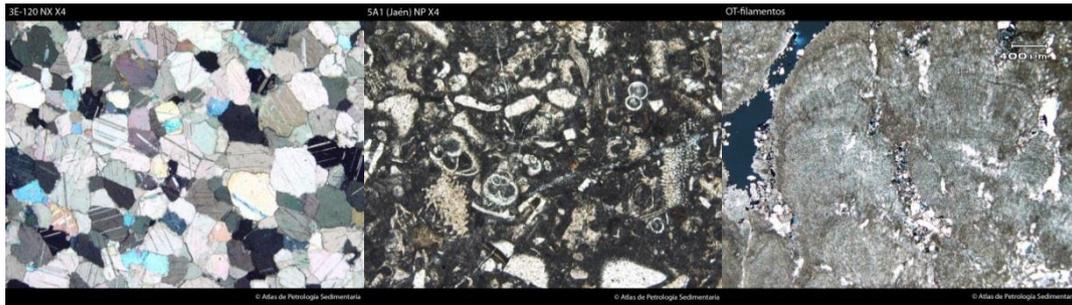
Previo al análisis de los diferentes componentes texturales, definiremos los tipos de fábrica que existen en este tipo de rocas:

## TIPOS DE FÁBRICA

**Fábrica cristalina** (Fig. 3.a): constituida por cristales generados por procesos de precipitación directa, recristalización o reemplazamiento (calizas esparíticas, pseudoesparitas, dolomías cristalinas, etc.).

**Fábrica clástica** (Fig. 3.b): 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 calclitita (Folk, 1963)

**Fábrica organógena** (Fig. 3.c): Es la constituida por bioconstrucciones desarrolladas por organismos coloniales (arrecifes de coral, estromatolitos, etc.)



.... (a) [Fábrica cristalina](#) (b) [Fábrica clástica](#) (c) [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 esqueléticos 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).



*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

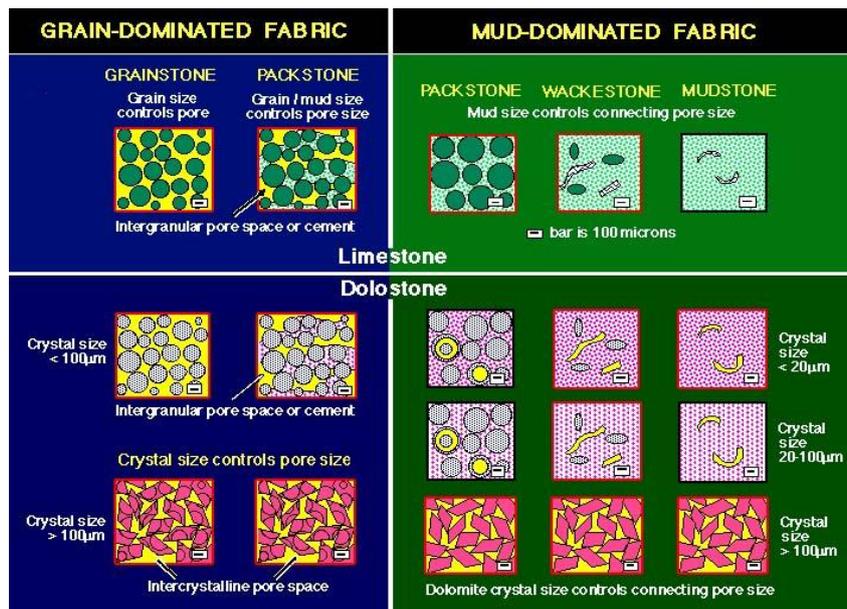
Se define también como porosidad abierta, conectada o efectiva de la roca y representa el volumen de poros con cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. En ausencia de vuggy porosity, la distribución de tamaños de poro en rocas carbonatadas 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-dominada y lodo-dominada. Los atributos más importantes de la fábrica grano-dominada son la presencia 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.

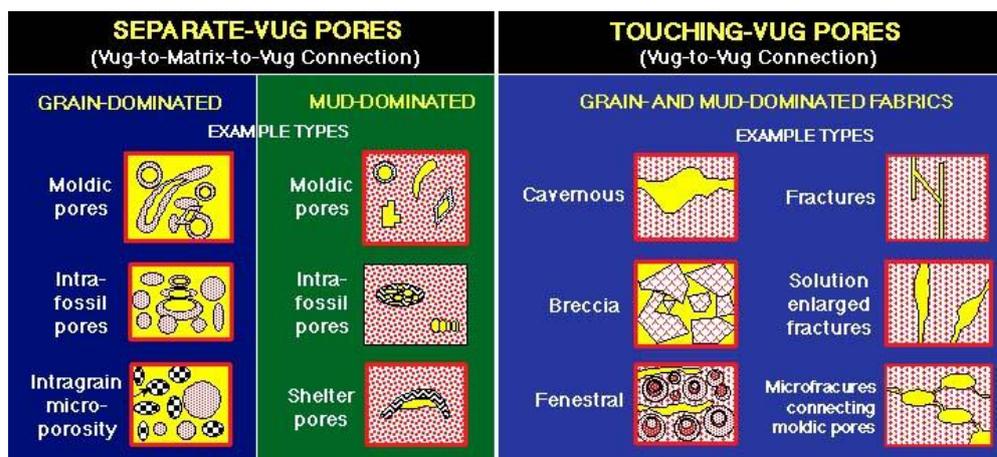
(b) Vuggy pore space: separate vug pores y touching-vug pores.

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).

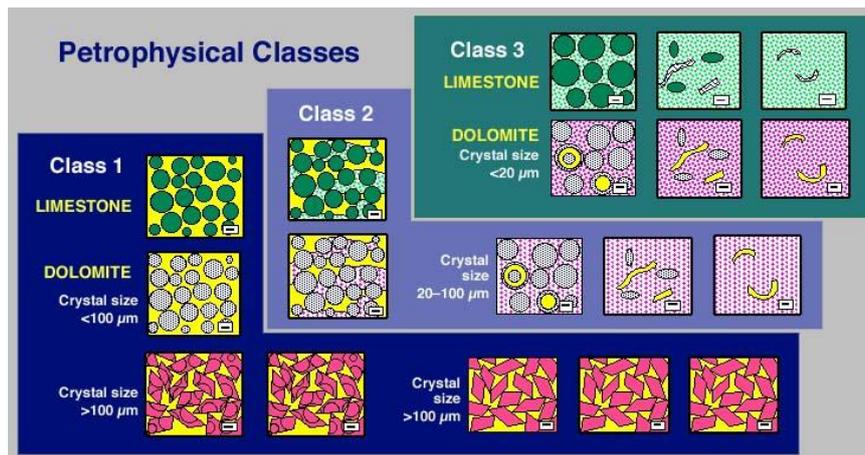
Para relacionar la fábrica de las rocas carbonatadas con la distribución del tamaño de poros es importante determinar si el espacio poroso pertenece a uno de los tres tipos principales de poros según Lucia (1983, 1999): interpartícula, separate-vug and touching vug. Para el primer grupo Lucia (1995) 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 vasado en la interconexión vug espacio.



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

## 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.

## 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

### **3.1 Estudios petrográficos**

A continuación se recogen los estudios petrográficos de las muestras más representativas de las diferentes formaciones en el acuífero de Serral-Salinas. 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.

**Lamina SA-12 Formación Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas Cretácico inferior**

**TIPO DE MICROFÁBRICA**

Microfábrica cristalina. La muestra pertenece posiblemente a los niveles dolomíticos producidos por procesos secundarios que dominan a techo del complejo calcodetrítico

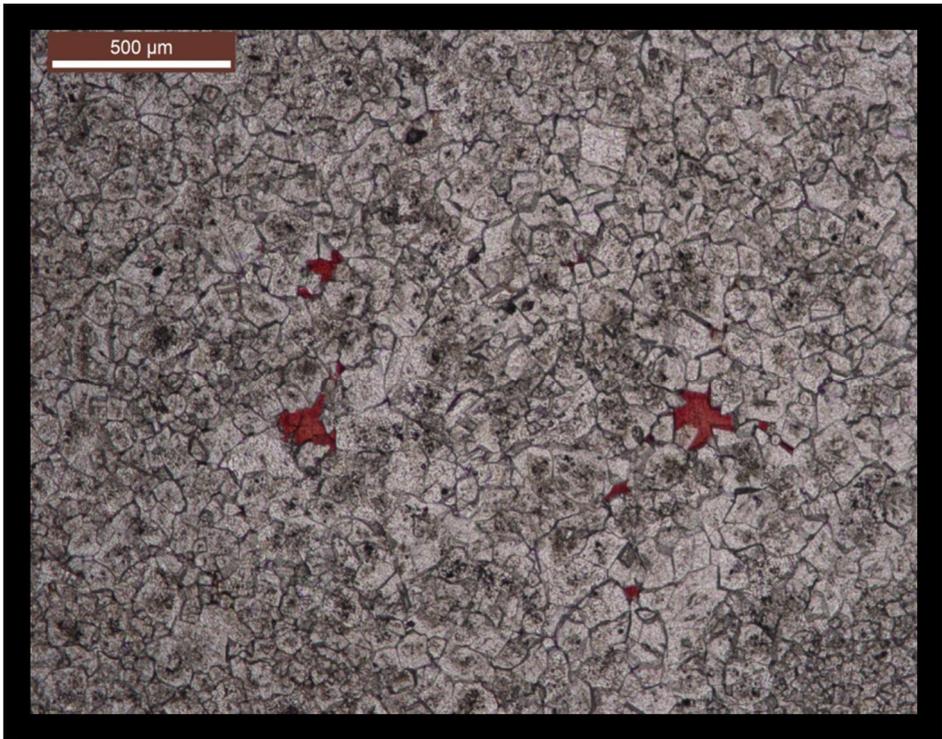
**COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA Doloesparita**  
 Dolomía con textura cristalina gruesa (esparítica) con algo de cemento de calcita (color rojo) en mosaico, ocupando la porosidad intercrystalina. Los cristales de dolomita son subeuhedrales, a veces zonados. Se observan los núcleos anubarrados de los cristales de dolomita y sobrecrecimientos limpios en la periferia (muy frecuente en los procesos de dolomitización) (Figura 1).

<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta:0,7%.</b>
Cemento esparítico muy accesorio	Cristales de dolomita subhédrica	Porosidad vacuolar presente en la lamina de forma irrelevante

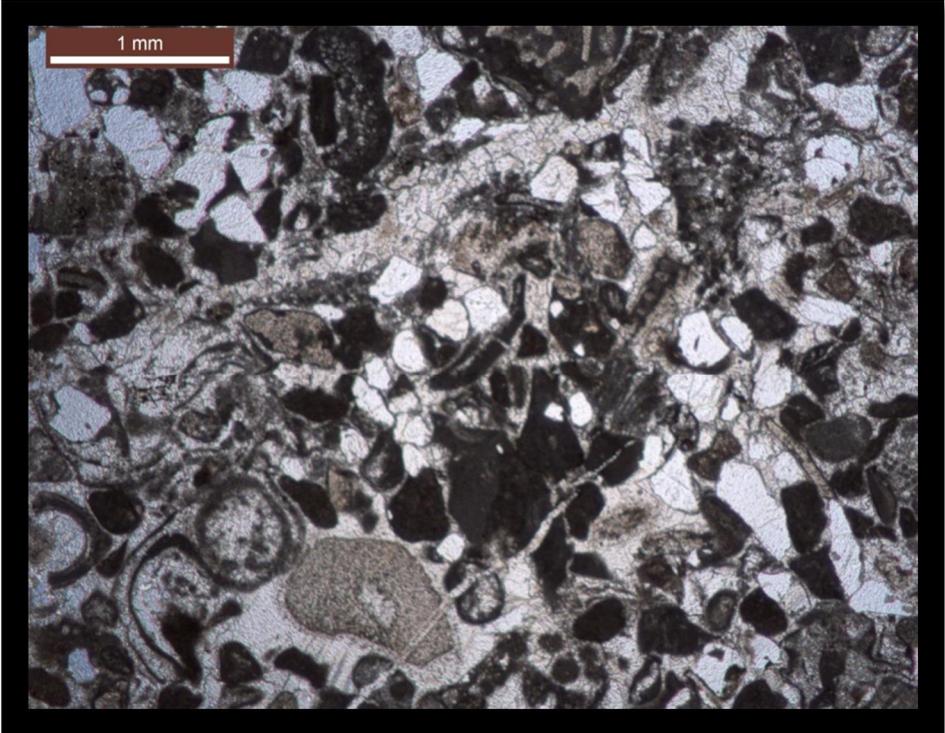
**CLASIFICACIÓN**

<b>Clasificación de la microfacies</b>	<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Dolograinstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b> Doloesparita  CLASE 1

**Figura 1:** Porosidad anecdótica, posiblemente generada en el propio proceso de reemplazamiento de la calcita por la dolomita. Observamos algo de cemento de calcita (color rojo) en mosaico, sellando la porosidad intercrystalina



The image shows a dense network of sub-euhedral dolomite crystals. The spaces between these crystals (intercrystaline porosity) are filled with a mosaic of red-colored calcite cement. The overall appearance is that of a well-cemented dolomite fabric. A scale bar in the top left corner of the image indicates a length of 500 micrometers.

<b>Lamina SA-13 Formación I Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas I Cretácico inferior</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfabrica clásica dominante. Se trata de una calcarenita bioclástica		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta:3,3%.</b>
Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes esqueléticos: orbitolínicos y rudistas</li> <li>• Componentes no esqueléticos: Los granos no esqueléticos más abundantes son el cuarzo y algunos peloides</li> </ul>	Porosidad vacuolar presente en la lamina de forma irrelevante
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Packstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b> Biomicrita	CLASE 2
		<b>FRACTURAS Y ESTILOLITOS:</b> Se observan pequeñas microfracturas recientes pero están selladas por precipitación de calcita posterior (Fig. 1)
<p><b>Fig. 1:</b>Detalle de la microfacies donde se observan los restos de bioclastos, junto a los granos de cuarzo, indicando la presencia de los mismos aportes de terrígenos.</p> 		

Lamina SA-14 Formación ÍCalizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenasí Cretácico inferior

**TIPO DE MICROFÁBRICA**

Microfabrica clásica formada por matriz micritica dominante

**COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA**

<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta:</b> 1,5%.
Matriz micritica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Componentes esqueleticos: bioclastos (orbitolinas)</li> <li>Componentes no esqueleticos: peloides, granos de cuarzo</li> </ul>	<b>FRACTURAS Y ESTILOLITOS:</b> Se observan pequeñas microfracturas recientes pero están selladas por precipitación de calcita posterior (Fig. 1)

**CLASIFICACIÓN**

<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
Clasificación de Dunham (1962) de Wackestone	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Biomicrita</i>	CLASE 3



Fig. 1: Detalle de la muestra donde se observa una fractura microsellada con calcita

<b>Lamina SA-15 Formación   Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas   Cretácico inferior</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfábrica clástica.		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 2,8%.</b>
Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Componentes esqueléticos: bioclastos (orbitolinas)</li> <li>Componentes no esqueléticos: peloides, intraclastos</li> </ul>	<b>FRACTURAS Y ESTIOLITOS:</b> Se observan pequeñas microfracturas recientes, puesto que cortan todas las estructuras previas, y a diferencia de otros casos previos, no aparecen selladas (Fig. 1). Fractura accesorias.
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Packstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959, 1962)</b> Biopelmicrita	CLASE 2
<p><b>Figura 1:</b> Microfracturación tardía (en la parte derecha de la imagen) que atraviesa todas las estructura previas y no aparece sellada, salvo algunos casos.</p> 		

Lamina SA-17 Formación | Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas | Cretácico inferior

**TIPO DE MICROFÁBRICA**

Microfabrica clásica dominante. Se trata de una calcarenita bioclástica

**COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA**

<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 1,1%.</b>
Matriz micrítica y cemento esparítico al 50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes esqueléticos: orbitolínicos y rudistas</li> <li>• Componentes no esqueléticos:</li> </ul>	Porosidad observada dentro de algunos microorganismos. También en la matriz aparecen espacios abiertos vacuolares (Fig. 1)

**CLASIFICACIÓN**

<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Biomicrita	CLASE 2



**FRACTURAS Y ESTILOLITOS:**  
Se observan microfracturas recientes pero están selladas por precipitación de calcita posterior (Fig.2)



Figura 1. Algunos microfósiles presentan espacios abiertos dentro de sus estructuras. También se pueden observar en la matriz.

Lamina SA-25 Formación I Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas  Cretácico inferior		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfabrica clástica formada por matriz micrítica dominante		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 1,7%.</b>
Matriz micrítica predominante	<ul style="list-style-type: none"> <li>Componentes esqueléticos muy accesorio</li> </ul>	<b>FRACTURAS Y ESTILOLITOS:</b> Se observa vacuolas parcialmente selladas en la matriz micrítica. (Fig. 1)
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Wackestone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b> Micrita	CLASE 3
		
<p><b>Fig. 1:</b> Detalle de la muestra donde se observan los espacios vacuolares parcialmente sellados con calcita</p>		

<b>Lamina SA-20 Formación Í Dolomías masivasÍ Cretacico Superior</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfábrica cristalina		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta:3,7%.</b>
Caliza esparítica recristalizada afectada por un proceso de dolomitización secundario	La dolomitización secundaria ha borrado toda huella de fauna.	Porosidad vacuolar accesoria parcialmente sellada
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Dolograinstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b>	CLASE 1
<p><b>Figura 1:</b> Ejemplo del proceso de dolomitización casi completo. Los cristales teñidos de rojo son de calcita previa.</p> 		

<b>Lamina SA-32 Formación Í Dolomías masivasĀ Cretacico Superior</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfabrica cristalina		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta:6,7%.</b>
Caliza esparítica recristalizada afectada por un proceso de dolomitización secundario	La dolomitización secundaria ha borrado toda huella de fauna.	Porosidad bastante generaliza, espacios abiertos y parcialmente recristalizados
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Dolograinstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b>	CLASE 1

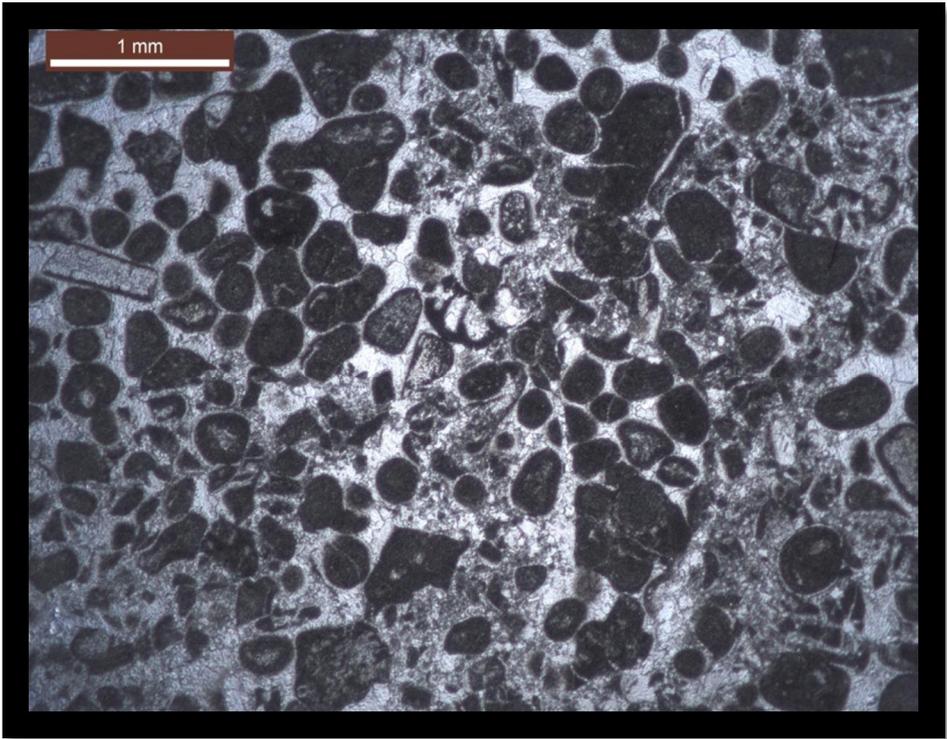


Fig. 1. Dolomia masiva en la que apreciamos cristales de calcita, bien previos, bien de nueva formación. Espacios abiertos de gran tamaño como puede verse en la imagen.

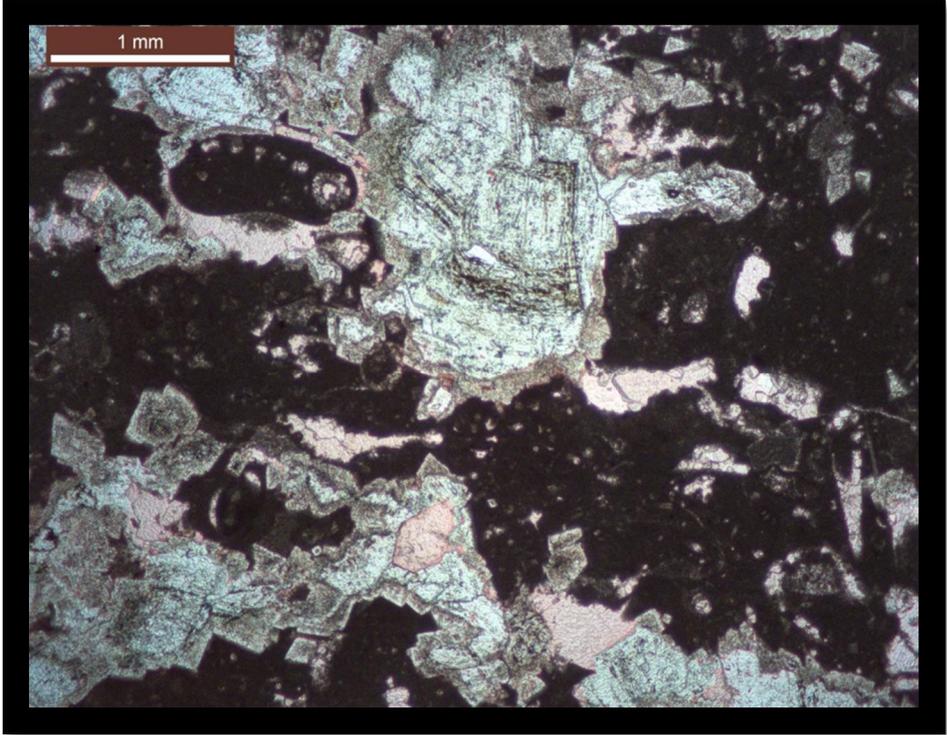
Lamina SA-42 Formación I Calizas beige con Orbitolinas, calcarenitas y arenas I Cretácico inferior		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfabrica clástica formada por matriz micrítica dominante		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Porosidad abierta: 1,7%.
Matriz micrítica predominante	• Componentes esqueléticos abundantes: orbitolinas, miliolidos	<b>FRACTURAS Y ESTIOLITOS:</b> Fracturas abiertas y parcialmente selladas abundantes en la lamina.
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Biomicrita	CLASE 2
<p>Fig. 1: Fracturas que se cortan, la de la derecha con incipiente precipitado en las paredes de la misma y la de la derecha totalmente abierta.</p> 		

<b>Lamina SA-1 Jurásico Í Dolomias brechoides</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfábrica clástica. Dolomia brechoide azoica		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA Dolomicrita azoica</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 7,0%.</b>
Matriz micrítica	Dolomia brechoide, con matriz micrítica (Fig. 1)	Porosidad muy accesoria
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Dolopackstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b> Dolomicrita	CLASE 3
<p><b>Figura 1:</b> Los fragmentos de dolomía que constituyen la brecha son muy heterogéneos, cohesionado por una matriz micrítica.</p> 		

<b>Lamina SA-2 Jurásico Í Dolomias brechoides</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfabrica clásica dominante. Se trata de una calcarenita bioclástica		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 2,5%.</b>
Cemento esparítico	Dolomia brechoide, con cemento esparítico (Fig. 1)	Concentración de vacuolas en el cemento esparítico que cohesionan el conjunto
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Dolograinstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b> Doloesparita	CLASE 1
<p><b>Fig. 1:</b>Detalle de los espacios vacuolares generados en el cemento esparítico (teñido de rojo). En microfacies donde se observan los restos de bioclastos, junto a los granos de cuarzo, indicando la presencia de los mismos aportes de terrígenos.</p>		
		

<b>Lamina SA-3 Jurásico Í Calizas oolíticas</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfabrica clástica formada por cemento esparítico mayoritariamente		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 5,3%.</b>
Cemento esparítico mayoritario, algo de matriz micrítica	• Componentes no esqueléticos: oolitos	Espacio vacuolar generado por el sellado parcial de las fracturas
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfases</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999) CLASE 2</b>
<b>Clasificación Dunham (1962)</b> <i>Packestone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b> <i>Biomicro</i>	<b>FRACTURAS Y ESTILOLITOS:</b> Fracturación generalizada en la lamina aunque casi en su totalidad sellada
		
<b>Fig. 1: Detalle de la caliza oolítica</b>		

<b>Lamina SA-7 Jurásico Í Caliza masiva grisî</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfábrica clástica		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes alquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 2,7%.</b>
Matriz Micrítica	Se trata de un sedimento micrítico	
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)</b> CLASE 3
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Mudstone</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b> Micrita	<b>FRACTURAS Y ESTIOLITOS:</b> Fracturación generalizada en la lamina, y aunque aparece sellada en parte, en alguna secciones los espacios abiertos generados por falta de precipitado son de dimensiones considerables
<p><b>Figura 1:</b> En la muestra se aprecia los bloques de mudstone separados en bloques entre los que ha precipitado calcita de forma incompleta, generándose huecos de tamaño considerable.</p> 		

<b>Lamina SA-9 Jurásico Í Calizas masivas grisesÍ</b>		
<b>TIPO DE MICROFÁBRICA</b>		
Microfábrica clástica		
<b>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</b>		
<b>(a) Componentes ortoquímicos</b>	<b>(b) Componentes aloquímicos:</b>	<b>(c) Porosidad abierta: 1,1%.</b>
		<i>Vuggy porosity accesorio</i>
<b>CLASIFICACIÓN</b>		
<b>Clasificación de la microfacies</b>		<b>Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999) CLASE 3</b>
<b>Clasificación de Dunham (1962)</b> <i>Mudstone parcialmente dolomitizado</i>	<b>Clasificación de Folk (1959,1962)</b>	<b>FRACTURAS Y ESTIOLITOS:</b> Fracturación generalizada en la lámina, y sellada en un alto porcentaje. Fracturas selladas con calcita que está siendo reemplazada parcialmente por dolomita
<p>Fig. 1. Dolomía masiva en la que apreciamos cristales de calcita, bien previos, bien de nueva formación. Espacios abiertos de gran tamaño como puede verse en la imagen.</p>		
		

### 3.2 Tabla de resultados

En la **tabla 1** se recogen, 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 /Edad	Fábrica	Clasif. Petrofísica	Vuggy porosity	Fracturas y estilolitos	Interporosity (%)
SA-12	15_Albense	Dolograinstone	CLASE 1	Irrelevante		0,7
SA-13	15_Albense	Packstone	CLASE 2	Irrelevante	Microfracturas selladas	3,3
SA-14	15_Albense	Wackestone Matriz micrítica	CLASE 3	Accesorias	Microfracturas selladas	1,5
SA-15	15_Albense	Packstone Cemento esparítico con algo de matriz micrítica	CLASE 2	Accesorias	Pequeñas microfracturas recientes, puesto que cortan todas las estructuras previas, y a diferencia de otros casos previos, no aparecen selladas	2,8
SA-16	15_Albense	Wackestone Matriz micrítica	CLASE 3	Espacios abiertos parcialmente sellados por precipitados de calcita		2,0
SA-17	15_Albense	Packstone Cemento esparítico matriz micrítica al 50%	CLASE 2	Espacios abiertos tanto dentro de los fósiles como en la matriz	Fracturas de diferentes tamaños selladas.	1,1
SA-18	15_Albense	Mudstone	CLASE 3		Fracturas abiertas en la matriz parcialmente selladas por calcita. Accesorias	2,7
SA-25	15_Albense	Mudstone	CLASE 3	Espacios abiertos en la matriz, irregulares y de tamaño considerable		1,7
SA-26	15_Albense	Dolopackstone grano-dominada	CLASE 2		Fractura única de tamaño considerable que atraviesa la lamina y que no parece ni parcial ni totalmente sellada	3,2
SA-27	15_Albense	Packstone Con dolomitización incipiente	CLASE 2		Microfracturas selladas con calcita que en parte está siendo reemplazada por dolomita	0,7
SA-42	15_Albense	Packstone	CLASE 2		Fracturación generalizada, tanto abiertas como parcialmente selladas	1,5
SA-43	15_Albense	Wackestone Matriz micrítica	CLASE 3			0,8
SA-19	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar accesoria parcialmente sellada		4,5
SA-20	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar accesoria parcialmente sellada		3,7
SA-21	16_Cenomanense	Packstone Cemento esparítico con algo de matriz micrítica. Incipiente dolomitización	CLASE 2	Irrelevante		2,2
SA-22	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar accesoria parcialmente sellada		4,6
SA-23	33_Mioceno	Packstone	CLASE 3	Alta, con distribución homogénea		23,4

<b>SA-24</b>	33_Mioceno	Packstone	CLASE 3	Tanto dentro de los fósiles como espacios abiertos en la matriz		8,4
<b>SA-28</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar accesoría		1,7
<b>SA-29</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar accesoría parcialmente sellada		1,5
<b>SA-30</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar accesoría		4,4
<b>SA-31</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Porosidad vacuolar frecuente, localizada en una parte de la lamina		3,0
<b>SA-32</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Alto porcentaje de espacios abiertos	Alguna microfractura cementada	6,7
<b>SA-33</b>	15_Albense	Packstone	CLASE 3	Alta, con distribución homogénea	Packstone	9,5
<b>SA-40</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	No presenta	Fracturación generalizada en la lamina, con alto porcentaje de sellado	6,4
<b>SA-41</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1	Algunas vacuolas, pequeño tamaño, accesorias	Fracturación generalizada en la lamina, con alto porcentaje de sellado	3,9
<b>SA-44</b>	16_Cenomanense	Dolograinstone	CLASE 1		Fracturación generalizada en la lamina, con alto porcentaje de sellado	6,9
<b>SA-1</b>	7_Jurásico	Dolopackstone (Dolomia brechoide)	CLASE 3	Porosidad vacuolar muy accesoría		7
<b>SA-2</b>	7_Jurásico	Dolograinstone (Dolomia brechoide)	CLASE 1	Concentración de vacuolas en el cemento esparítico que cohesionan el conjunto		2,5
<b>SA--3</b>	8_Jurásico	Packstone	CLASE 2	Espacio vacuolar generado por el sellado parcial de las fracturas	Fracturación generalizada en la lamina aunque casi en su totalidad sellada	5,3
<b>SA-7</b>	10_Jurásico	Mudstone	CLASE 3		Fracturación generalizada en la lamina, y aunque aparece sellada en parte, en alguna secciones los espacios abiertos generados por falta de precipitado son de dimensiones considerables	2,7
<b>SA-8</b>	10_Jurásico	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 3	Vuggy porosity accesorio	Fracturación generalizada en la lámina, y sellada en un alto porcentaje.	2,4
<b>SA-9</b>	10_Jurásico	Mudstone Matriz micrítica Parcialmente dolomitizada	CLASE 3	Porosidad vacuolar muy accesoría	Fracturas selladas con calcita que está siendo reemplazada parcialmente por dolomita	1,1
<b>SA-34</b>	10_Jurásico	Mudstone Matriz micrítica	CLASE 3		Fracturación presente, aunque sellada por calcita	0,4
<b>SA-35</b>	10_Jurásico	Packstone	CLASE 2	Vuggy porosity presente, aunque no generalizada	Fracturación en varias generaciones, aunque todas aparecen casi en su totalidad selladas.	4,0
<b>SA-36</b>	10_Jurásico	Packstone parcialmente recristalizado	CLASE 2		Fracturas tanto abiertas como selladas por calcita	0,6
<b>SA-4</b>	17-Calizas con Phitonellas y	Packstone	CLASE 2	Espacios vacuolares abiertos no generalizados	Alguna microfractura abierta	7,3

	Globotruncanas					
<b>SA-5</b>	17-Calizas con Phitonellas y Globotruncanas.	Packstone parcialmente dolomitizado	CLASE 2	Espacios vacuolares presentes		13,4
<b>SA-6</b>	17-Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	Packstone parcialmente dolomitizado	CLASE 2	Espacios vacuolares presentes		14,0
<b>SA-37</b>	17-Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	Packstone parcialmente recristalizado	CLASE 3	Roca parcialmente recristalizada.	Fracturas parcialmente selladas por calcita.	6,0
<b>SA-38</b>	17-Calizas con Phitonellas y Globotruncanas	Packstone	CLASE 3	Roca parcialmente recristalizada.	Fracturas parcialmente selladas por calcita.	3,8
<b>SA-10</b>	13_Calizas con Toucasias	Packstone	CLASE 2	Espacios abiertos en el cemento esparítico	Presencia de microfracturas tanto abiertas como selladas	2,5
<b>SA-11</b>	13_Calizas con Toucasias	Packstone	CLASE 2	Algunos espacios abiertos		1,3
<b>SA-39</b>	33_Calizas con algas	Mudstone	CLASE 3	Espacios abiertos abundantes		21,8

*Tabla1. Clasificación de microfacies y clase petrofísicas de las muestras del acuífero Serral-Salinas.*



### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Gran parte de las muestras estudiadas del acuífero de Serral-Salinas conservan parcialmente la textura deposicional, lo que nos permite clasificarlas según los esquemas propuestos por Folk o Dunham. Algunas formaciones, sin embargo, muestran procesos de dolomitización parcial (en algunos casos incipiente), así como de dolomitización generalizado, dando lugar estos últimos a formaciones azoicas, de calizas esparíticas recristalizadas y afectadas por un proceso de dolomitización secundaria que ha borrado toda huella de fauna: En el primer caso se encuentran algunas muestras perteneciente a los paquetes calizos del Cretácico Superior, mientras que las dolomitizaciones generalizadas son frecuentes en las dolomías brechoides del Jurásico o en los tramos dolomíticos Cretácico Superior.

Generalmente estamos ante muestras de porosidad variable, más acusada entre formaciones que 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 (0,4m (%) m23,4), 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 esta técnica para poros por debajo de 1  $\mu\text{m}$ . Como consecuencia de esto, la porosidad determinada es la más gruesa, mientras que 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 muestras estudiadas y se identifican fácilmente. Si bien en algunos casos tales microfracturas aparecen muy localizadas, en general están presentes como elemento textural común y el sellado completo o parcial de las mismas repercute en la porosidad final de las muestras estudiadas.

Por formaciones o edades, resultan las siguientes observaciones:

- **Calizas de algas y/o biocalcarenitas (Mioceno Medio):** El Mioceno Medio aflora ampliamente al sur de la Sierra de Salinas. Han sido estudiadas tres muestras de esta formación cuya litología es principalmente margosa y calcarenítica. Se trata de packstones/mudstone, clase petrofísica 3, con alto porcentaje de espacios abiertos en la matriz (vuggy porosity), heterogéneos en cuanto al tamaño y muy continuos en toda la lámina, lo que se traduce en la alta porosidad interpartícula medida (8,4 m(%) m23,4).

- **Jurásico:** Los afloramientos se localizan en el paraje conocido como Sierra del Collado y Barranco de la Boquera, en el sureste de la Sierra de Salinas y está compuesta de dolomías y calizas. El paquete calizo es bastante homogéneo, se trata de packstones/mudstones, Clase 2 y 3, con porosidad interpartícula en general baja como muestran los resultados del laboratorio (0,4 m(%) m2,7) y los espacios vacuolares en lámina delgada heterogéneos y bastante accesorios. Por el contrario, el paquete dolomítico es heterogéneo. Se trata de dolomías brechoides con porosidades dispares, 7,0 y 2,5%, de clase petrofísica 3 y 1, respectivamente.
- **Cretácico:** En el sector de la Sierra de Salinas el Cretácico aparece muy desarrollado distinguiéndose a grandes rasgos el Cretácico Inferior y el Superior
  - ✓ **Cretácico Inferior**, formado fundamentalmente por calizas, aunque algunas de ellas presentan una dolomitización incipiente. Predominan los packstones y la Clase petrofísica 2. En general, la porosidad interpartícula medida en el laboratorio es relativamente baja (0,7 m(%) m 3,3). Sin embargo, se trata de una excepción entre las muestras estudiadas (SA-33), con espacios vacuolares abiertos en la matriz heterogéneos y de porosidad medida en el laboratorio de 9,5%. Esto podría ser debido a una porosidad local secundaria formada en una etapa tardía de disolución
  - ✓ **Cretácico Superior**, fundamentalmente dolomítico, constituido en detalle por unas dolomías masivas, negras y karstificadas. Es una formación azoica, de calizas esparíticas recristalizadas y afectadas por un proceso de dolomitización secundaria que ha borrado toda huella de fauna. Se trata de dolograinsstones, Clase petrofísica 1 con una porosidad interpartícula variable (1,5 m(%) m6,9). La fracturación está generalizada, aunque frecuentemente sellada por precipitados posteriores. Por encima de este complejo se desarrolla una segunda unidad formada por calizas y calizas margosas. Se trata de packstones, pertenecientes a la clase petrofísica 2, de porosidades que se mueven en los valores de 3,8 m(%) m14,0. Al microscopio se observa una vuggy porosit accesoría, coincidiendo con los valores de porosidad interpartícula más baja, a generalizada y con los valores más altos.

#### 4. 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. ANALISIS DEL LABORATORIO

### DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.

Se han recepcionado en el centro de laboratorios del IGME 33 muestras identificadas por el solicitante con la referencia:

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO
SA-1	4554-01
SA-2	4554-02
SA-3	4554-03
SA-4	4554-04
SA-5	4554-05
SA-6	4554-06
SA-7	4554-07
SA-8	4554-08
SA-9	4554-09
SA-10	4554-10
SA-11	4554-11
SA-12	4554-12
SA-13	4554-13
SA-14	4554-14
SA-15	4554-15
SA-16	4554-16
SA-17	4554-17
SA-18	4554-18
SA-19	4554-19
SA-20	4554-20
SA-21	4554-21
SA-22	4554-22
SA-23	4554-23
SA-24	4554-24
SA-25	4554-25
SA-26	4554-26
SA-27	4554-27
SA-28	4554-28
SA-29	4554-29
SA-30	4554-30
SA-31	4554-31
SA-32	4554-32
SA-33	4554-33

## 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\*10-5 ud SI) o CGS (K\*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 *10-5 SI			UNIDADES *10-5 SI	UNIDADES *10-6 cgs
		Cara 1	Cara 2	Cara 3		
SA-1	4554-1	-7	-3	-4	-4,7	-3,714
SA-2	4554-2	-3	-3	-4	-3,3	-2,653
SA-3	4554-3	-3	-3	2	-1,3	-1,061
SA-4	4554-4	-3	-4	-2	-3,0	-2,387
SA-5	4554-5	-2	-1	-2	-1,7	-1,326
SA-6	4554-6	-4	-2	-6	-4,0	-3,183
SA-7	4554-7	3	-3	-6	-2,0	-1,592
SA-8	4554-8	-2	5	11	4,7	3,714
SA-9	4554-9	-2	6	-2	0,7	0,531
SA-10	4554-10	-1	-3	-2	-2,0	-1,592
SA-11	4554-11	-2	-2	0	-1,3	-1,061
SA-12	4554-12	-5	-6	2	-3,0	-2,387
SA-13	4554-13	-2	-3	-1	-2,0	-1,592
SA-14	4554-14	-1	0	-1	-0,7	-0,531
SA-15	4554-15	0	4	-2	0,7	0,531
SA-16	4554-16	0	-1	-2	-1,0	-0,796
SA-17	4554-17	-2	-2	-2	-2,0	-1,592
SA-18	4554-18	0	1	-2	-0,3	-0,265
SA-19	4554-19	-2	-2	-3	-2,3	-1,857
SA-20	4554-20	-1	-2	-3	-2,0	-1,592
SA-21	4554-21	-1	-2	0	-1,0	-0,796
SA-22	4554-22	6	-1	-1	1,3	1,061
SA-23	4554-23	-2	1	2	0,3	0,265
SA-24	4554-24	-1	-7	-2	-3,3	-2,653
SA-25	4554-25	0	0	-1	-0,3	-0,265
SA-26	4554-26	0	0	-2	-0,7	-0,531
SA-27	4554-27	1	-3	-2	-1,3	-1,061
SA-28	4554-28	1	-1	7	2,3	1,857

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	UNIDADES *10-5 SI			UNIDADES *10-5 SI	UNIDADES *10-6 cgs
		Cara 1	Cara 2	Cara 3		
SA-29	4554-29	-1	5	-2	<b>0,7</b>	0,531
SA-30	4554-30	-1	-2	-1	<b>-1,3</b>	-1,061
SA-31	4554-31	-2	-2	-2	<b>-2,0</b>	-1,592
SA-32	4554-32	-1	-2	-2	<b>-1,7</b>	-1,326
SA-33	4554-33	2	2	2	<b>2,0</b>	1,592

**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)1**

Tipo de probeta	<b>Irregular<sup>2</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 (%)
SA-1	4554-01	<b>2645</b>	0,7	<b>7,0</b>	<0,1
SA-2	4554-02	<b>2750</b>	0,6	<b>2,5</b>	<0,1
SA-3	4554-03	<b>2563</b>	0,6	<b>5,3</b>	<0,1
SA-4	4554-04	<b>2518</b>	0,9	<b>7,3</b>	<0,1
SA-5	4554-05	<b>2388</b>	1,0	<b>13,4</b>	<0,1
SA-6	4554-06	<b>2325</b>	0,6	<b>14,0</b>	<0,1
SA-7	4554-07	<b>2634</b>	0,6	<b>2,7</b>	<0,1
SA-8	4554-08	<b>2641</b>	0,6	<b>2,4</b>	<0,1
SA-9	4554-09	<b>2693</b>	0,6	<b>1,1</b>	<0,1
SA-10	4554-10	<b>2643</b>	1,1	<b>2,5</b>	<0,1
SA-11	4554-11	<b>2673</b>	0,9	<b>1,3</b>	<0,1
SA-12	4554-12	<b>2673</b>	0,9	<b>0,7</b>	<0,1
SA-13	4554-13	<b>2597</b>	0,7	<b>3,3</b>	<0,1
SA-14	4554-14	<b>2659</b>	1,0	<b>1,5</b>	<0,1
SA-15	4554-15	<b>2609</b>	0,6	<b>2,8</b>	<0,1
SA-16	4554-16	<b>2644</b>	0,7	<b>2,0</b>	<0,1
SA-17	4554-17	<b>2669</b>	0,9	<b>1,1</b>	<0,1

<sup>1</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>2</sup> Debido a las características de las muestras suministradas, se han cortado probetas irregulares, intentando mantener similar relación superficie/volumen.

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Incertidumbre (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
SA-18	4554-18	<b>2628</b>	0,7	<b>2,7</b>	<0,1
SA-19	4554-19	<b>2689</b>	1,3	<b>4,5</b>	<0,1
SA-20	4554-20	<b>2732</b>	0,5	<b>3,7</b>	<0,1
SA-21	4554-21	<b>2768</b>	1,2	<b>2,2</b>	<0,1
SA-22	4554-22	<b>2705</b>	0,7	<b>4,6</b>	<0,1
SA-23	4554-23	<b>2074</b>	0,9	<b>23,4</b>	<0,1
SA-24	4554-24	<b>2480</b>	0,7	<b>8,4</b>	<0,1
SA-25	4554-25	<b>2628</b>	1,3	<b>1,7</b>	<0,1
SA-26	4554-26	<b>2650</b>	0,8	<b>3,2</b>	<0,1
SA-27	4554-27	<b>2683</b>	1,0	<b>0,7</b>	<0,1
SA-28	4554-28	<b>2782</b>	0,7	<b>1,7</b>	<0,1
SA-29	4554-29	<b>2776</b>	0,8	<b>1,5</b>	<0,1
SA-30	4554-30	<b>2700</b>	0,7	<b>4,4</b>	<0,1
SA-31	4554-31	<b>2730</b>	0,6	<b>3,0</b>	<0,1
SA-32	4554-32	<b>2625</b>	1,0	<b>6,7</b>	<0,1
SA-33	4554-33	<b>2462</b>	0,8	<b>9,5</b>	<0,1

