



MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



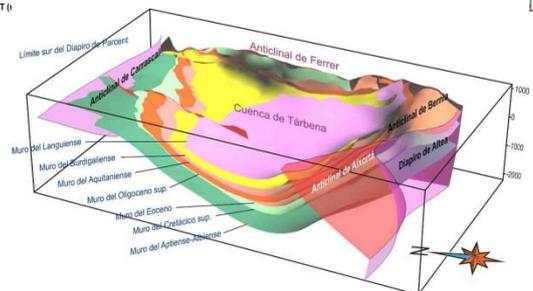
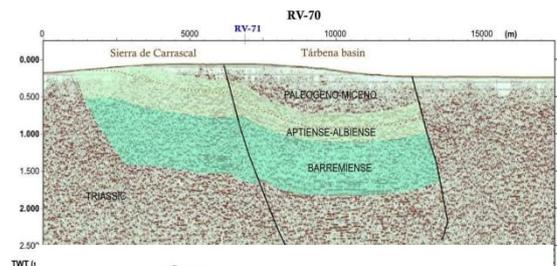
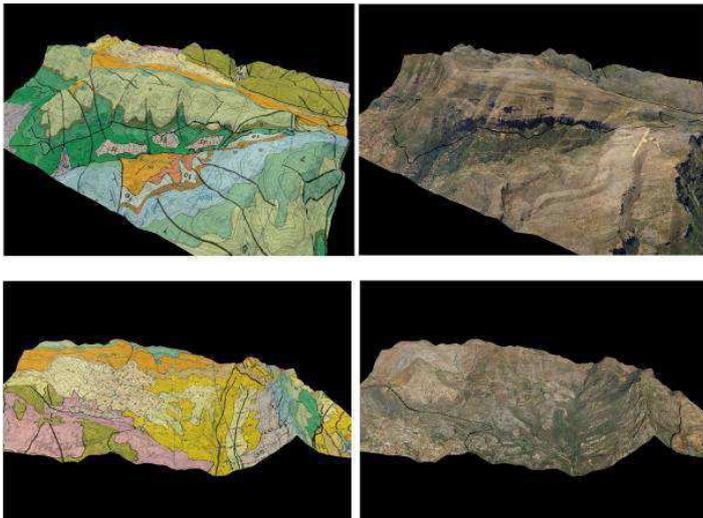
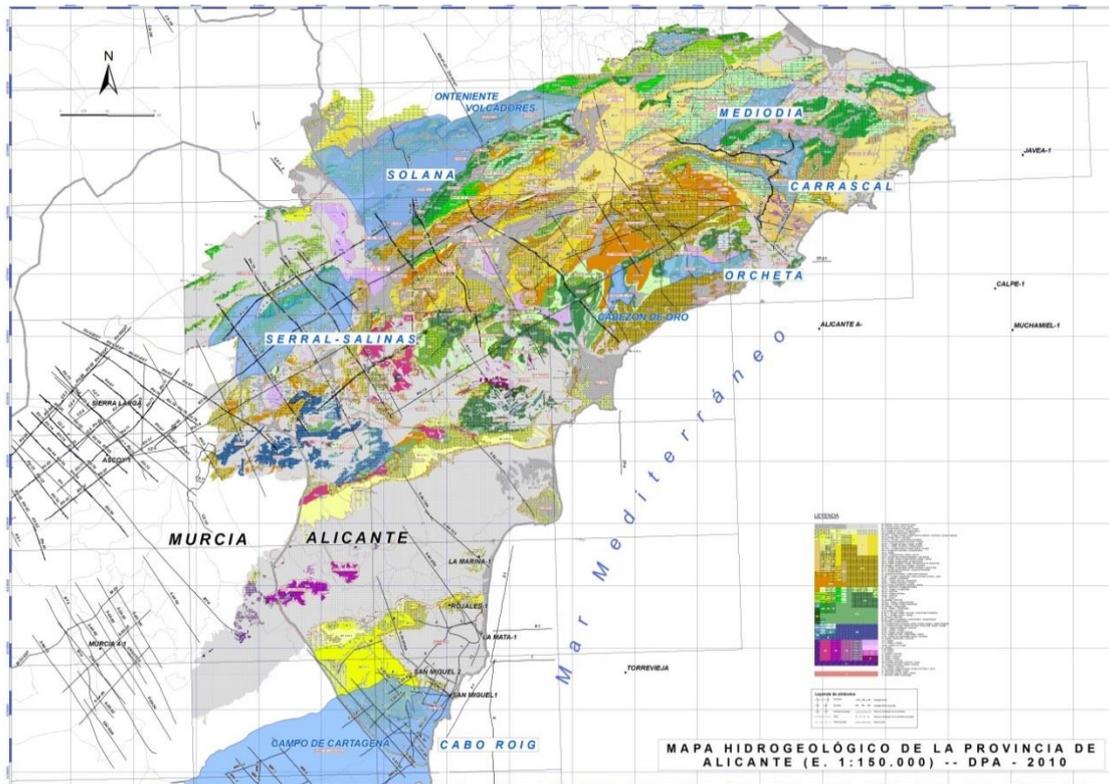
Instituto Geológico
y Minero de España



DIPUTACIÓN
DE ALICANTE

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

RESUMEN METODOLÓGICO Y DE RESULTADOS



Febrero, 2014

Autores:
José Luis García Lobón
Sergio Martos Rosillo
Israel Pérez Ortiz
Juliana Martín León

Carlos Marín Lechado
Carmen Rey Moral
Concepción Fernández Leyva
Juan Antonio López Geta

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS	9
2	METODOLOGÍA.....	13
3	SOFTWARE DE TRABAJO	21
4	RESUMEN DE RESULTADOS.....	23
4.1	Resultados obtenidos	23
4.2	Tablas resumen de resultados	24
4.3	Caracterización del sistema poroso de los de acuíferos profundos de Alicante.....	69
4.3.1	Estudio petrográfico de rocas calcáreas de los acuíferos Solana, Serral-Salinas y Carrascal-Ferrer	69
4.3.2	Porosidad abierta de muestras de rocas calcáreas de los acuíferos Solana, Serral-Salinas y Carrascal-Ferrer	72
5	CONCLUSIONES	79
6	BIBLIOGRAFÍA	81

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** . Localización de los acuíferos estudiados (en azul) sobre montaje de hojas de la serie MAGNA 1:50.000 de la provincia Alicante. Líneas sísmicas en negro. Obsérvese que no existen sondeos de petróleo onshore en la provincia de Alicante 11
- Figura 2.** Esquema de la metodología utilizada para la construcción de modelos geológicos 3D. En cada uno de los pasos se detalla el software usado..... 13
- Figura 3** Edición y corrección de cartografía geológica de la serie Magna 1:50.000 (en verde) en entorno 3D. Digitalización de contactos, fallas y estratificación (en amarillo)..... 15
- Figura 4.** Densificación de datos cartográficos y estructurales. A) Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D (Global Mapper). B) Planos que se ajustan a las líneas 3D digitalizadas (gOcad). Los planos indican dirección y buzamiento de la estratificación y son utilizados en la modelación de las superficies en 3D Geomodeller..... 15
- Figura 5a.** Construcción de cortes geológicos en ArcGis. Acuífero Carrascal. 1,2 sondeos; a, b, c, d, buzamientos aparentes. Corte entre S. Carrascal y Ferrer. Profundidades controladas por sondeos e intersecciones de cortes (7 y 8) apoyados en líneas sísmicas RV-70 y 71V (figura 8a)..... 16
- Figura 5b.** Línea sísmica RV-71V interpretada a partir de los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells. Acuífero Mediodía. Línea y corte 8 se posicionan en la figura 9B (el acuífero principal es el Cretácico Superior)..... 16
- Figura 6.** Situación muestras de petrofísica. Se han tomado muestras de campo en Carrascal-Ferrer (51 muestras), Solana (40 muestras) y Serral-Salinas (44 muestras)..... 19
- Figura 7.** Esquema de datos de entrada de 3D Geomodeller. El input básico al modelo geológico 3D son cortes geológicos, junto con sondeos y sísmica interpretada en términos de las superficies de referencia principales..... 21
- Figura 8a. Modelación acuífero Carrascal-Ferrer. A)** Mapa geológico. Se ubican sondeos (en rojo) y líneas sísmicas RV-70-V y RV-71-V. A partir de revisión del MAGNA 822 (IGME, 2008). **B)** Vistas 3D de las Sierras de Carrascal-Ferrer, desde el Sur. Magna y ortofoto tapizando MDT, para fotointerpretación. **C)** Interpretación del perfil sísmico RV-70-V. Debajo: Cortes 1 a 4 del mapa geológico calculados por 3D Geomodeller: las unidades acuíferas comprenden del Aptiense al Aquitaniense..... 27
- Figura 8b. Modelación acuífero Carrascal-Ferrer. D)** y **E)** Mapas de isobatas del muro de la Unidad Cretácico Superior y Aptiense-Albiense (m.s.n.m.). **F)** Vista (Gocad) del Modelo geológico 3D del Acuífero de Carrascal-Ferrer. **G)** Curvas de reservas totales del acuífero de Carrascal-Ferrer para dos escenarios de porosidades abiertas (0.35%, en azul, y 1.9%, en rojo) y coeficientes de almacenamiento (10^{-6} y 10^{-5}), y escenario medio (violeta). -80 msnm, cota mínima de la curva de explotación desde sondeo Picaserías..... 29
- Figura 9a. Modelación 3D Acuífero de Mediodía. A)** Contexto geológico del acuífero Mediodía (límite en azul; DPA, 2010). **B)** Esquema de situación de los cortes geológicos utilizados en la modelización 3D del acuífero, la situación de la línea sísmica RV-71V, sondeos mecánicos y algunas referencias geográficas. **C)** Vistas en 3D de ortofotografía mostrando la exposición de la estructura Mediodía. **D)** Corte nº 7 del acuífero; Arriba: según el Atlas hidrogeológico de Alicante (DPA, 2013); Abajo: Según el modelo 3D obtenido en este trabajo. En época de aguas altas, el menor salto de la falla F5 y su menor buzamiento podría permitir una conexión entre la zona saturada (bajo el nivel piezométrico de 132 m.s.n.m.) a ambos lados de la misma, y por tanto, la conexión de Mediodía con acuíferos al NO de él..... 33

Figura 9b. Modelación 3D Acuífero de Mediodía. **E)** Isobatas del muro del Aptiense (m.s.n.m).Modelo geomodeller. **F)** Isobatas del muro del acuífero (m.s.n.m; muro del C. Superior; modelo de Geomodeller). **G)** Isobatas del muro del acuífero (m.s.n.m; muro del C. Superior; modelo de gOcad. Obsérvese que la superficie está adaptada a los sondeos, por tanto se genera mayor volumen). **H)** Curvas de reservas del Acuífero Mediodía obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero (utilizando dos porosidades distintas).....35

Figura 10a. Modelación Acuíferos de Solana y Volcadores-Onteniente. **A)** Mapa geológico del área estudiada, con indicación de Sierras principales. Límites de los acuíferos estudiados en azul. Se posicionan cortes 1 y 3 y líneas sísmicas. **B)** Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Solana. **C)** Perfil sísmico RV-81 (entre las Sierras de las Villas y la de Peñarrubia) en formato digital seg-y convertido a profundidad. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos **D)** Cortes geológicos realizados al modelo 3D generado en el proyecto. Las superficies de referencia del Cretácico Superior y Neógeno se obtienen a partir de la integración de datos geológicos, sondeos mecánicos, SEVs, MT y sísmica de reflexión.....39

Figura 10b. Modelación Acuíferos de Solana y Volcadores-Onteniente. **E)** Vista 3D con el programa gOcad de los sondeos mecánicos (amarillo), cortes interpretados, SEVs con el modelo de resistividades de cada sondeo (naranja). **F)** Vistas del Modelo geológico 3D (gOcad) del Acuífero de Solana-Volcadores-Onteniente. **G)** Resultados de las anomalías de Bouguer calculadas y misfit con el Forward modelling gravimétrico 3D y la Inversión gravimétrica 3D que se usa para cartografiar las unidades geológicas profundas (Triásico, Jurásico y Cretácico Inferior. Modelo gravimétrico 3D Post-Inversión. **H)** Mapa de isobatas del muro del Cenomaniense C1 (m.s.n.m). **I)** Muro del Jurásico (m.s.n.m). En gris se representa la posición de los diapiros triásicos.....41

Figura 10c. Curvas de reservas totales del Acuífero de Solana. Obtenidas a partir del modelo 3D del mismo, para dos escenarios de porosidades abiertas (1.9% y 7%) y coeficientes de almacenamiento (10^{-7} y 10^{-4}), y escenario medio.....43

Figura 11a. Modelación de los acuíferos de los anticlinales de Orcheta y Cabezón de Oro. **A)** Contexto geológico del Acuífero de los Anticlinales de Orcheta (A. de Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta). Se indican líneas sísmicas, cortes y sondeos hidrogeológicos. **B)** Columna estratigráfica sintética del área del acuífero. Con línea discontinua se marcan los límites principales usados como superficies de referencia en la construcción del modelo 3D. Sin sondeos de control del Cretácico Inferior y del techo del Jurásico, los espesores sedimentarios presentan gran incertidumbre. **C)** Corte tectónico esquemático según la línea BT-7 y dos interpretaciones de la misma: a la izquierda, interpretación de Cretácico Inferior y Paleógeno más delgados, en la que el sondeo Macaroba cortaría el mismo espesor de C. Superior y C. inferior (unos 420 m); a la derecha, interpretación de Cretácico Inferior y Paleógeno más gruesos, donde el sondeo Macaroba cortaría sólo unos 150 m de C. Superior. **D)** Visualización de tres de los 10 cortes geológicos (ver situación en A) utilizados como secciones para la construcción del modelo en 3D Geomodeller, en los dos casos de Cretácico Inferior y Paleógeno más delgados y más gruesos.....47

Figura 11b. Modelación de los acuíferos de los anticlinales de Orcheta y Cabezón de Oro. Isobatas de Superficies de Referencia (m.s.n.m): **F)** Muro Cretácico Superior margoso; **G)** Muro Cretácico Superior; **H)** Muro Cretácico Inferior. A trazos, alternativa donde los cabalgamientos de Macaroba y Orcheta giran al SO, a nivel de techo del Jurásico, aislando cabezón del Oro de los anticlinales de Orcheta; **I)** Muro Jurásico.....49

Figura 11c. Modelación de los acuíferos de los anticlinales de Orcheta y Cabezón de Oro. Isobatas de Superficies de Referencia (m.s.n.m.): **A)** Muro Paleógeno “delgado”. Escenario de Cretácico Inferior y Paleógeno gruesos; **B)** Muro Paleógeno “grueso”; **C)** Muro Cretácico Superior margoso; **D)** Muro Cretácico Superior.....51

Figura 11d. Curvas de reservas totales del Acuífero Orcheta. Obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero. Se distinguen los sectores Pequerina, Benienzo y Amadorio.....53

Figura 12a. Modelación Acuífero de Cabo Roig y Triásico Campo de Cartagena. A) Esquema de situación de los cortes geológicos, sísmica y sondeos utilizados en la modelización 3D del acuífero de Cabo Roig sobre mapa geológico de la zona de estudio (Geode). Se indica afloramiento del acuífero de Cabo Roig (azul) y su perímetro (rosa). **B)** Corte hidrogeológico I y sección correspondiente en el Geomodeller. **C) De Arriba abajo:** Sección Sísmica S-82-51. Subparalela a la costa, con horizontes de estratigrafía sísmica interpretados y calados en el sondeo de petróleo S. Miguel de Salinas-1 donde se indican techos de Unidades. Las fallas son de pequeño salto. Rojo discontinuo: muro del acuífero Plioceno en modelo 3D Geomodeller; verde discontinuo, interpretación alternativa sísmica del muro del Plioceno. En medio: sección sísmica S-86-90. Abajo: línea sísmica S-84-64-MU (Antiforme Campo de Cartagena).....57

Figura 12b. Modelación Acuífero de Cabo Roig y Triásico Campo de Cartagena. D) Mapa isobatas (m.s.n.m.) del Techo (izquierda) y Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig (perímetro en rosa). En rojo: límites del modelo 3D (retícula cada 2 km). **E)** Curvas de Reservas del acuífero Plioceno. **F)** Líneas sísmicas: S-84-66N (sondeo Benejuzar) y S-84-68-MU (sondeos de petróleo Rojas y La Mata). **G)** Modelo 3D Obtenido. **H)** Isobatas (m.s.n.m.) y estructuras de basamento Triásico desde el Campo de Cartagena a la Cuenca de Torreveja sobre mapa geológico 1:50.000 (Geode). En rojo: estructuras de almacenamiento al Complejo mioceno basal y Trías.....59

Figura 13a. Modelación Acuífero Serral-Salinas. Arriba. A) Mapa geológico del área estudiada con indicación de Sierras principales. Límites de los acuíferos estudiados en azul. Se posicionan cortes y líneas sísmicas. **B)** Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Salinas. **Derecha:** Vista 3D de los sondeos mecánicos (amarillo) y SEDT (rojo) y el modelo de resistividades de cada sondeo con el programa gOcad. **C)** Perfiles sísmicos RV-63, 78 y 80 en formato digital seg-y convertido a profundidad. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos. **D)** Cortes geológicos 1 a 5 realizados al modelo 3D generado en el proyecto. **E)** Vista 3D del muro del Cenomaniense del Acuífero de Serral-Salinas junto con los sondeos mecánicos, los SEDTs y la línea RV-80 (en gris). **Derecha:** Vista del modelo voxet de Sierra de Salinas. Cada celda tiene un atributo litológico.....63

Figura 13b. Modelación Acuífero Serral-Salinas. Mapas de isobatas de muro de: **F)** Unidad Neógena (800 a -120 m.s.n.m.) **G)** Unidad Senonense **H)** Unidad Cenomaniense **I)** Unidad Aptiense-Albiense (1000 a -1000 m.s.n.m.).....65

Figura 13c. Curvas reservas del acuífero Serral-Salinas. Estimadas para distintos escenarios de porosidades y coeficientes de almacenamiento a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero.....67

Figura 14. Histogramas de la porosidad correspondientes a la totalidad de las muestras y a las muestras ordenadas según el acuífero de procedencia.....73

Figura 15. Histogramas de la densidad de la totalidad de las muestras y de las muestras ordenadas según el acuífero de procedencia.....74

Figura 16. Diagramas de caja-bigote de la densidad totalidad de las muestras y de las muestras ordenadas según el acuífero de procedencia.....75

Figura 17. Gráfico de dispersión en el que se relacionan densidad aparente (kg/m^3) y porosidad abierta (%) para todas las muestras analizadas, diferenciadas por el acuífero de procedencia.....76

Figura 18. Diagramas de caja-bigote de la porosidad de la totalidad de las muestras y de las muestras por edad.....77

Figura 19. Diagrama de dispersión de la porosidad de la totalidad de las muestras agrupadas por edad.....77

Figura 20. Diagramas de caja-bigote de la porosidad de la totalidad de las muestras agrupadas según la clasificación de Lucía.....78

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO CARRASCAL-FERRER.....	25-26
TABLA II. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO MEDIODÍA.....	31-32
TABLA III. RESUMEN RESULTADOS. ACUIFEROS SOLANA-VOLCADORES-ONTENIENTE.....	37-38
TABLA IV. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO ORCHETA-CABEZÓN DE ORO.....	45-46
TABLA V. RESUMEN DE RESULTADOS. CABO ROIG-CAMPO CARTAGENA.....	55-56
TABLA VI. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO SERRAL-SALINAS.....	61-62
Tabla VII. Estadísticos de posición de los valores de porosidad abierta (%) y de densidad (kg/m^3) de las muestras analizadas.....	72
Tabla VIII. Estadísticos de posición de los valores de porosidad abierta (%) y de densidad (kg/m^3) de las muestras analizadas organizados por acuíferos.....	75
Tabla IX. Estadísticos de posición de los valores de porosidad abierta (%) y de densidad (kg/m^3) de las muestras analizadas, organizados por edad de los materiales muestreados.....	76

1 INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS.

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. 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 la 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 está 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 “Acuerdo específico en 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 (HIDROPROAL)”, dedicada a la evaluación de reservas hídricas de la provincia de Alicante ante la previsión de fenómenos extremos, cuyos resultados se presentan en esta Memoria-Resumen.

El proyecto HIDROPROAL pretende ensayar metodologías para la realización de estudios geológicos sistemáticos del subsuelo sobre un conjunto importante de acuíferos de la provincia de Alicante con el objeto de caracterizar su estructura y geometría para contribuir a la determinación de los recursos hidrogeológicos profundos de los mismos. Ello implica el uso de metodologías de caracterización geológica y petrofísica de las áreas con suficiente información geofísica (sísmica de reflexión, principalmente) y sondeos profundos.

De acuerdo con ello, tres son los objetivos fundamentales del proyecto HIDROPROAL:

- El primero consiste en establecer una metodología para la modelación geológica 3D,
- El segundo, aplicar esta metodología a una serie de acuíferos seleccionados, obteniendo los correspondientes **modelos 3D** de los mismos,
- El tercero, proceder a la evaluación de las reservas hídricas de acuíferos profundos.

Asimismo, la interpretación e integración de información geofísica previa (sísmica de reflexión, gravimetría, geofísica eléctrica), de nuevos datos estructurales y petrofísicos, de datos procedentes de sondeos mecánicos de investigación hidrogeológica y petrolera, y el posterior análisis de toda esta información **en el propio modelo 3D**

construido, han permitido conseguir unos objetivos secundarios, pero no por ello menos importantes, entre los que cabe citar:

- i) La consecución de superficies georreferenciadas de techo y muro de formaciones geológicas exportables a modelos matemáticos de flujo y transporte de aguas subterráneas,
- ii) La posible utilización del modelo 3D como una herramienta de soporte de decisiones para emplazar nuevas captaciones de agua subterránea, y,
- iii) La mejora del conocimiento de los límites laterales de los acuíferos investigados.

Para alcanzar estos objetivos se han aprovechado los recientes y notables avances en la modelación matemática de reservorios geológicos profundos integrando la información geológica, sondeos y geofísica existente (sísmica, especialmente), avances plasmados en distintos tipos de software comercial 3D hoy disponible, aplicables a la modelación de acuíferos.

La reciente incorporación de los modelos geológicos 3D en la investigación hidrogeológica ha contribuido a conseguir notables mejoras en el conocimiento de los acuíferos en sus tres dimensiones, lo que se refleja en el crecimiento del 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 (pe, Gill et al. 2011, Robins et al. 2004, Ross et al. 2005, Wu et al. 2008).

La selección de acuíferos a estudiar se ha basado en tres criterios básicos:

- 1) Existencia de buena exposición de la geología superficial, desde donde capturar datos estructurales de calidad, lo que permite el ensayo de modelaciones geológicas 3D con técnicas y software modernos disponibles en el IGME.
- 2) Acuífero con un buen nivel de recursos medios renovables y de reservas, de acuerdo con la información hidrogeológica previa disponible.
- 3) Abundancia de datos geofísicos de subsuelo: sobre todo, líneas sísmicas de reflexión, pero también campañas gravimétricas, electromagnéticas y de Sondeos Eléctricos Verticales.

El criterio 2) implica la Cartografía de subsuelo de Superficies de Referencia de objetivo hidrogeológico próximas a los techos y muro del **Cretácico Superior carbonatado**, que puede considerarse **el objetivo hidrogeológico profundo más importante**, por recursos explotables y reservas, de la provincia de Alicante.

Revisadas la mayor parte tanto de la geología de la serie Magna de la provincia de Alicante, así como la sísmica de reflexión disponible proveniente de la exploración petrolera, y los Atlas y mapas del agua de Alicante publicados por la DPA (DPA. 2007, 2010a), se seleccionaron los seis acuíferos siguientes (figura 1), de acuerdo con los tres criterios mencionados:

2 METODOLOGÍA

El esquema metodológico general usado en el proyecto HIDROPROAL se representa en la figura 2, que se describe a continuación.

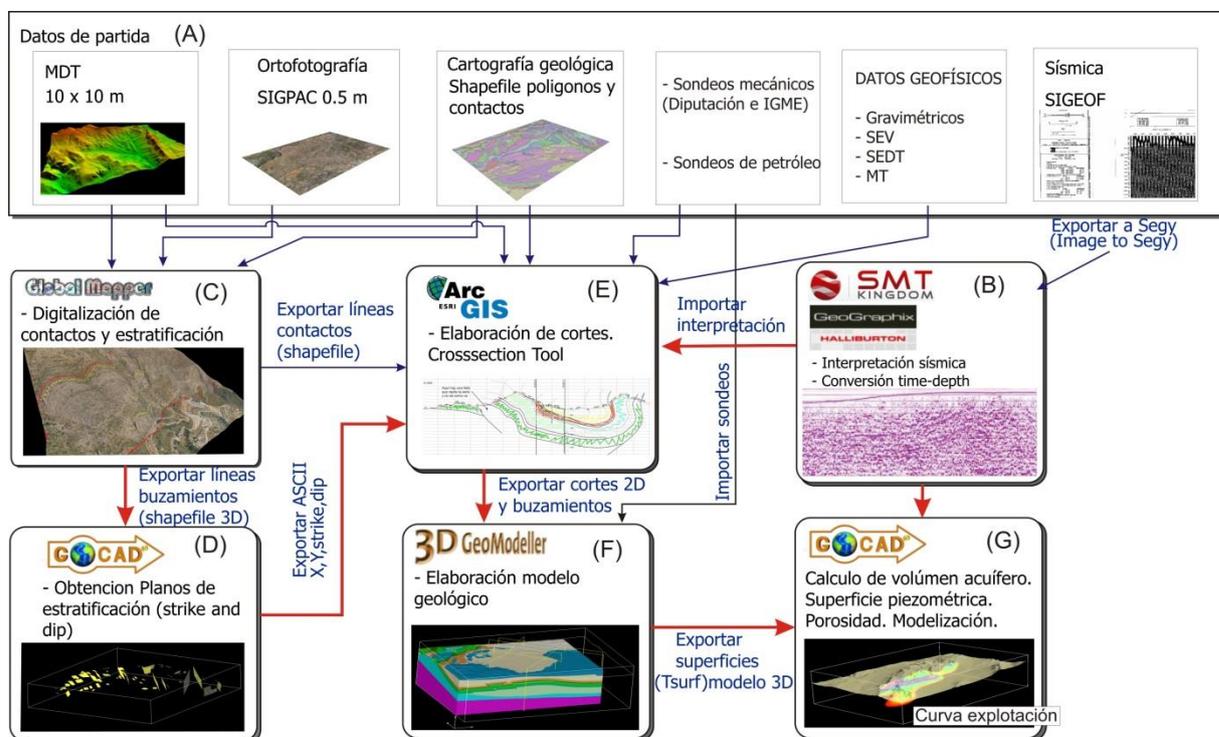


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada para la construcción de modelos geológicos 3D. En cada uno de los pasos se detalla el software usado.

1. Recopilación de datos geológicos y geofísicos de partida.

Los datos de partida (figura 2A) incluyen el Modelo Digital del Terreno (MDT, 10x10 m), ortofotografía, y cartografía geológica Magna 1:50.000 (shape de polígonos y contactos). Además se incorporan los sondeos mecánicos y sondeos de petróleo, y los datos de geofísica disponibles. Estos incluyen perfiles sísmicos, provenientes del ATH (Archivo Técnico de Hidrocarburos), disponibles en línea en el Sistema de información de geología del subsuelo, recursos energéticos y almacenamiento de CO₂ (<http://www.igme.es/infoigme/aplicaciones/hidrocarburos/>), y campañas geofísicas de sísmica, campo potencial y eléctricas (disponibles en línea en SIGECO: <http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htm>).

2. Elementos del modelo. Superficies de Referencia y Fallas.

El establecimiento de las Superficies de Referencia estratigráficas a modelar se realiza partiendo de la información recopilada en 1. Es preciso analizar las columnas litológicas detalladas de sondeos para correlacionarlas con las series estratigráficas de referencia en cada caso (ya se trate de columnas MAGNA, bibliográficas, de informes técnicos, de tesis doctorales, etc), y efectuar una revisión rápida de los espejos sísmicos interpretables (figura 2B).

Es necesario destacar los dos aspectos fundamentales siguientes:

-Analizada la información de partida, los pasos más importantes en la construcción de un modelo geológico 3D consisten en la *selección y definición de sus elementos básicos*:

- a) superficies de techo y muro de las unidades a modelar, y*
- b) fallas principales que las afectan,*

Ambos elementos, superficies y fallas, configuran la arquitectura del volumen 3D a construir.

-La interpretación sísmica juega un papel fundamental en la definición de estos elementos básicos en profundidad (figura 2B).

En general, los modelos geológicos 3D reconstruidos comprenden las 5 superficies siguientes:

- Muro Neógeno
- Muro Paleógeno
- Muro Cretácico Superior
- Muro Cretácico Inferior
- Techo Triásico

En el Cretácico Superior se han distinguido varios límites estratigráficos internos (Cenomaniense, Turoniense, Senoniense), según los casos, en Carrascal, Solana, Orcheta y Serral-Salinas.

3. Revisión y densificación de datos cartográficos y estructurales.

El trabajo de revisión cartográfica se inicia con la edición en 3D y consiguiente corrección de los contactos y buzamientos a partir de la cartografía geológica existente en formato shape (Magna, figuras 2A y 3).

Los datos previos se ven densificados y mejorados con la incorporación de contactos obtenidos de imágenes 3D (superposición del MDT y ortofotografías en GlobalMapper, figuras 2C, 3 y 4). A la vez, se densifica la información de datos estructurales de superficie utilizando técnicas de cartografía en 3D como la medida de dirección y buzamiento de capas partir de la intersección de la estratificación con el MDT (regla de las uves, detalle en figura 4).

Además, se incorporan trabajos de campo de recogida de datos geológico-estructurales adicionales (medición de buzamientos, levantamiento de columnas litológicas detalladas, etc), que son transferidos a gOcad, donde se obtienen planos de estratificación 3D (con su correspondiente dirección y buzamiento, figura 2D).

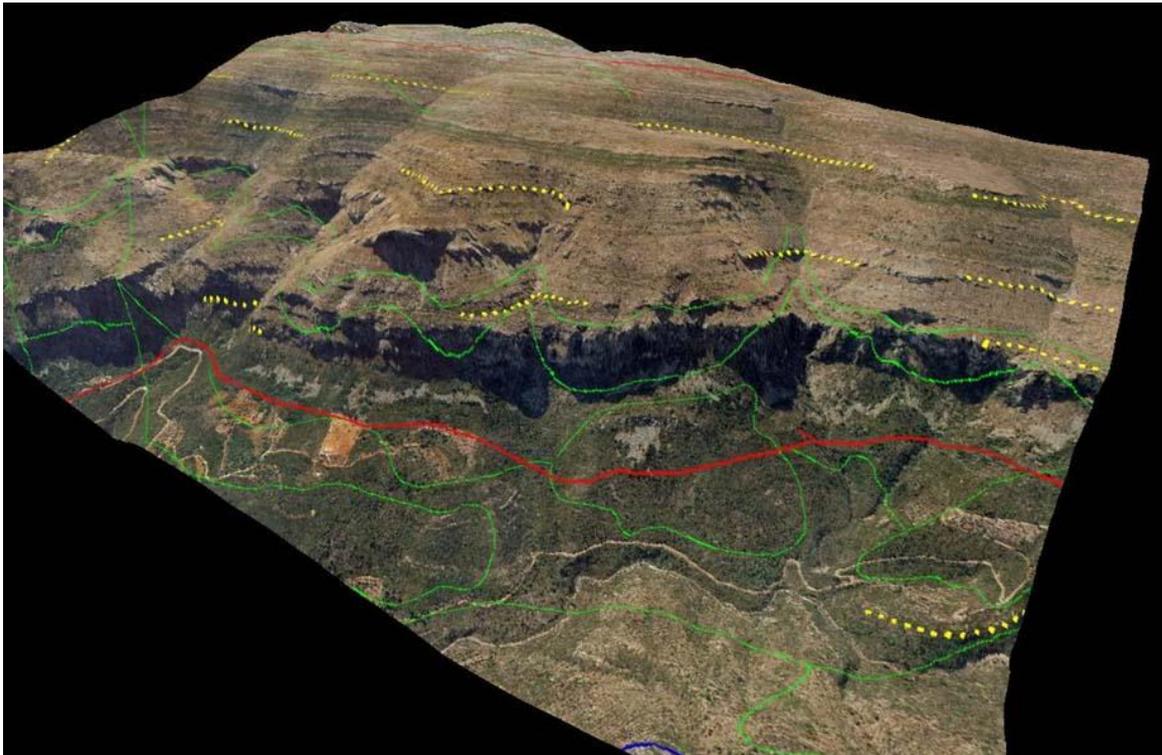


Figura 3. Edición y corrección de cartografía geológica de la serie Magna 1:50.000 (en verde) en entorno 3D. Digitalización de contactos, fallas y estratificación (en amarillo).

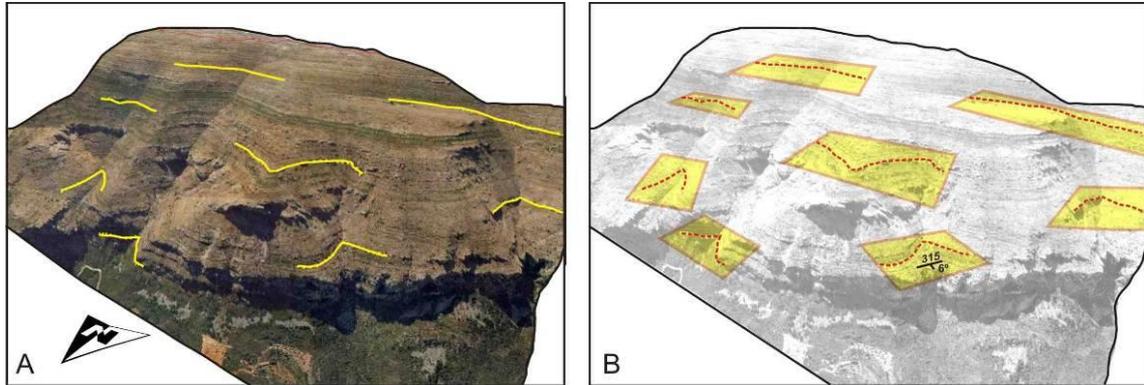


Figura 4. Densificación de datos cartográficos y estructurales. A) Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D (*Global Mapper*). B) Planos que se ajustan a las líneas 3D digitalizadas (*gOcad*). Los planos indican dirección y buzamiento de la estratificación y son utilizados en la modelación de las superficies en *3D Geomodeler*.

4. Construcción de cortes geológicos 3D.

Las revisiones y densificaciones de datos geológico-estructurales anteriores (figuras 2C, 2D) permiten elaborar cortes geológicos (figura 2E), con herramientas semiautomáticas ArcGis (detalle en figura 5a), que incorporan toda la información estructural.

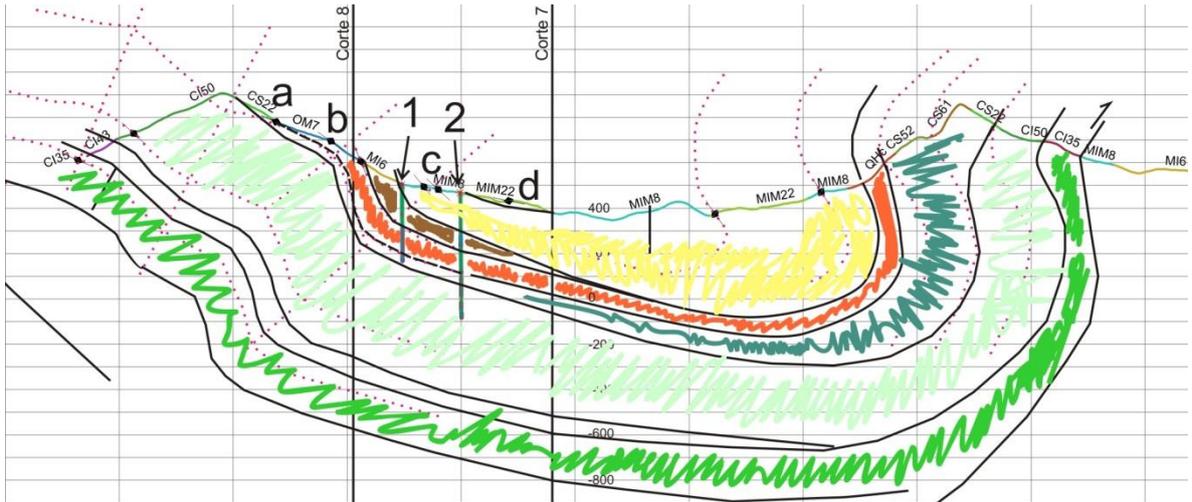


Figura 5a. Construcción de cortes geológicos en ArcGis. Acuífero Carrascal (entre S. Carrascal y Ferrer). 1,2 sondeos; a, b, c, d, buzamientos aparentes. Profundidades controladas por sondeos e intersecciones de cortes (7 y 8) según líneas sísmicas RV-70 y 71V (figura 8a).

En la figura 5a el SIG representa el corte topográfico con un código de color según la formación atravesada, con los buzamientos calculados sobre el corte (buzamientos aparentes) y sondeos disponibles. Los cortes geológicos se proyectan en profundidad con auxilio de los datos de sondeos e interpretaciones geofísicas (en la figura 5b el corte coincide con el extremo Oeste de la línea 71V).

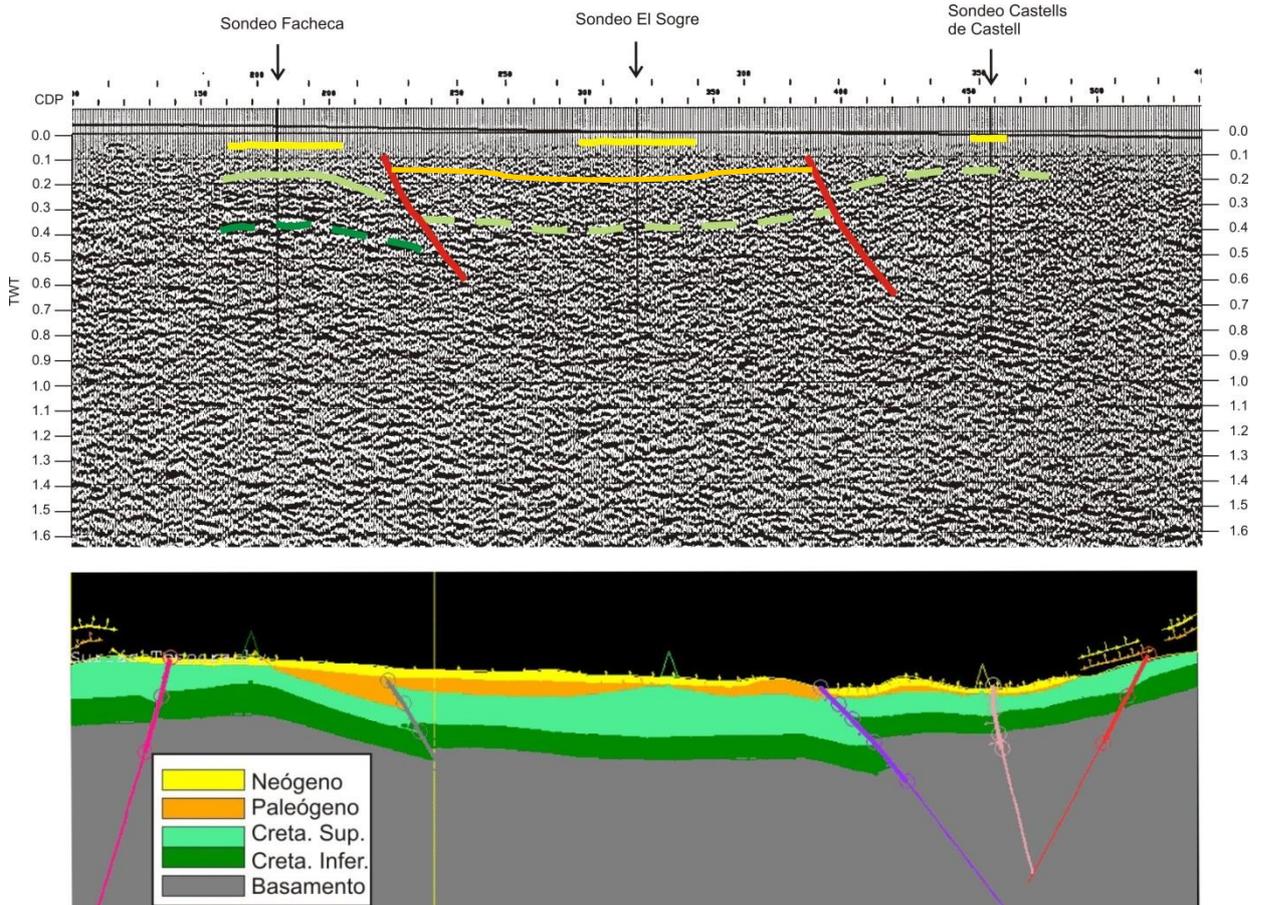


Figura 5b. Línea sísmica RV-71V interpretada a partir de los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells. Acuífero Mediodía. Línea sísmica y corte 8 se posicionan en la figura 9B (el acuífero principal es el Cretácico Superior).

Pueden existir dificultades de correlación entre las estructuras más superficiales derivadas de cortes o mapas de isohipsas previos, y más profundas derivadas de cortes estructurales interpretados con la sísmica (en figura 2B). Se procede entonces (pe, Solana) a la elaboración de modelos gravimétricos y magnéticos de apoyo, especialmente donde la información sísmica sea mala, escasa o nula. Los distintos tipos de datos geofísicos usados en la elaboración de cortes y modelos de cada acuífero aparecen en las tablas del apartado 4.2.

Es preciso destacar que el software de modelización geológica Geomodeller 3D (figura 2F) implica:

-El uso de cortes geológicos como input básico al modelo geológico 3D, obtenidos a partir de cartografía geológica revisada, junto con sondeos y sísmica interpretada en términos de las superficies de referencia principales; y,

-La preparación de cortes 3D consistentes en diversas orientaciones, lo que constituye un aspecto crítico de la metodología usada.

5. Interpretación líneas sísmicas y conversión tiempo-profundidad.

Ya se ha indicado que la interpretación de líneas sísmicas es fundamental para el establecimiento de las Superficies de Referencia del modelo 3D y la construcción de cortes en profundidad.

En la construcción de todos los modelos 3D de los acuíferos alicantinos estudiados se han usado las secciones sísmicas disponibles sobre los mismos (tablas del apartado 4.2)

Para la interpretación sísmica de las líneas es preferible digitalizarlas (a formato Seg-y) y realizar su interpretación con un software especializado (SMT de kingdom o Geographix, figura 2B). La conversión tiempo-profundidad se puede realizar apoyándose en los datos de velocidad de las propias secciones sísmicas o usando sondeos próximos. Sin embargo, es preciso mencionar que:

-Las líneas sísmicas disponibles en Alicante son de media a baja calidad, existiendo muchas zonas ruidosas con escasa reflectividad. Por ello, los cortes estructurales profundos derivados de sísmica pueden ser inconsistentes entre sí, o presentar distintas posibilidades de interpretación. En estos casos se ha presentado a la Diputación posibles alternativas con diferentes modelos 3D (pe, Orcheta).

-No existen sondeos de petróleo onshore en la provincia de Alicante (figura 1). Exceptuando los sondeos en mar, los más próximos, Sierra Larga y Ascoy, se ubican en Murcia, y sólo son susceptibles de utilización en la modelación profunda de Serral-Salinas.

6. Construcción de modelos geológicos 3D (con 3D Geomodeller y gOcad).

Se basa en los cortes geológicos preparados según se indica más arriba (epígrafe 4), sondeos, y secciones sísmicas interpretadas en 5. El software 3D Geomodeller integra toda la información disponible (cartografía geológica, sondeos, e interpretaciones geofísicas) y permite generar modelos geológicos 3D que representen

una aproximación lógica (con “prejuicio geológico” desde superficie), y satisfactoria del acuífero.

Calculado el modelo matemático 3D en Geomodeller (mediante cokriging equipotencial; apartado 3, más abajo), las superficies de referencia geológicas 3D construidas (figura 2F) se transfieren al programa gOcad (figura 2G), donde se editan y afinan para mejorarlas debido a que:

- Las superficies de las formaciones geológicas que genera 3D Geomodeller continúan a lo largo de las fallas al intersectar con ellas, por lo que en gOcad hay que recortarlas en las zonas de intersección.

- La triangulación de las superficies de referencia que realiza 3D Geomodeller es deficiente con la formación de triángulos muy isósceles. Al importarlas en gOcad se mejora la triangulación para una correcta cartografía de la superficie de que se trate y obtención de productos derivados, como mapas de isobatas.

Una vez editadas y mejoradas las superficies 3D, es necesario realizar cálculos volumétricos para la estimación de las reservas de cada acuífero estudiado. Para ello en gOcad se genera un stratigraphic grid, que es una malla 3D regular que puede ser deformada y cortada por fallas para ajustarla a un modelo estructural de superficies, y que permite el cálculo del volumen total de roca y del volumen saturado del acuífero y reservas correspondientes (figura 2G), teniendo en cuenta la porosidad y superficie piezométrica del acuífero de que se trate, como se describe más abajo.

7. Caracterización del sistema poroso

Para la caracterización del sistema poroso de las formaciones permeables de tres de los acuíferos alicantinos estudiados (los más importantes: Carrascal-Ferrer, Solana y Serral-Salinas, figura 1), se ha realizado un estudio petrográfico y se ha determinado en laboratorio la porosidad de unas 50 muestras recogidas en campo, en cada uno de ellos (figura 6).

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 (principio de Arquímedes).

Es importante resaltar que 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.

Esta distribución de la porosidad es evidente en los acuíferos detríticos y, según los estudios más actuales, 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 CO₂ en reservorios de formaciones carbonáticas (Bachu 2008, Eisinger and Jensen 2011) y en los proyectos de Almacenamiento Subterráneo y Recuperación en este tipo de materiales (ASR; Herrmann et al. 2004, Lowry and Anderson 2006, Vacher et al. 2006).

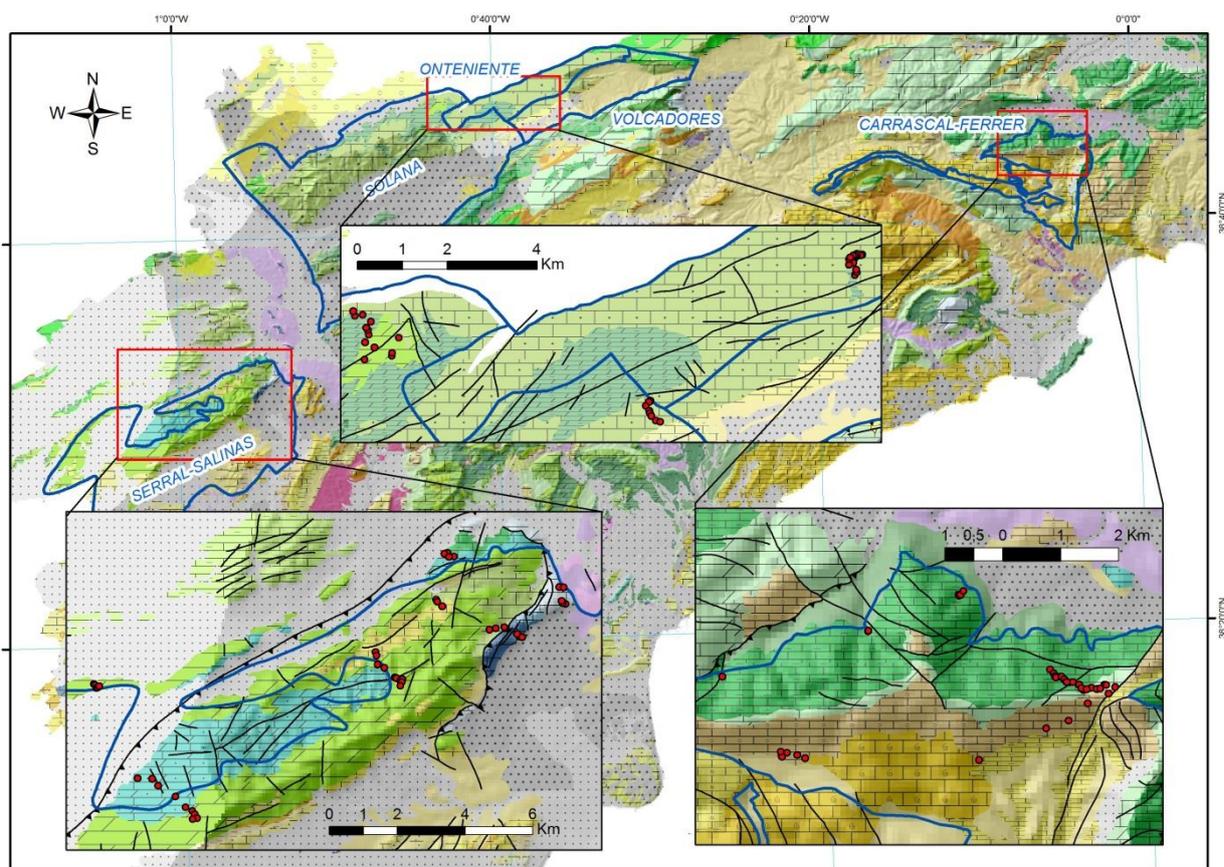


Figura 6. Situación muestras de petrofísica. Se han tomado muestras de campo en Carrascal-Ferrer (51 muestras), Solana (40 muestras) y Serral-Salinas (44 muestras).

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).

Estudio petrográfico

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

Para el estudio petrográfico se ha utilizado microscopía óptica de polarización con cámara digital acoplada, método indicado para vacíos superiores a 10 μm (la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5 μm). Por tanto, es importante destacar la reducida capacidad de resolución de esta técnica para poros con diámetro

inferior a 1 μm . Se ha usado luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión de acuerdo con la naturaleza y la preparación de las muestras.

Porosidad abierta

Los ensayos para determinar la porosidad interconectada (p_0) en las muestras de campo 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 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 a partir de la siguiente expresión (Borczak et al., 1990), aplicando el principio de Arquímedes:

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

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, y G_{nw} es el peso de la muestra saturada en agua y pesada en agua (balanza hidrostática).

8. Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas

El procedimiento empleado para el cálculo de las reservas totales requiere 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 de cada uno de los seis acuíferos alicantinos estudiados. 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 se procede a la construcción de un *stigraphic grid*. El *stigraphic grid* es un 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 obtenido las curvas de reservas subterráneas que resultan de aplicar porosidades abiertas que corresponden a los percentiles 25 y 75 de las muestras recogidas en campo en Carrascal-Ferrer, Solana y Serral-Salinas (reservas mínimas, máximas, y medias entre ambas). En Mediodía, Orcheta y Cabo Roig se han usado porosidades obtenidas de fuentes bibliográficas. 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 se han calculado considerando los volúmenes comprendidos entre la superficie piezométrica más alta, obtenida a partir del periodo de registro disponible (años 70-80 del pasado siglo, a la actualidad) y el techo y el muro de las formaciones acuíferas modeladas, lo que ha permitido estimar, en esas fechas, qué parte del acuífero presentaba un comportamiento confinado y qué parte presentaba carácter libre.

3 SOFTWARE DE TRABAJO

El software utilizado para la construcción del modelo geológico 3D ha sido:

3D Geomodeller

3D Geomodeller es un software que permite la construcción de modelos geológicos complejos en 3D (fallas, pliegues, estratos invertidos, intrusiones, etc.), integrando toda la información disponible (figura 2, detalle en figura 7), y generando un modelo “con prejuicio geológico” que representa una aproximación lógica y satisfactoria del volumen a modelar. 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 modelar (Lajaunie et al., 1997; Chilès et al., 2004; Calcagno et al., 2008; Guillen, et al., 2008).

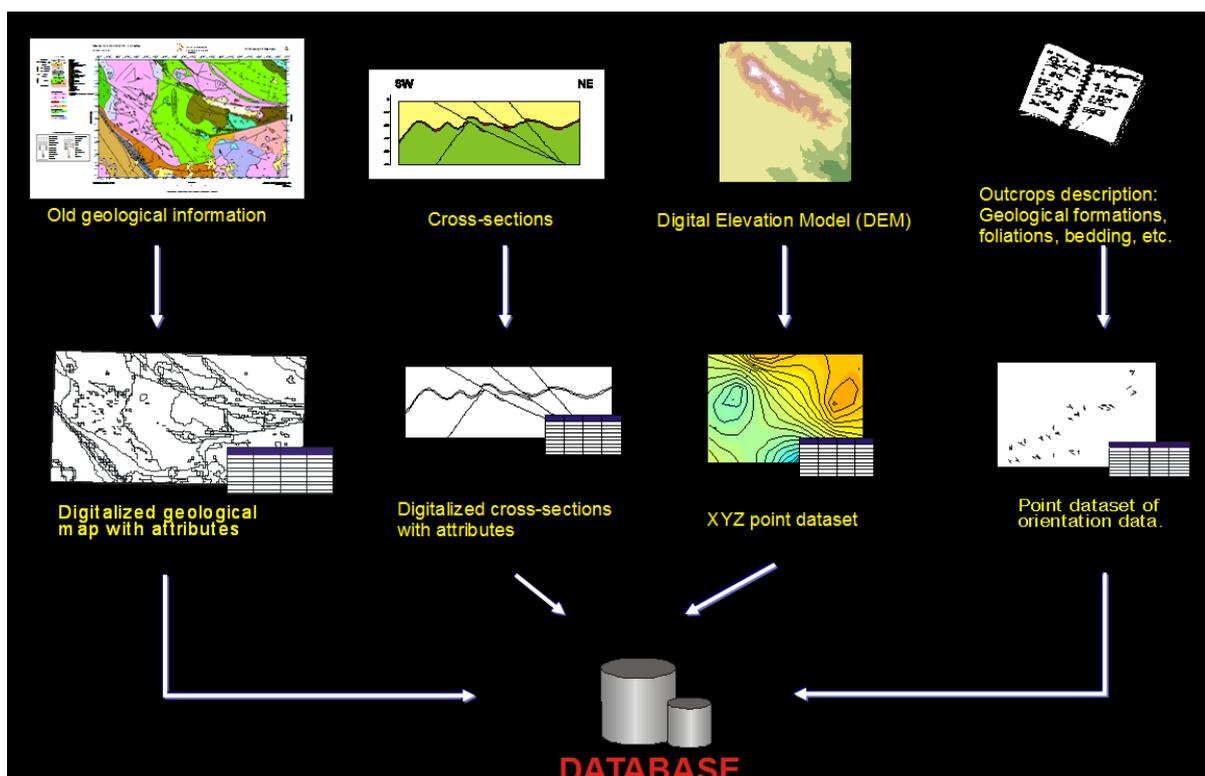


Figura 7. Esquema de datos de entrada a 3D Geomodeller. El input básico al modelo geológico 3D son cortes geológicos, obtenidos a partir de una cartografía revisada, junto con sondeos y sísmica interpretada en términos de las Superficies de Referencia principales.

El proceso de generación de cortes geológicos en 3D, input básico del programa, y el posterior cálculo de las superficies equipotenciales que en profundidad generan el modelo completo en 3D, requiere la definición coherente de las unidades estratigráficas implicadas en el mismo (espesor, dirección y buzamiento), y el de todas sus fallas, así como la jerarquía y el orden de corte entre ellas. Si no hay coherencia en los cortes, el modelo de superficies equipotenciales no se podrá calcular

correctamente. Este proceso de cálculo implica la corrección y mejora de datos en cortes que individualmente parecen correctos pero que pueden no resultar coherentes en su conjunto, por lo que no permiten el cálculo del modelo final. Por ello, 3D Geomodeller pone a prueba de forma continua el conocimiento y presunciones geológicas del usuario.

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 testificaciones geofísicas en el proceso de construcción del modelo 3D. En este proyecto gOcad se ha utilizado para la densificación e interpolación de datos cartográficos y estructurales en 3D (apartado 2), y para mejorar el modelo obtenido en *3D Geomodeller* y editar las superficies obtenidas. También se ha usado para construir la malla 3D del modelo geológico a la que se le asignan los valores de porosidad eficaz obtenidos en laboratorio para el cálculo de las reservas totales de agua subterránea.

ArcGis

En este proyecto se ha utilizado *ArcGis* para la gestión de la información geográfica (sondeos, cartografía geológica, posicionamiento de la geofísica, etc.) y para la elaboración de cortes geológicos (figura 2) que posteriormente se han exportado a *3D Geomodeller*.

SMT Kingdom Suite y Geographix

SMT Kingdom Suite y *Geographix* son programas de interpretación sísmica 2D y 3D y conversión tiempo-profundidad mediante diversas técnicas. Han sido utilizados para la interpretación de los horizontes sísmicos de todos los modelos de los acuíferos de Alicante estudiados. La información sísmica interpretada es posteriormente exportada como datos de entrada:

-Para la construcción del modelo en *3D Geomodeller*, ya sea como pseudopozos x , y , z_i (siendo z_i las profundidades de los espejos sísmicos en cada CDP), ya sea como corte geológico.

-Para ajustar el modelo en gOcad donde las interpretaciones sísmicas pueden trabajarse como puntos, líneas y superficies.

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 *Global Mapper* para la exportación del MDT al formato xyz requerido por *3D Geomodeller*, y para la digitalización en un entorno 3D de la intersección de la estratificación con la topografía.

4 RESUMEN DE RESULTADOS

4.1 Resultados obtenidos

1. El primer resultado de este Proyecto ha sido el establecer una **metodología para la modelización geológica 3D** de acuíferos profundos. La metodología establecida, ampliamente descrita en el apartado 2, implica dos aspectos básicos:

-Un esfuerzo importante de revisión estructural, a partir de trabajo de campo en los acuíferos de Carrascal-Ferrer y Serral-Salinas, y de fotointerpretación y análisis en un entorno 3D en el resto (dirección y buzamiento de la estratificación, cartografía de contactos, medida de cinemática de fallas, secuencia temporal de las estructuras de plegamiento y las fallas, etc.).

-Una fuerte integración de datos de subsuelo, para abordar la modelación 3D de regiones, como las estudiadas, donde los sondeos profundos son escasos. Se han usado datos interpretados de geofísica eléctrica y electromagnética, y, sobre todo, líneas sísmicas no apoyadas por sondeos de investigación con registro de velocidad, dada la no disponibilidad de sondeos de petróleo. Esta circunstancia última es característica de todas las campañas sísmicas “onshore” localizadas en el Prebético de Alicante.

La metodología propuesta incide en una recuperación y análisis integral de toda la información de subsuelo disponible, de manera que, especialmente con las líneas sísmicas, se puede elaborar cortes y definir la geometría de los **acuíferos a unas profundidades no alcanzadas en trabajos previos**. La metodología se adapta bien a acuíferos que corresponden a una tipología abundante en todo el Prebético Externo e Interno de la provincia de Alicante y otras regiones. Esta tipología consiste en acuíferos de cierta complejidad geológica, con objetivo profundo en el cretácico carbonatado, con una buena exposición y afloramiento de las estructuras y no demasiados datos de subsuelo. Por tanto, la metodología propuesta se considera aplicable a los numerosos acuíferos de todo el Prebético con esta tipología, que comprende la de todos los casos estudiados aquí, exceptuando el acuífero de Cabo Roig, de tipología diferente.

2. El segundo de los objetivos propuestos en este trabajo era la **construcción de modelo geológicos** y la consiguiente evaluación de las reservas hídricas profundas de acuíferos carbonáticos de Alicante. El resultado ha sido satisfactorio ya que se han modelado un total de 6 volúmenes geológicos de la región (figura 1), lo que ha supuesto un considerable avance en el conocimiento previo de los acuíferos estudiados. La mejora en el conocimiento consiste principalmente en la caracterización geométrica y de relaciones 3D de los elementos que definen las unidades geológicas que forman cada acuífero modelado.

3. A partir de los modelos 3D de cada acuífero se pueden obtener:

-Mapas de isobatas de cualquier Superficie de Referencia, y cortes geológicos en cualquier dirección del espacio.

-Superficies georeferenciadas de techo y muro de formaciones geológicas acuíferas exportables a modelos de flujo y transporte de aguas subterráneas.

-Volúmenes de roca saturada en función de la piezometría conocida, y reservas según datos petrofísicos disponibles.

-Curvas de explotación del acuífero desde cualquier sondeo que se considere.

-Implicaciones relativas a los modelos conceptuales de funcionamiento de los acuíferos estudiados y a las relaciones laterales con otros acuíferos de la región.

Los resultados específicos se resumen en las tablas individuales de cada uno de los acuíferos modelados. Véanse las tablas I-VI, más abajo, al final de este apartado.

En relación a la **calidad de los modelo 3D** obtenidos se puede concluir que es media-alta en la mayoría de los casos, en función de los datos disponibles. La calidad se valora en las tablas I-VI siguientes: a mayor exposición superficial de la estructura, número de sondeos y cantidad y facilidad de la interpretación sísmica, más calidad y menos incertidumbre del modelo. En las tablas también se indican posibles investigaciones adicionales para resolver algunas incertidumbres que permanecen en los modelos.

4. Los modelos 3D construidos son utilizables como herramientas de soporte de decisiones para emplazar nuevas captaciones de agua subterránea.

5. El último resultado destacable de este Proyecto es la caracterización del sistema poroso de los de acuíferos estudiados.

4.2 Tablas resumen de resultados

TABLA I. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO CARRASCAL-FERRER		
DESCRIPCIÓN	<p>Extensión de 85 km² de los que 30 son afloramientos permeables formados por los tramos calizos y dolomíticos del Aptiense al Senonense y las calizas del Oligoceno al Aquitaniense. Base impermeable del acuífero: margas y margocalizas del Neocomiense.</p> <p>Cotas medias comprendidas entre unos 200 y 1100 m.s.n.m. Recursos medios renovables de 14 hm³/año (DPA, 2007).</p>	
ELEMENTOS Y EXTENSIÓN MODELO 3D	<p>-Muro Mioceno Medio.</p> <p>-Muro Burdigaliense (techo del Acuífero).</p> <p>-Muro Aquitaniense (Acuífero).</p> <p>-Muro Oligoceno (Acuífero).</p> <p>-Muro Eoceno (Acuífero).</p> <p>-Muro Cretácico Superior -Paleoceno (Acuífero).</p> <p>-Muro Aptiense-Albiense (muro del Acuífero).</p> <p>-Nº fallas principales: 5.</p> <p>-Modelo de 119 km².</p>	
DATOS DE SUPERFICIE Y SUBSELO	Cartografía Magna	Contactos, buzamientos y fallas de las hojas 822 (Benisa) y 848 (Altea)
	Datos estructurales	147 medidas de dirección y buzamiento, fotointerpretación de ortofotografías y MDT
	Cortes geológicos	9 cortes geológicos de elaboración propia
	Sísmica	Líneas RV-70-V y RV-71V (1985)
	Gravimetría	NO
	SEV's	NO
	Sondeos	28 sondeos hidrogeológicos entre 120-550 m: Procedencia: DPA
OBSERV. DPA	-	
MODELOS PREVIOS	<p>No existen modelos hidrogeológicos (flujo 3D) previos. Evaluación de reservas de 106 hm³ según el informe "Determinación del volumen de reservas útiles en los embalses subterráneos de abastecimiento público, para la información continua a los municipios" (DPA, 2009).</p>	

TABLA I. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO CARRASCAL-FERRER

<p>COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL</p>	<p>Alta.</p>
<p>RESULTADOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS. IMPLICACIONES</p>	<p><u>Modelo geológico 3D</u>: caracterizado por una gran sinforma compleja limitada por los anticlinales de la Sierra de Carrascal, Ferrer, Bernia y Aixortá. Sobre la sinforma se desarrolla una cuenca oligocena-miocena. La profundidad máxima de la base del acuífero (Aptiense-Albiense) en el núcleo del sinclinal está a -1800 m s.n.m. (figura 8F). Debido a la escasez de datos de subsuelo y a la buena exposición de los afloramientos se ha efectuado un esfuerzo importante en el estudio estructural de campo y la fotointerpretación.</p> <p><u>Límites del acuífero</u>: límite norte en la Sierra de Carrascal desaturado al quedar el nivel piezométrico enfrentando al muro del acuífero. Posible transferencia de recursos con la Sierra de Cocoll (al NO). Límite occidental cerrado al flujo subterráneo por elevación del cierre sinclinal. Límite oriental en Sierra de Ferrer con posible transferencia de flujo subterráneo a Benissa y límite meridional en la Sierra de Serreta-Aixortá y en el Diapiro de Altea (figura 8F)</p> <p><u>Reservas totales</u>: las porosidades abiertas correspondientes a percentiles 25 y 75, respectivamente, son 0.35% y 1.9% (en 51 muestras de campo). Coeficientes de almacenamiento entre 10^{-6} y 10^{-5}. Reservas totales entre 224 y 1218 hm³ (figura 8G). Reservas dinámicas, por encima de la cota de la Fuente del Algar, entre 6 hm³ y 19,4 hm³. La porosidad y el S resultante es similar a DPA (2009), 1% y 7×10^{-6}, respectivamente.</p> <p><u>Calidad del modelo</u>: modelo satisfactorio que se ajusta bien a los datos disponibles. La geometría de la sinforma está bien determinada a partir de la interpretación de la sísmica y los buzamientos en superficie. Los sondeos disponibles son poco profundos a excepción del Pozo Picaserías y Coll de Rates. La cartografía de subsuelo de la región occidental presenta mayor incertidumbre debido a la ausencia de sondeos y pérdida de reflectividad de horizontes sísmicos de la línea RV-71-V.</p> <p><u>Implicaciones del modelo</u>: los materiales permeables saturados del acuífero de Carrascal-Ferrer se enfrentan a diferentes tramos de los acuíferos de Sierra de Cocoll y Depresión de Benissa. Gran volumen de reservas máximas, en principio explotables, del Acuífero de Carrascal por debajo de -80 m.s.n.m., del orden de 1.000 hm³, cota mínima de la curva de explotación desde sondeo Picaserías (figura 8G).</p>
<p>INFORME HIDROPROAL</p>	<p>Marín Lechado, C., Martos Rosillo, S., Fernández-Leyva, C., Pedrera Parias, A., García Lobón, J.L., Galindo Zaldívar, J. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE CARRASCAL-FERRER Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. 130 páginas (nº Informe SID por asignar).</p>

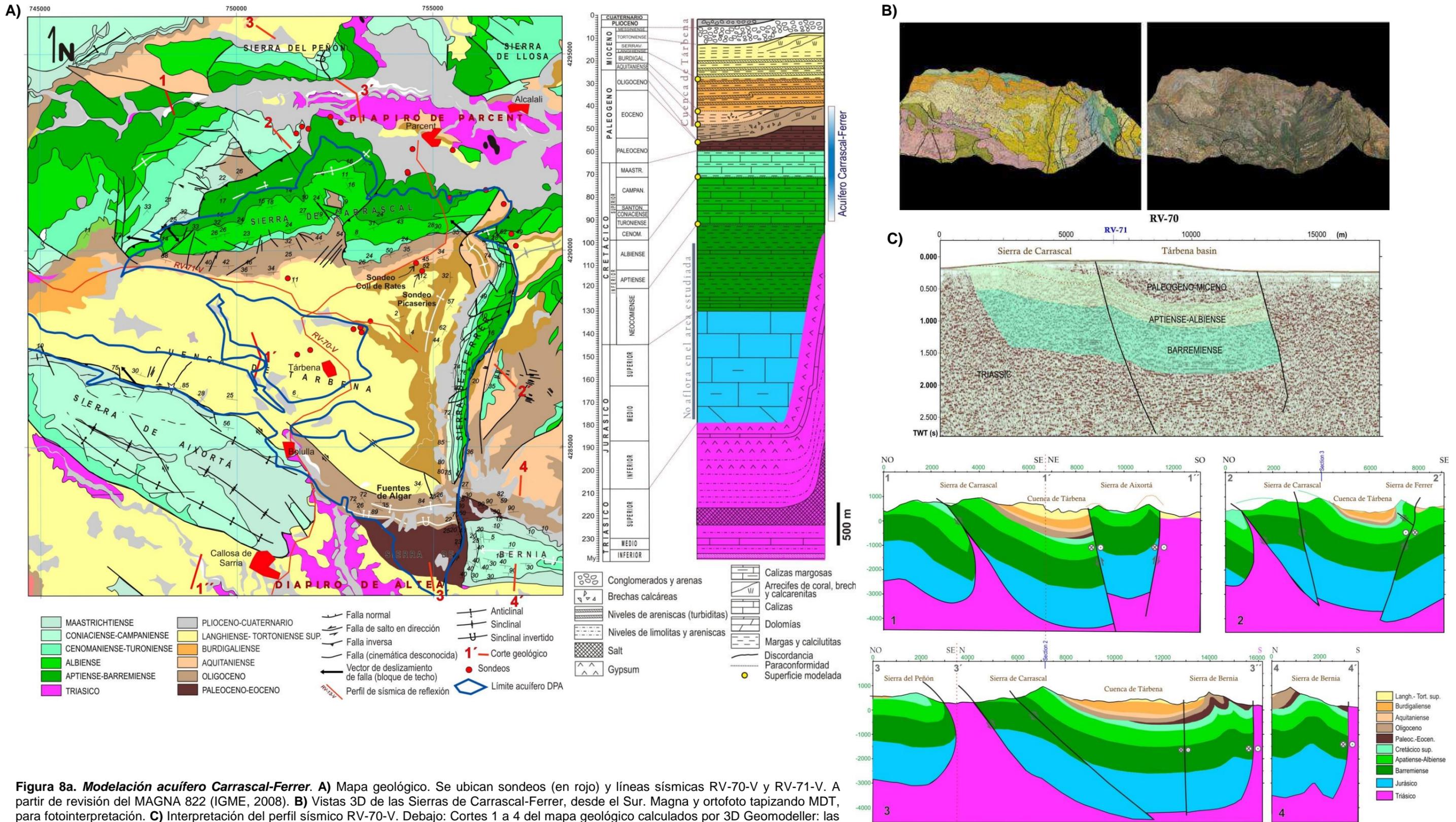


Figura 8a. Modelación acuífero Carrascal-Ferrer. A) Mapa geológico. Se ubican sondeos (en rojo) y líneas sísmicas RV-70-V y RV-71-V. A partir de revisión del MAGNA 822 (IGME, 2008). **B)** Vistas 3D de las Sierras de Carrascal-Ferrer, desde el Sur. Magna y ortofoto tapizando MDT, para fotointerpretación. **C)** Interpretación del perfil sísmico RV-70-V. Debajo: Cortes 1 a 4 del mapa geológico calculados por 3D Geomodeller: las unidades acuíferas comprenden del Aptiense al Aquitaniense.

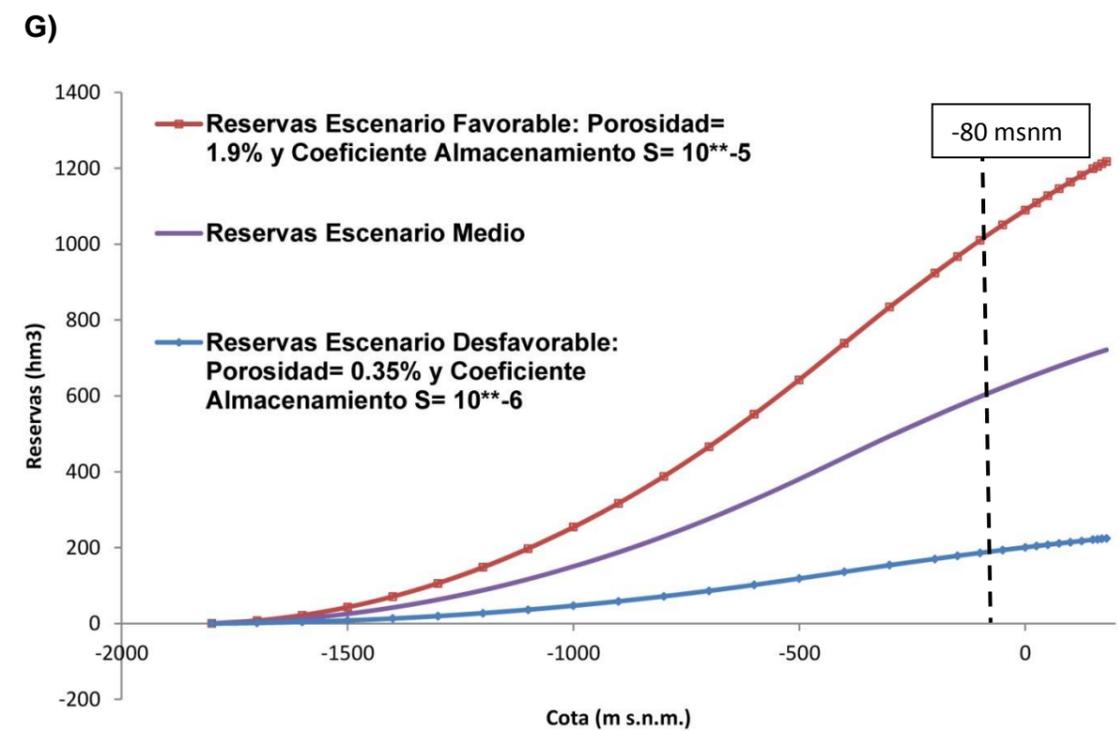
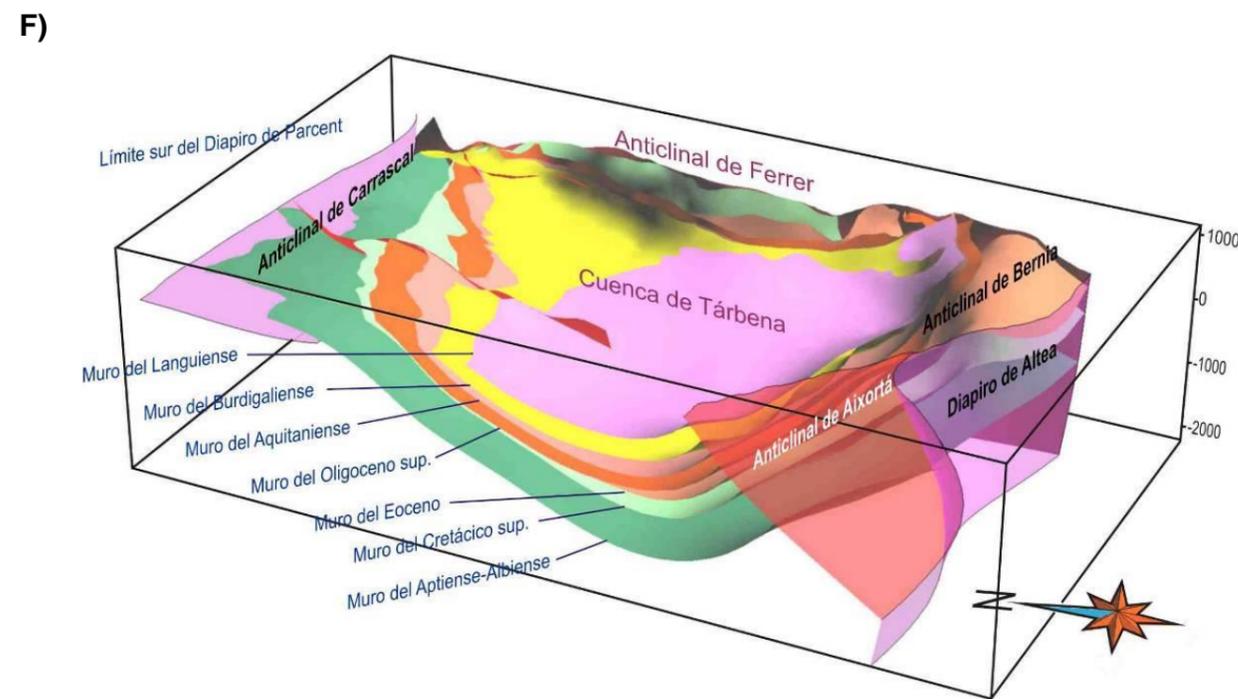
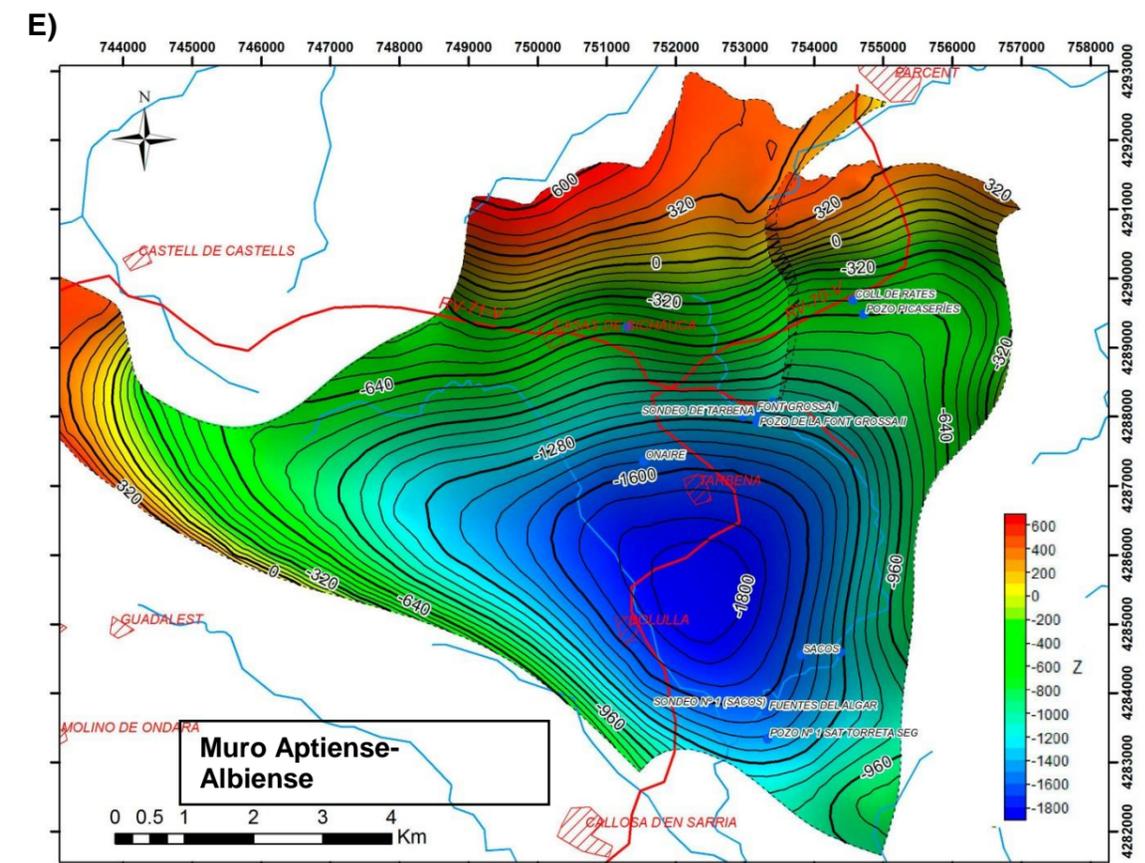
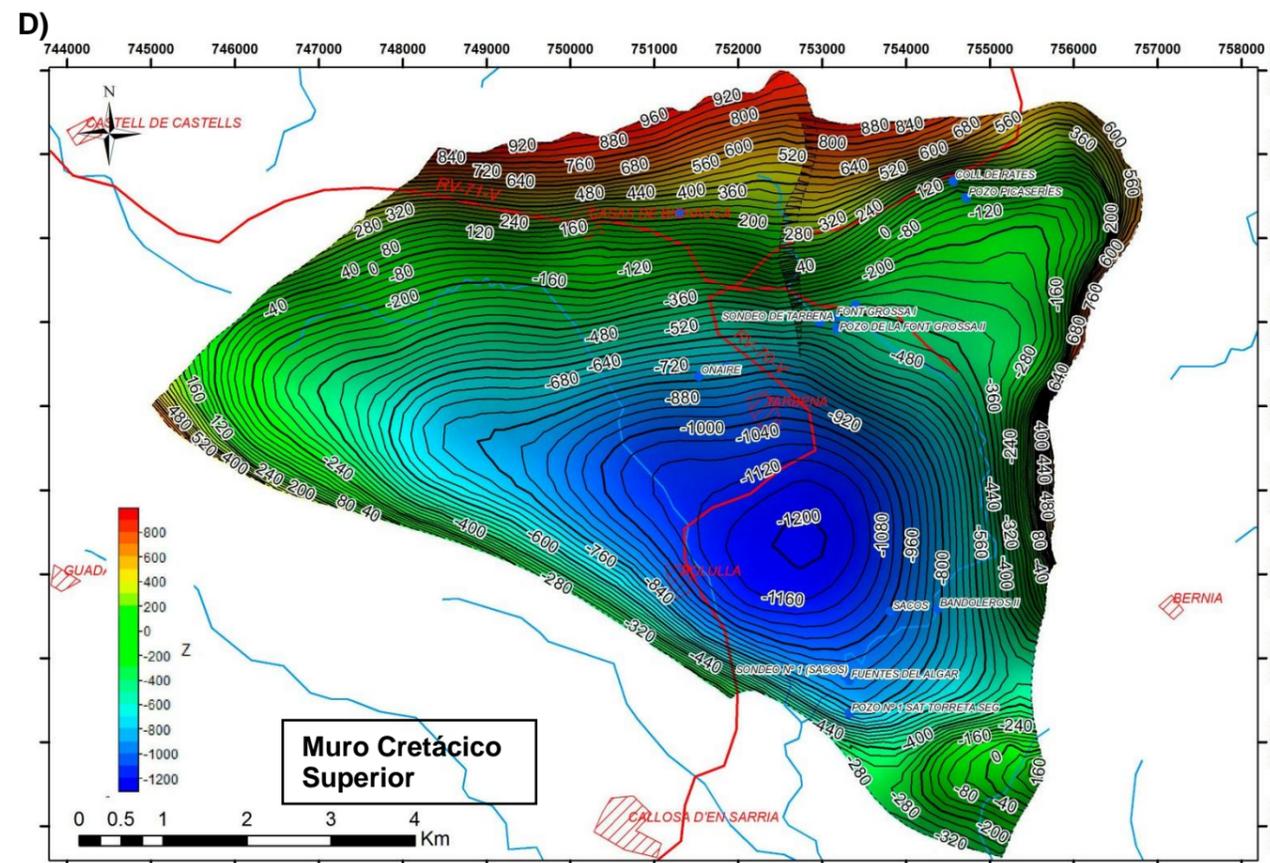


Figura 8b. Modelación acuífero Carrascal-Ferrer. D) y E) Mapas de isobatas del muro de la Unidad Cretácico Superior y Aptiense-Albiense (m.s.n.m.). F) Vista (Gocad) del Modelo geológico 3D del Acuífero de Carrascal-Ferrer. G) Curvas de reservas totales del acuífero de Carrascal-Ferrer para dos escenarios de porosidades abiertas (0.35%, en azul, y 1.9%, en rojo) y coeficientes de almacenamiento (10^{-6} y 10^{-5}), y escenario medio (violeta). -80 msnm, cota mínima de la curva de explotación desde sondeo Picaserries.

TABLA II. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO MEDIODÍA		
DESCRIPCIÓN	<p>Extensión de unos 43 km², constituyendo los afloramientos permeables casi el 100% de su superficie. Cotas medias comprendidas entre unos 100 m y 1000 m.s.n.m. Formado por calizas y calizas dolomíticas de edades Cenomaniense a Santoniense. Espesor medio del orden de 500 m. Base del acuífero: impermeable del techo del Cretácico Inferior.</p> <p>Recursos medios renovables de 14.4 hm³/año (DPA, 2010a).</p>	
ELEMENTOS Y EXTENSIÓN MODELO 3D	<p>-Muro Neógeno. -Muro Paleógeno (techo del Acuífero principal). -Muro Cretácico Superior (muro del Acuífero principal.) -Muro Cretácico Inferior. -Techo Triásico (diapiro "intrusivo").</p> <p>Nº fallas principales: 6. Modelo de 280 km².</p>	
DATOS DE SUPERFICIE Y SUBSELO	Cartografía Magna	Contactos, buzamientos (116 medidas) y fallas. Hojas 821 (Alcoy) y 822 (Benisa)
	Cortes geológicos	8 cortes geológicos (6 elaborados para este proyecto. 2 procedentes del MAGNA)
	Sísmica	Línea RV-71V (1984-85)
	Gravimetría	NO
	SEV's	NO
	Sondeos	7 sondeos hidrogeológicos: entre 200 y 600 m de profundidad. Procedencia DPA
OBSERV. DPA	-	
MODELOS PREVIOS	<p>Modelo geométrico de DPA-IGME, 1989. Reservas de 476 hm³ (para porosidad = 3%). Modelo de flujo (DPA-IGME, 2009) con estimación de reservas de 36.5 hm³, para geometría según el modelo de DPA-IGME, 1989, con porosidad estimada en el modelo del orden del 0,2%. Reservas totales de 34.6 hm³ según el informe "Determinación del volumen de reservas útiles en los embalses subterráneos de abastecimiento público, para la información continua a los municipios" (DPA, 2009)</p>	
COMPLEJIDAD ESTRATIGRAFÍA/ ESTRUCTURA	<p>Baja. El modelo 3D de Mediodía presenta una geometría sencilla de monoclinal-anticlinal de eje SO-NE, con vergencia al NO, flanco sureste de mayor buzamiento y ligera inmersión hacia el NE. Geometría simple, salvo en el entorno de algunas fallas y el extremo NE, de mayor imbricación estructural.</p>	

TABLA II. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO MEDIODÍA

<p>RESULTADOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS. IMPLICACIONES</p>	<p><u>Modelo geológico 3D:</u> la profundidad del muro del Cretácico Superior se incrementa hacia el noreste alcanzado los -500 m.s.n.m. (figura 9E). En la parte central, la profundidad del muro se sitúa entre los 100-200 m.s.n.m. y supone el límite entre las dos zonas del acuífero: la SO, más elevada, y NE, más baja. Existen tres depocentros coincidiendo con la Sierra de Alfaro al sur, la Sierra de la Carrasca al norte y la zona de máximo estrechamiento del acuífero en la parte central (la profundidad de todos ellos alcanza en torno a -150 m.s.n.m). En el sureste se sitúan los cabalgamientos de la zona de contacto con el acuífero Cocoll. Hacia el noroeste el Cretácico Superior se prolonga estructuralmente hacia la unidad Almudaina-Segaría.</p> <p><u>Límites del acuífero:</u> límites oeste y sur definidos por estructuras antiformales falladas de Cretácico Superior y Cretácico Inferior, con nivel piezométrico bajo la base impermeable del acuífero. Límite este configurado por una serie de fallas inversas y cabalgamientos que en algunos sectores implica las facies triásicas del Keuper. En el extremo norte, donde se concentran las descargas del acuífero, el límite es parcialmente abierto y permite la conexión hidráulica con el cuaternario del acuífero de Vergel.</p> <p><u>Cálculo de reservas:</u> reservas totales entre 33 y 273 hm³ para porosidades del 0.5 y 3%, y dos geometrías próximas, pero alternativas (modelos de 3D Geomodeller y gOcad), que suponen un volumen de roca saturada del orden de un 55-60% de la del modelo de 1989. Considerando la porosidad inferior, 0.5%, existe muy buena concordancia de valores entre las reservas totales y explotables del modelo 3D Geomodeller de este estudio, respecto a las del modelo de flujo DPA-IGME, 2009. Como se trata de metodologías independientes, se sugiere una porosidad abierta del Cretácico Superior en Mediodía próxima al 0.5% en promedio. En el estudio DPA-IGME, 2009, la porosidad manejada es del orden del 0,2%, derivada del modelo de flujo construido sobre la geometría obtenida en DPA-IGME, 1989. En conclusión, los datos de las reservas entre 30-40 hm³ y porosidades entre 0,2-0.5% parecen los más ajustados a las características geométricas y petrofísicas del acuífero Mediodía.</p> <p><u>Calidad del modelo:</u> Media. Sólo existen 4 sondeos dentro de los límites del acuífero y una línea sísmica. La ausencia de datos geofísicos no permite calibrar la calidad.</p> <p><u>Implicaciones del modelo:</u> espesores homogéneos estimados. Estructura geológica más laxa con cabalgamientos y fallas normales de bajo salto en contraposición con la estructura en “teclas de piano” previa (DPA-IGME, 1989), con menor profundidad de la estructura sobre todo según el límite E-SE. La consideración de fallas normales con menor buzamiento y salto que las inicialmente propuestas por el IGME (1989), permite una eventual conexión entre los niveles de Cretácico Superior fracturado, y por tanto, un acuífero continuo hacia la unidad Almudaina-Segaría al NO (figuras 9A, D).</p>
<p>INFORME HIDROPROAL</p>	<p>Rey Moral, C., García Lobón, J.L., Marín Lechado, C., Reguera García, M.I., Jiménez Sanz, A. 2013. GEOLÓGICO 3D DEL ACUIFERO DE MEDIODÍA Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. 61 páginas (Informe SID nº 64104). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp.</p>

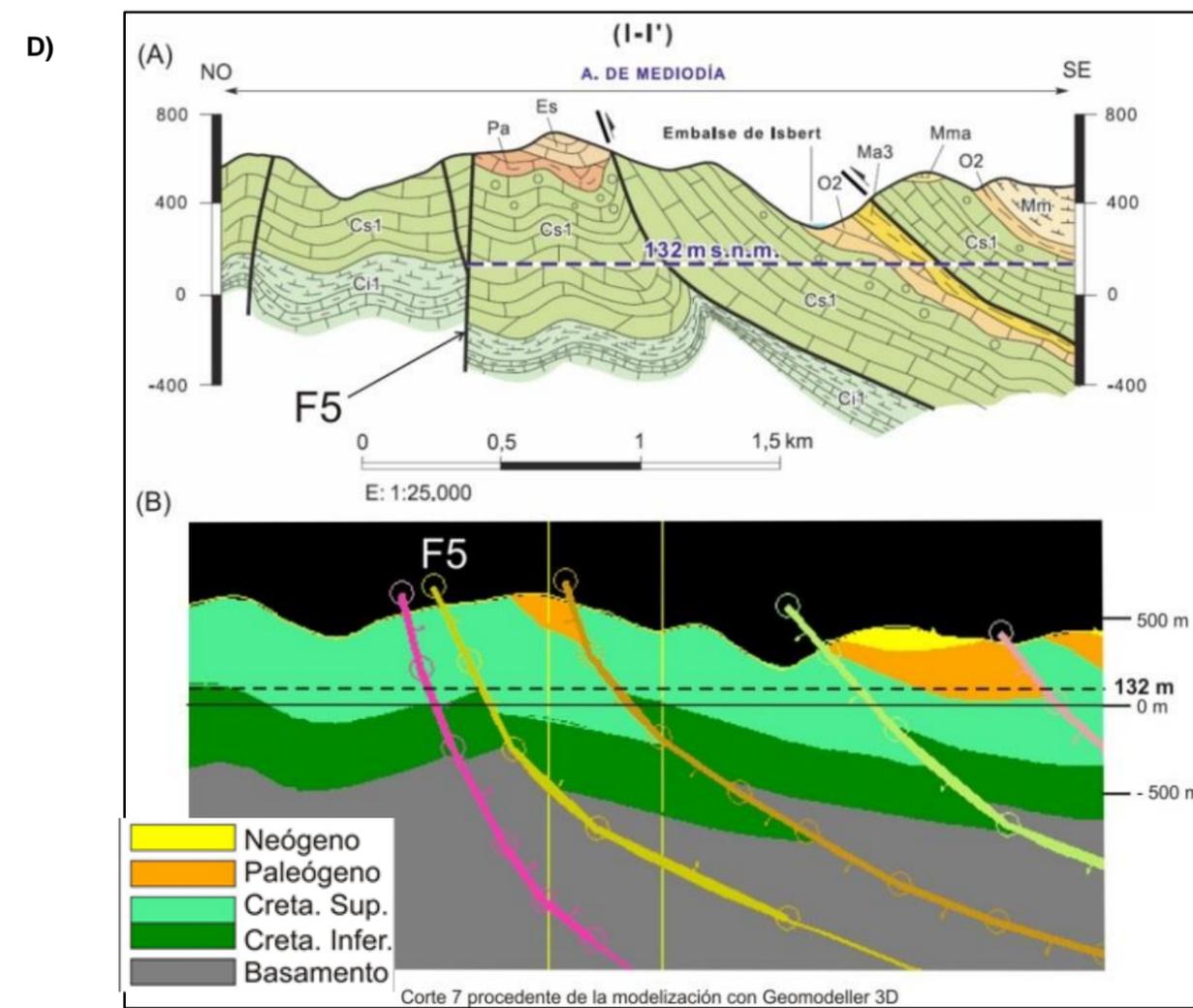
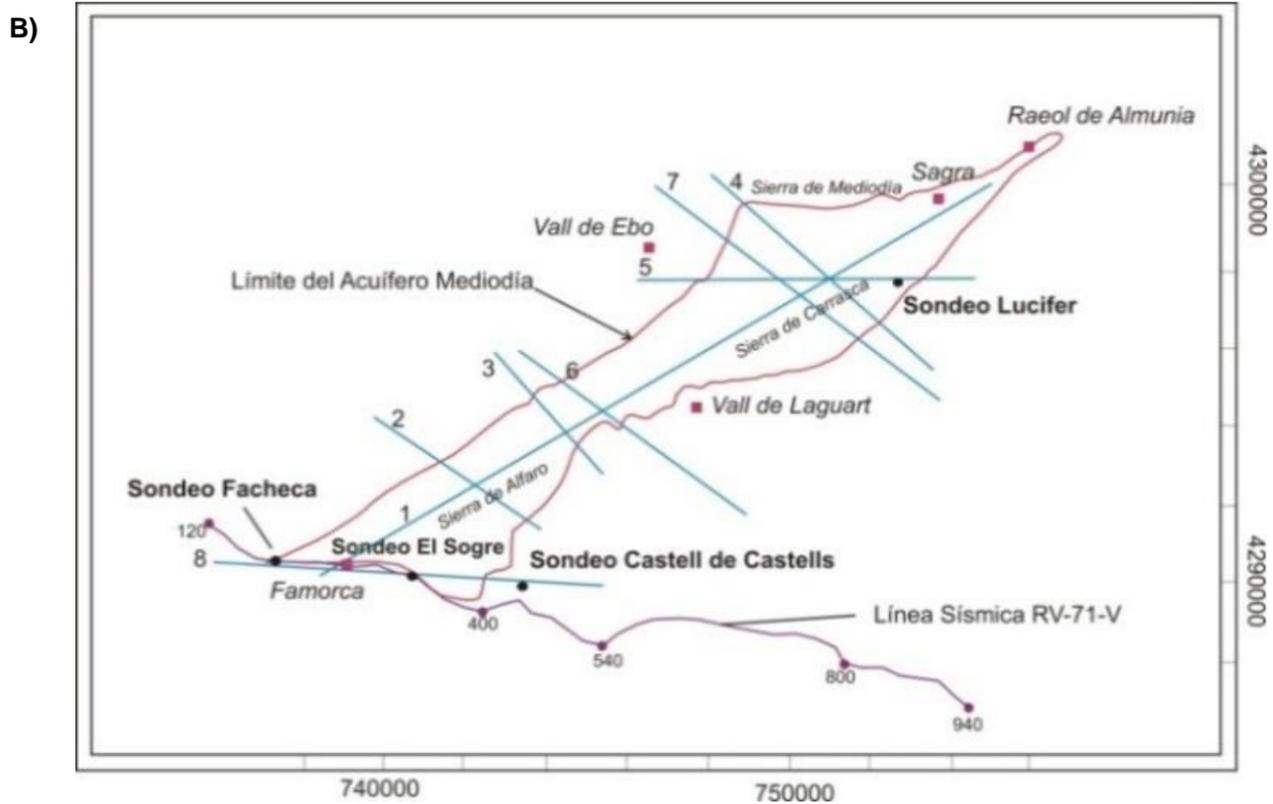
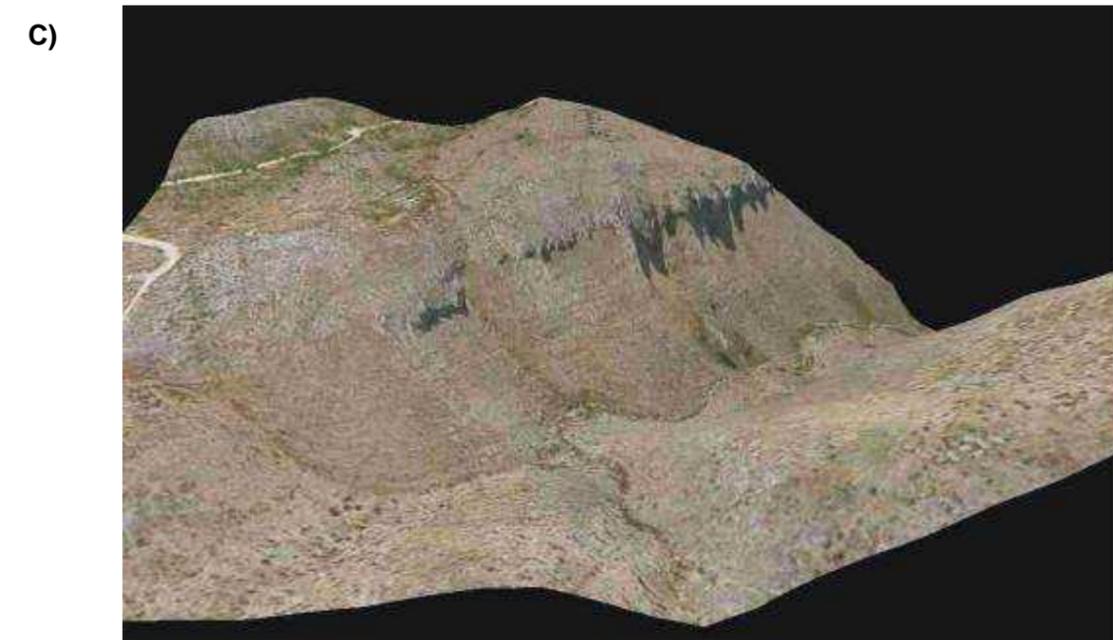
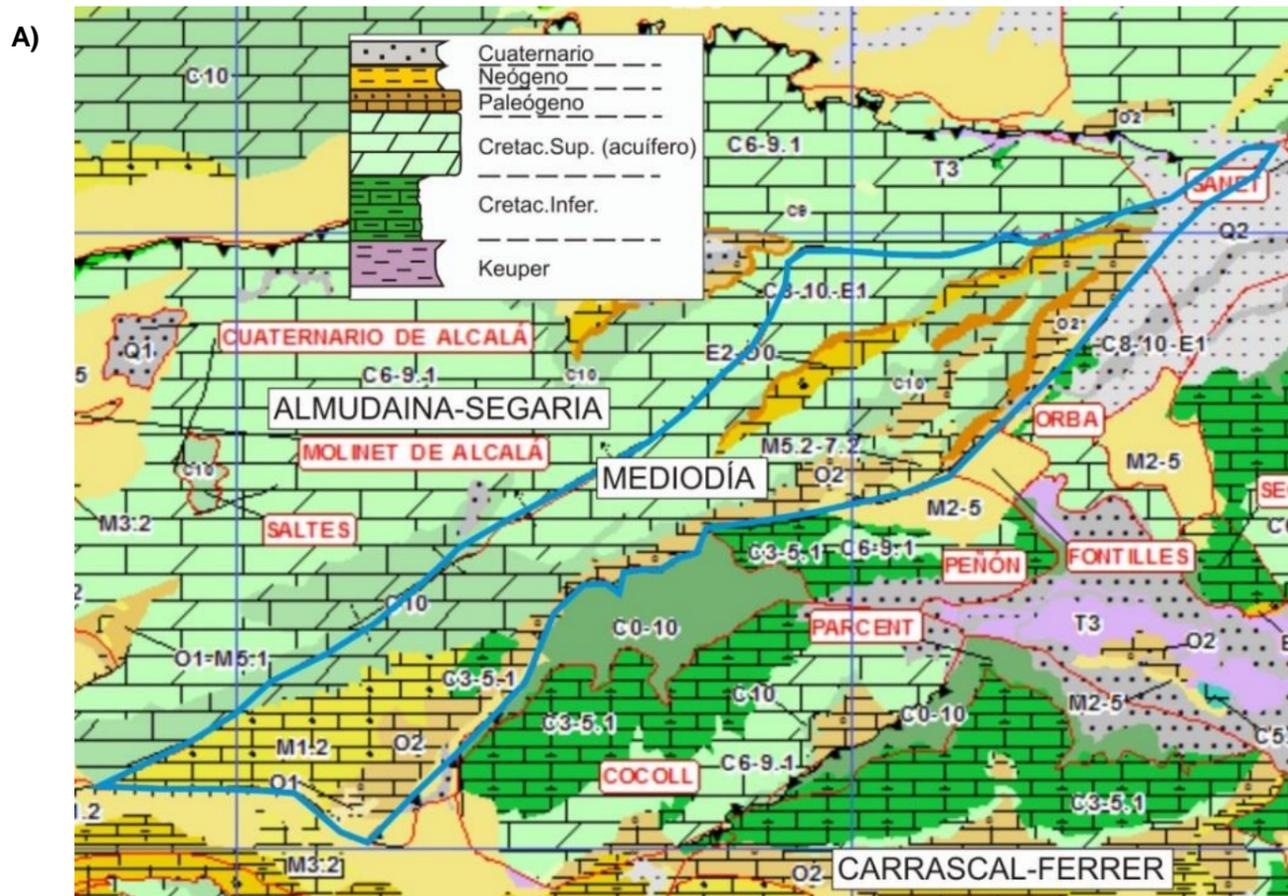


Figura 9a. Modelación 3D Acuífero de Mediodía. A) Contexto geológico del acuífero Mediodía (límite en azul; DPA, 2010). B) Esquema de situación de los cortes geológicos utilizados en la modelización 3D del acuífero, la situación de la línea sísmica RV-71V, sondeos mecánicos y algunas referencias geográficas. C) Vistas en 3D de ortofotografía mostrando la exposición de la estructura Mediodía. D) Corte nº 7 del acuífero; Arriba: según el Atlas hidrogeológico de Alicante (DPA, 2013); Abajo: Según el modelo 3D obtenido en este trabajo. En época de aguas altas, el menor salto de la falla F5 y su menor buzamiento podría permitir una conexión entre la zona saturada (bajo el nivel piezométrico de 132 m.s.n.m.) a ambos lados de la misma, y por tanto, la conexión de Mediodía con acuíferos al NO de él.

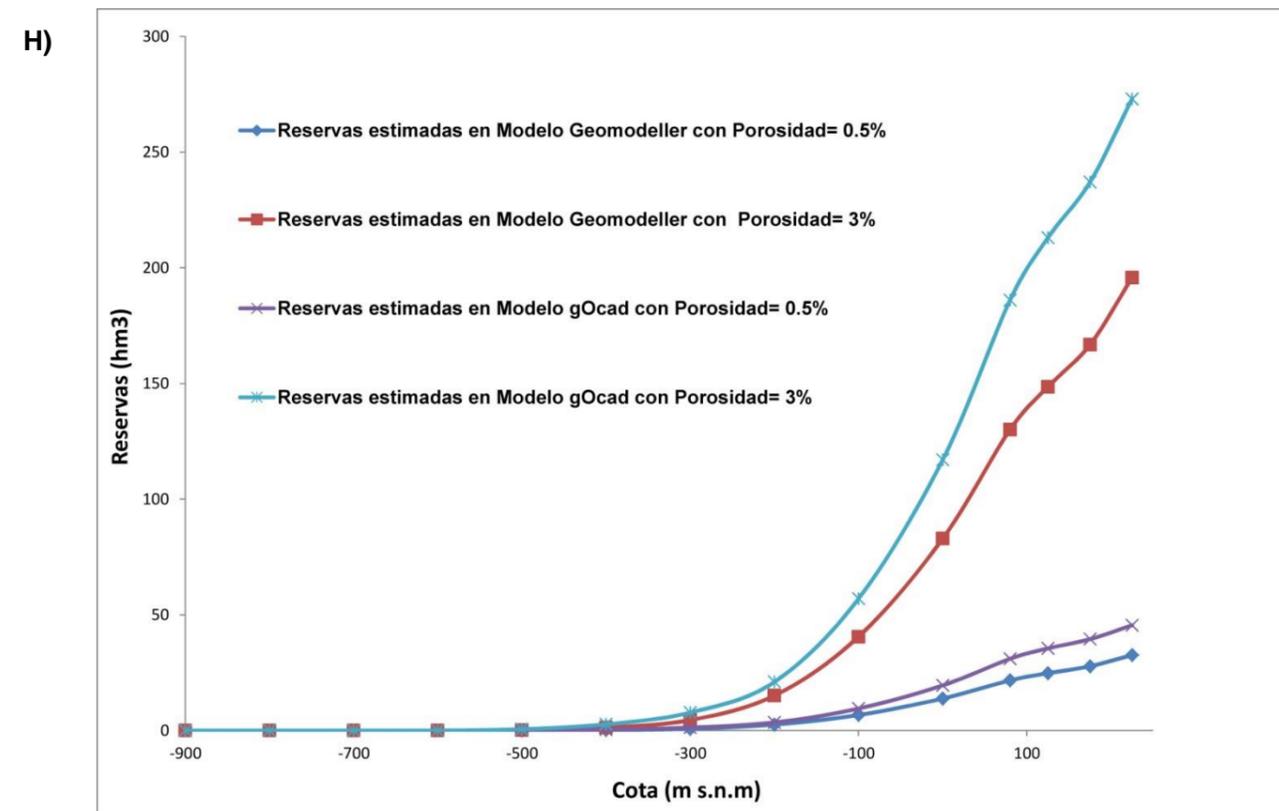
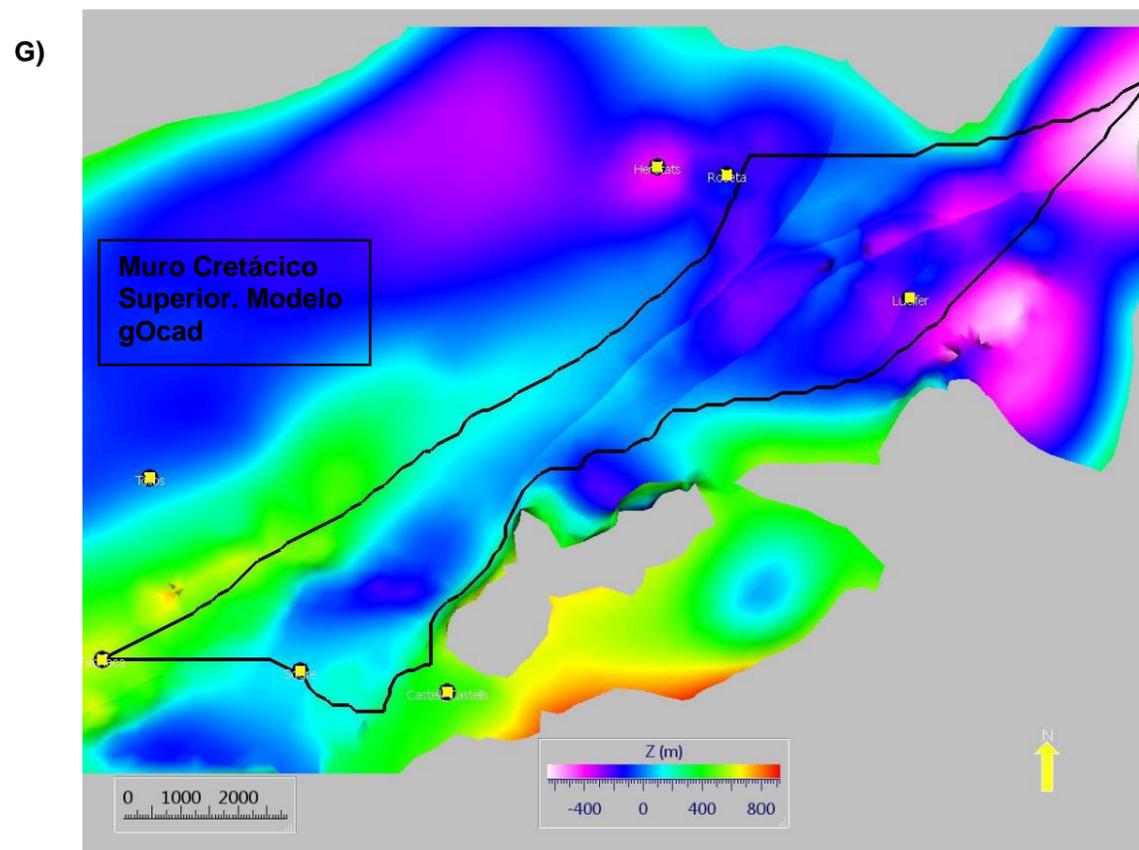
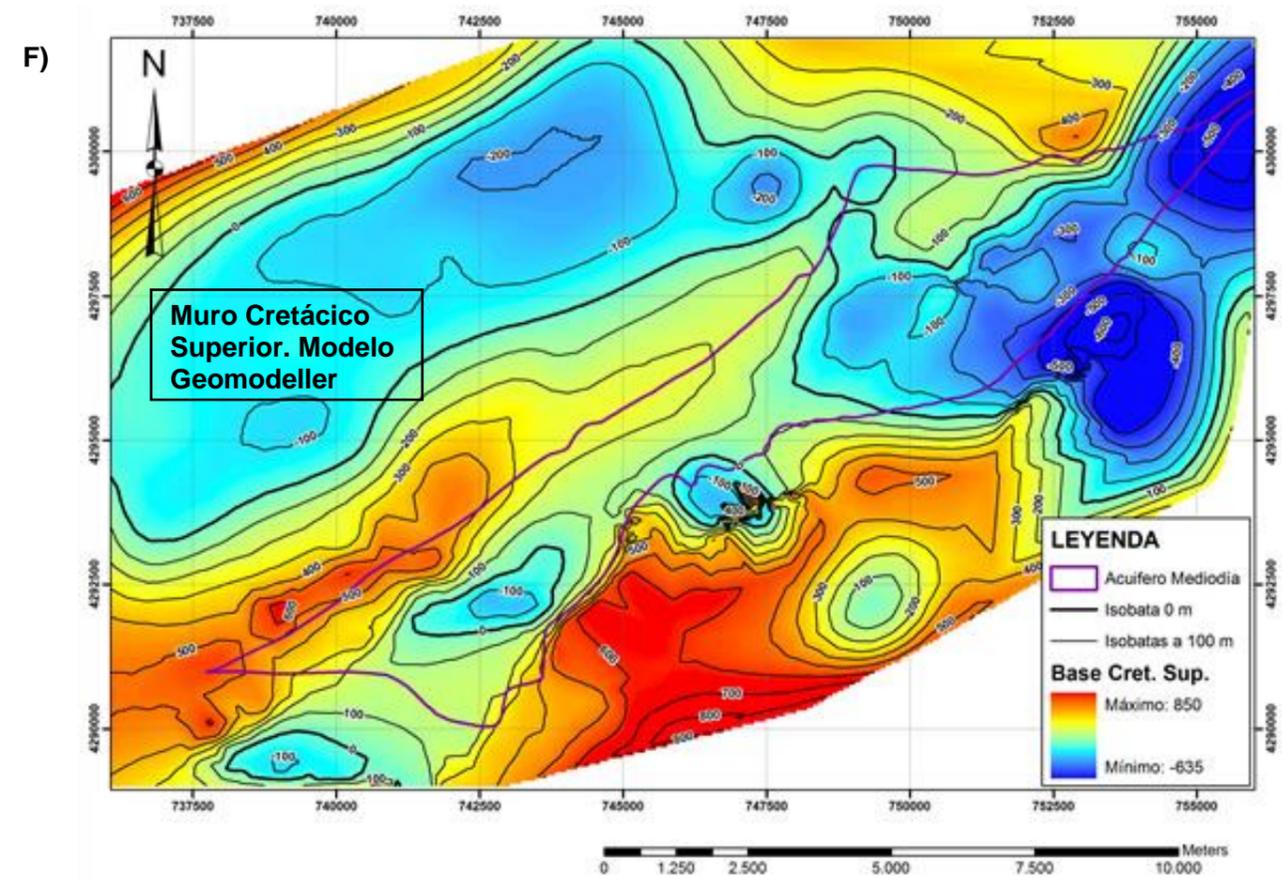
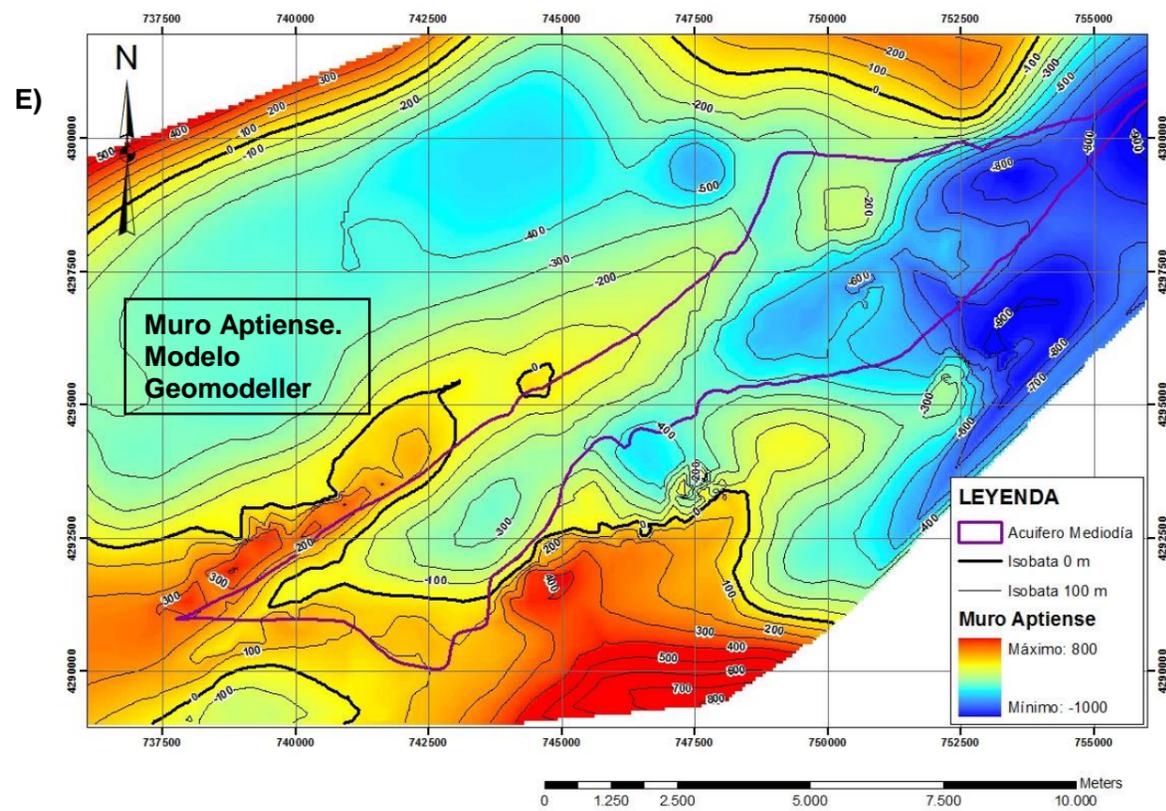
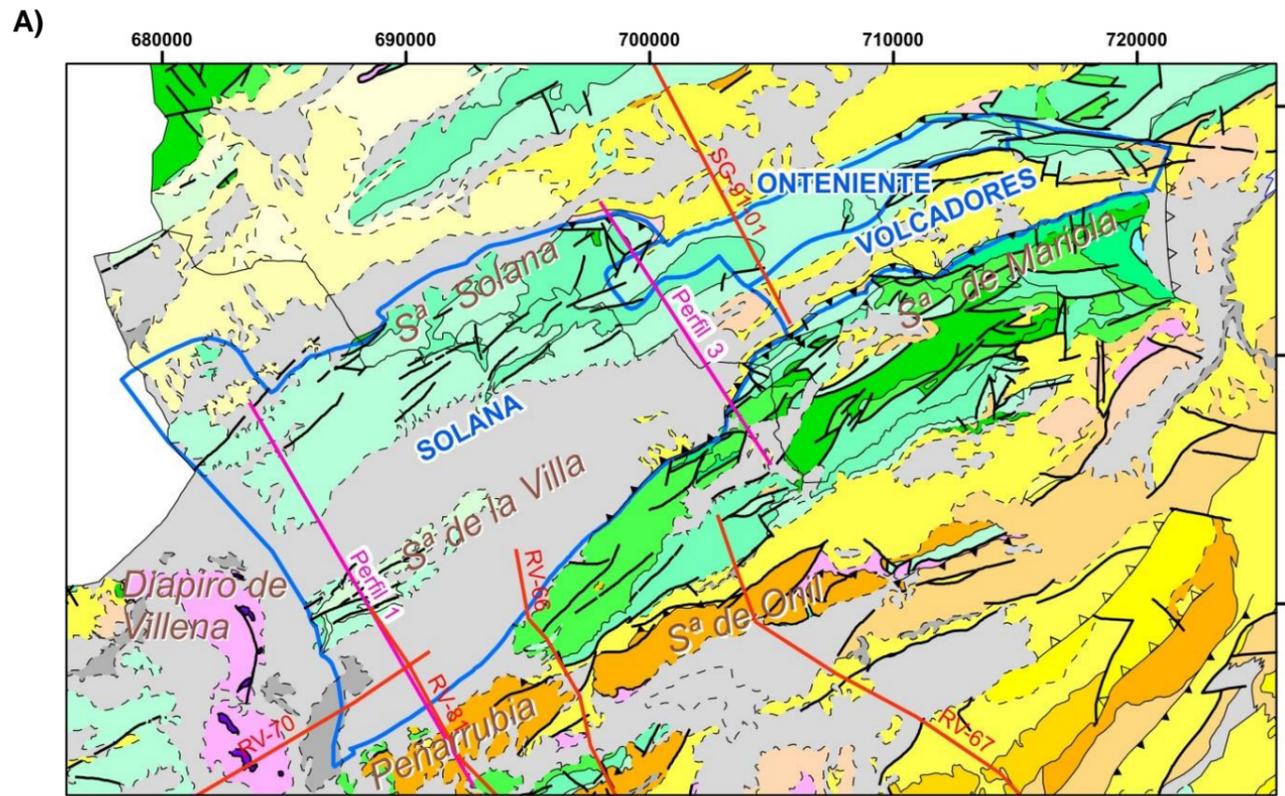


Figura 9b. Modelación 3D Acuífero de Mediodía. E) Isobatas del muro del Aptiense (m.s.n.m). Modelo geomodeller. F) Isobatas del muro del acuífero (m.s.n.m; muro del C. Superior; modelo de Geomodeller). G) Isobatas del muro del acuífero (m.s.n.m; muro del C. Superior; modelo de gOcad. Obsérvese que la superficie está adaptada a los sondeos, por tanto se genera mayor volumen). H) Curvas de reservas del Acuífero Mediodía obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero (utilizando dos porosidades distintas)

TABLA III. RESUMEN RESULTADOS. ACUIFEROS SOLANA-VOLCADORES-ONTENIENTE		
DESCRIPCIÓN	<p>Extensión de 360 km² de los que 130 son afloramientos permeables formados por la trilogía dolomítica del Cretácico Superior (C1, C2 y C3) y por calizas senonenses (C4). Base impermeable del acuífero: Neocomiense y facies Utrillas albienses. Cotas medias comprendidas entre 500 y 1000 m.s.n.m.</p> <p>Recursos medios renovables de 34 hm³/año, SOLANA; 1 hm³/año VOLCADORES-ONTENIENTE (DPA, 2010a).</p>	
ELEMENTOS MODELO 3D	<p>-Muros de Neógeno y Paleógeno. -Muro Senonense Superior (C4, Acuífero). -Muro Turoniense (C3, Acuífero). -Muro Cenomaniense superior (C2, Acuitardo). -Muro Cenomaniense inferior-medio (C1, Acuífero). -Muro Cretácico inferior, Muro Jurásico, Muro Triásico.</p> <p>16 fallas principales. Modelo de 360 km²</p>	
DATOS DE SUPERFICIE Y SUBSELO	Cartografía Magna\otras	Contactos, buzamientos y fallas de las hojas 819 (Caudete), 820 (Onteniente), 821 (Alcoy), 845(Yecla), 846 (Castalla) y Mapa hidrogeológico 1:25.000 de DPA.
	Datos estructurales	756 medidas de dirección y buzamiento, fotointerpretación de Ortofotografías y MDT de Google Earth.
	Cortes geológicos	23 cortes geológicos de elaboración propia.
	Sísmica	Líneas RV-66, RV-79, RV-81 (1984) y SG-91-01 (1991).
	Gravimetría	1600 estaciones.
	SEV/MT	68 SEV's; 22 sondeos MT.
	Sondeos	84 sondeos hidrogeológicos, con profundidades entre 102-875 m. Procedencia: DPA.
MODELOS PREVIOS	Modelos hidrogeológicos de IGME-DPA. (2003a y b), IGME-DPA (2006), DPA (2010b). Reservas totales de Solana: 1036 hm ³ (DPA 2010b).	
COMPLEJIDAD	Media.	

TABLA III. RESUMEN RESULTADOS. ACUIFEROS SOLANA-VOLCADORES-ONTENIENTE

<p>RESULTADOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS. IMPLICACIONES</p>	<p><u>Modelo geológico 3D:</u> modelo inicial de las formaciones geológicas cretácicas y neógenas obtenido a partir de la integración de datos geológicos y estructurales, sondeos mecánicos, SEVs, MT y sísmica de reflexión. Modelo inicial modificado a partir de la inversión gravimétrica 3D para investigar unidades geológicas profundas (Triásico, Jurásico y Cretácico inferior). Geometría 3D caracterizada por pliegues suaves vergentes al NO, afectados en el frente del flanco NO de los anticlinales de Sierra de Solana y Sierra de la Villa por fallas inversas que permiten aflorar a las rocas cretácicas. En las zonas de sinclinal se produce el depósito de las cuencas neógenas. El modelo 3D alcanza profundidades de unos -3200 m s.n.m (muro del Triás). Espesor medio del acuífero del orden de 625 m (C-1-C4).</p> <p><u>Límites del acuífero:</u> Debido a la continuidad de la estructura en los tres acuíferos, se realizó un modelo 3D del conjunto (figura 10A). Límite NO en el cabalgamiento frontal de la S. de Solana sobre el sinclinal Fontaneres-Onteniente. El límite SE corresponde al cabalgamiento de Peñarubia y S. de Mariola sobre el sinforme de Villena-Bocairente. El límite SO está definido por el diapiro del Vinalopó-Villena, y el límite NE, por un posible diapiro N-S entre Muro de Alcoy y Concentaina.</p> <p><u>Calculo de Reservas:</u> la media de la porosidad abierta en 41 muestras de campo del C. Superior es del 6%, mediana del 4%, con percentiles 25 y 75 de 2% y 7%, respectivamente. Las reservas totales de agua en el acuífero de Solana estarían comprendidas entre 3300 y 10400 hm³, para esas porosidades. Reservas dinámicas, por encima de la cota de drenaje de los principales puntos de descarga en régimen natural, entre 49 y 145 hm³.</p> <p><u>Calidad del modelo:</u> alta verosimilitud del modelo 3D por fuerte integración de numerosos datos geológicos y geofísicos. Geometría de los anticlinales bien determinada a partir de la interpretación de la estructura de superficie. Geometría profunda en los ejes de los sinclinales está interpretada a partir de datos geofísicos indirectos que pueden presentar una mayor incertidumbre.</p> <p><u>Implicaciones del modelo:</u> la estructura que define el sistema Solana- Volcadores-Onteniente tiene continuidad y no se han encontrado criterios geológicos que permitan compartimentar esta estructura en tres acuíferos con un comportamiento hidrogeológico independiente. No obstante, todo parece indicar que los principales tramos acuíferos, constituidos por calizas y dolomías del Turoniense-Senonense (C3-C4) podrían tener diferente potencial hidráulico que las dolomías del Cenomaniense (C1) debido al efecto semiconfinante de la formación Franco (C2, con un comportamiento acuitardo). Se entiende que, a la luz de los nuevos datos geológicos se debería establecer un nuevo modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Solana-Onteniente-Volcadores, diferenciando la información piezométrica según la formación captada por cada sondeo y teniendo en cuenta el efecto que tienen las zonas de fractura en la diferente cota piezométrica que existe entre los tres principales sectores de descarga del acuífero en régimen natural (manantiales de Villena, Pou Clar y salidas al río Agres). El ritmo de vaciado histórico, en los últimos 40 años, ha consumido unos 315 hm³ de las reservas del acuífero; lo que supone un descenso acumulado de la superficie piezométrica de 122 m, coherente según IGME-DPA (2006) con un coeficiente de almacenamiento elástico de 2×10^{-4}.</p>
<p>I. HIDRO PROAL</p>	<p>Marín Lechado, C., Martos Rosillo, S., García Lobón, J.L., Ruiz Constán, A., Ibarra Torre, P.I., Rey Moral, C, Fernández-Leyva, C. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE SOLANA-ONTENIENTE-VOLCADORES Y EVALUACIÓN DE LAS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. 116 páginas (nº Informe SID por asignar).</p>



Leyenda

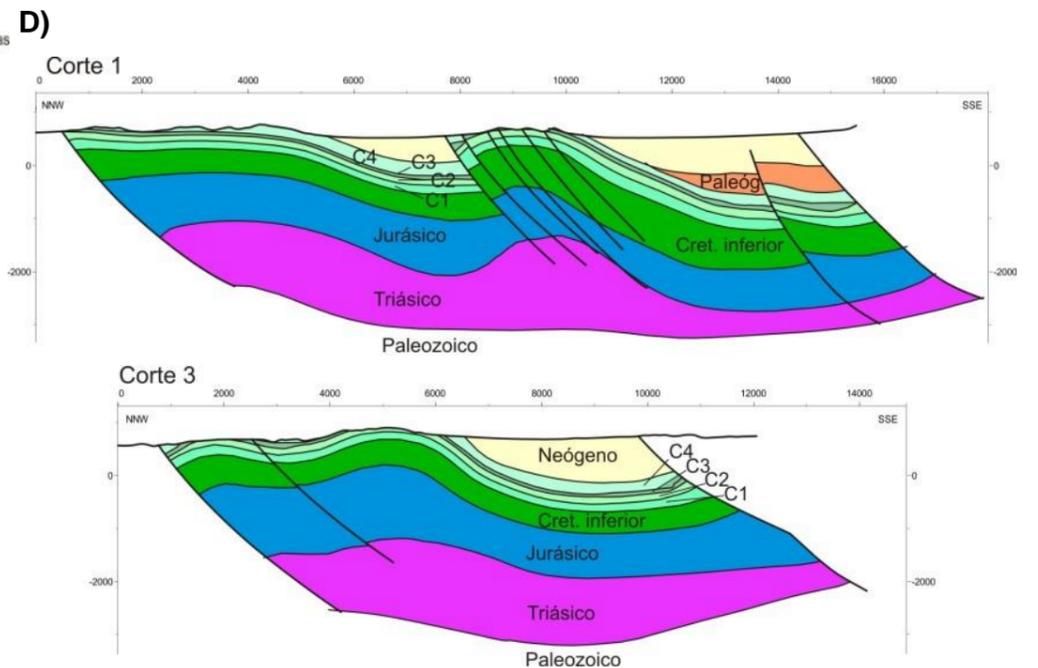
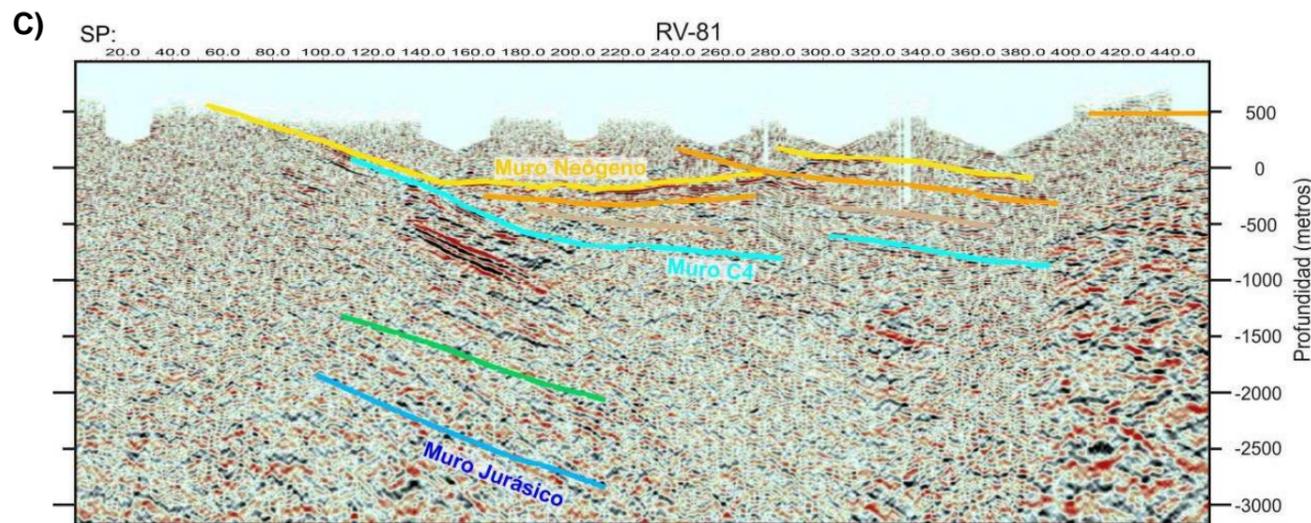
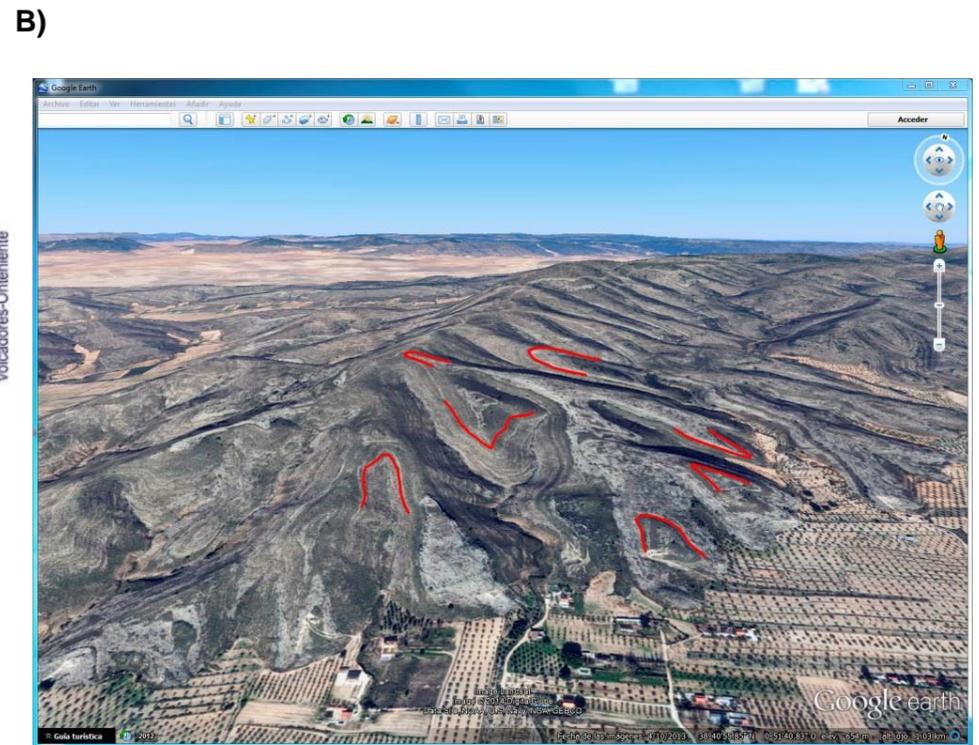
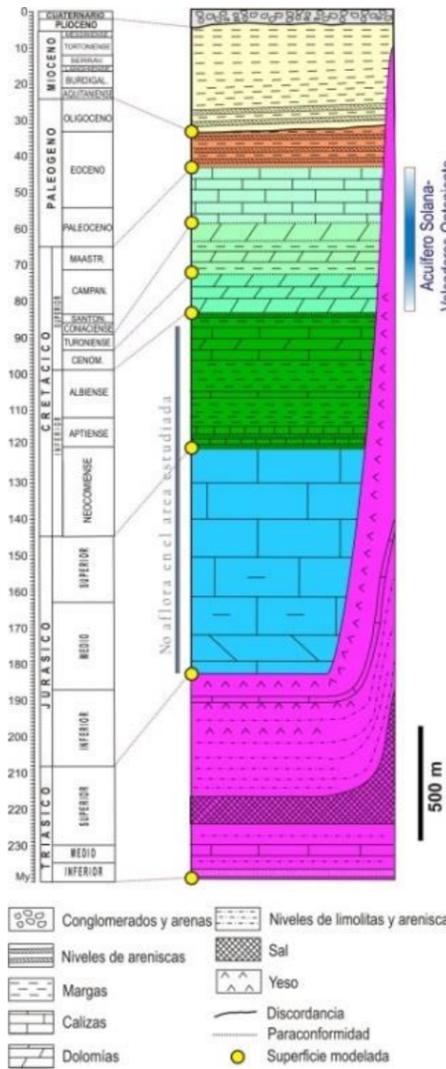
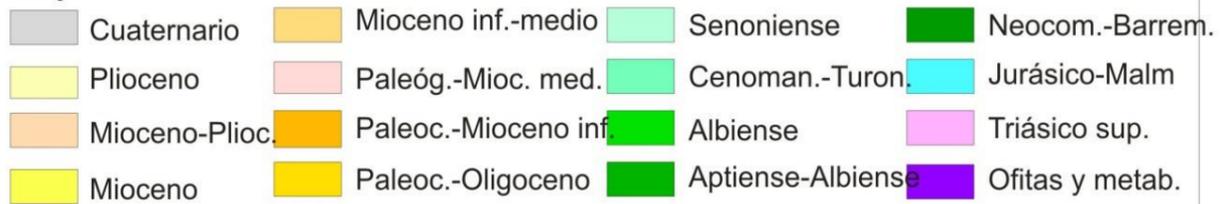


Figura 10a. Modelación Acuíferos de Solana y Volcadores-Onteniente. A) Mapa geológico del área estudiada, con indicación de Sierras principales. Límites de los acuíferos estudiados en azul. Se posicionan cortes 1 y 3 y líneas sísmicas. B) Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Solana. C) Perfil sísmico RV-81 (entre las Sierras de las Villas y la de Peñarubia) en formato digital seg-y convertido a profundidad. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos D) Cortes geológicos realizados al modelo 3D generado en el proyecto. Las superficies de referencia del Cretácico Superior y Neógeno se obtienen a partir de la integración de datos geológicos, sondeos mecánicos, SEVs, MT y sísmica de reflexión.

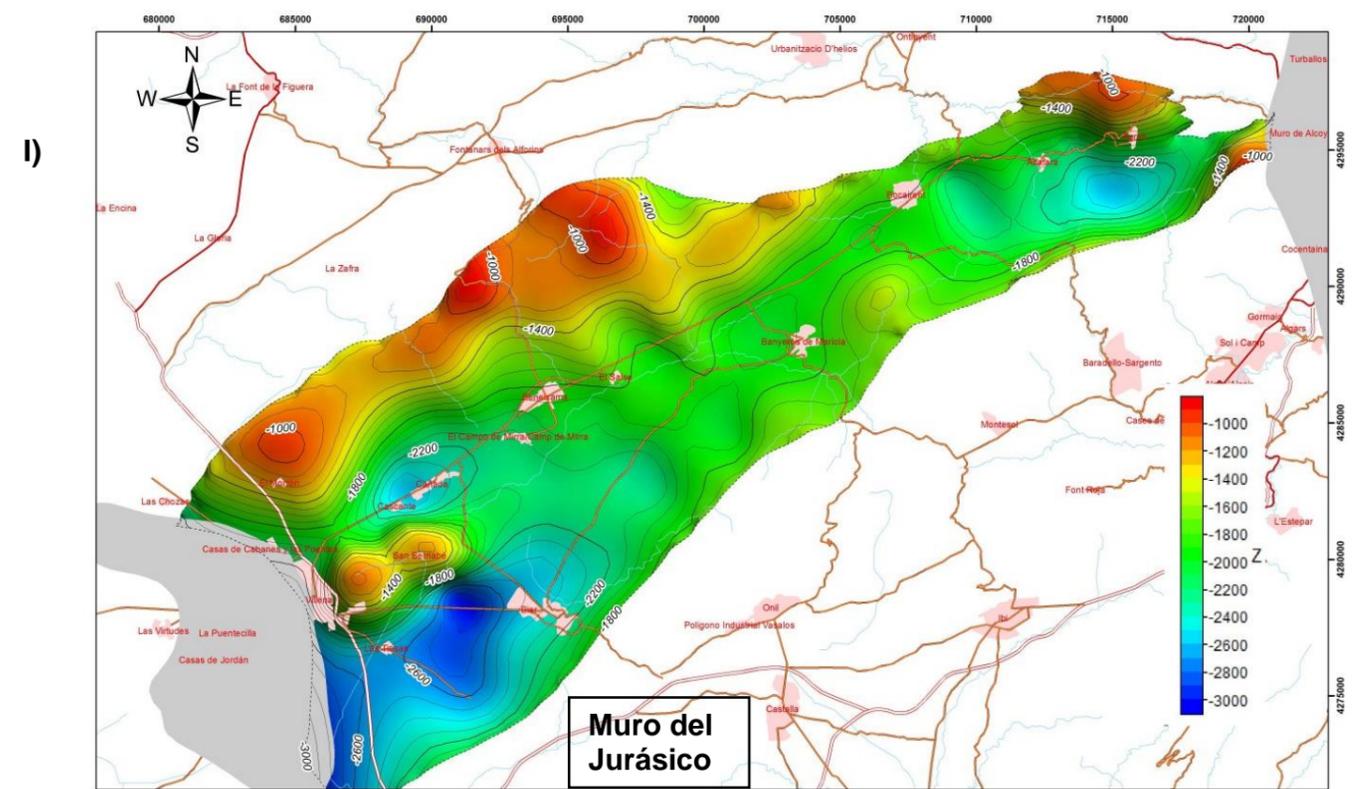
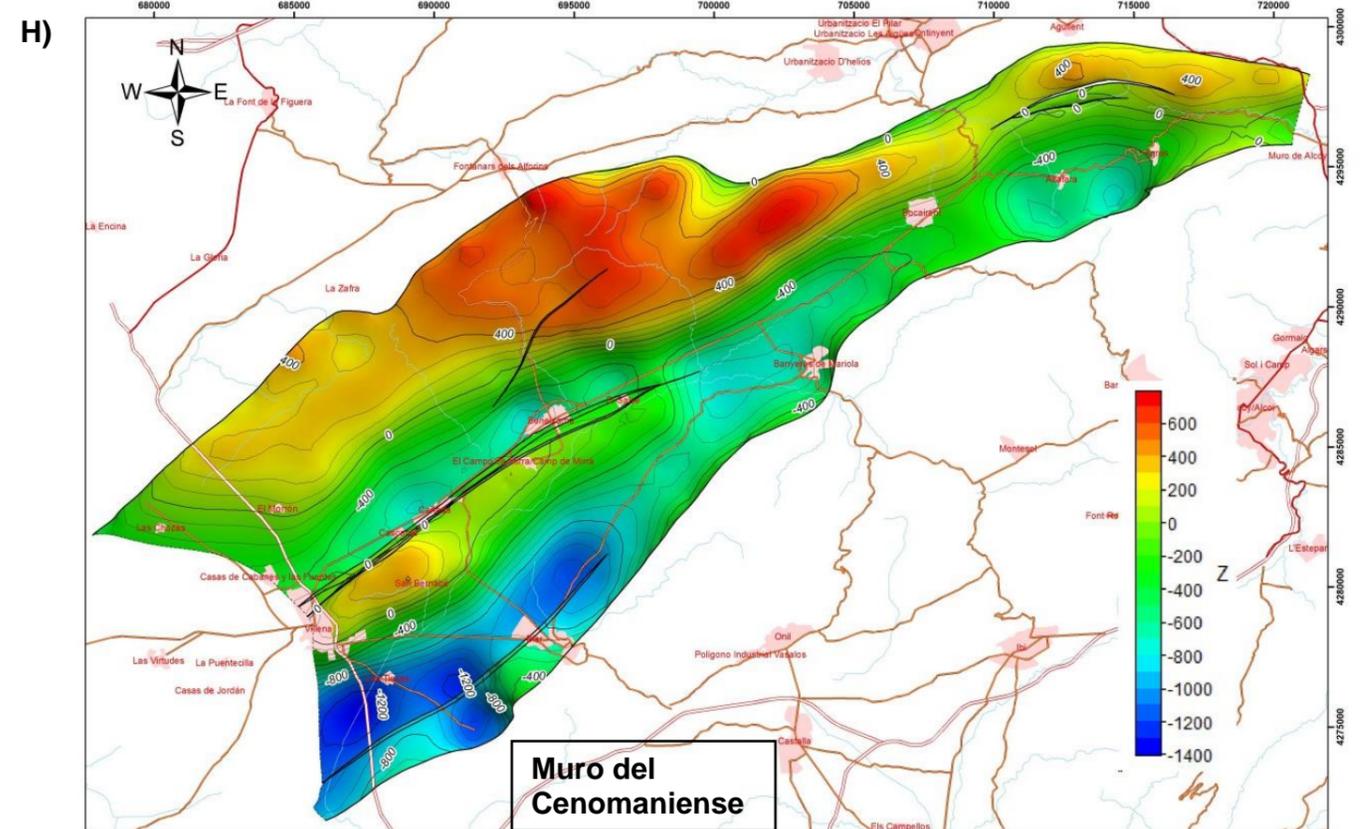
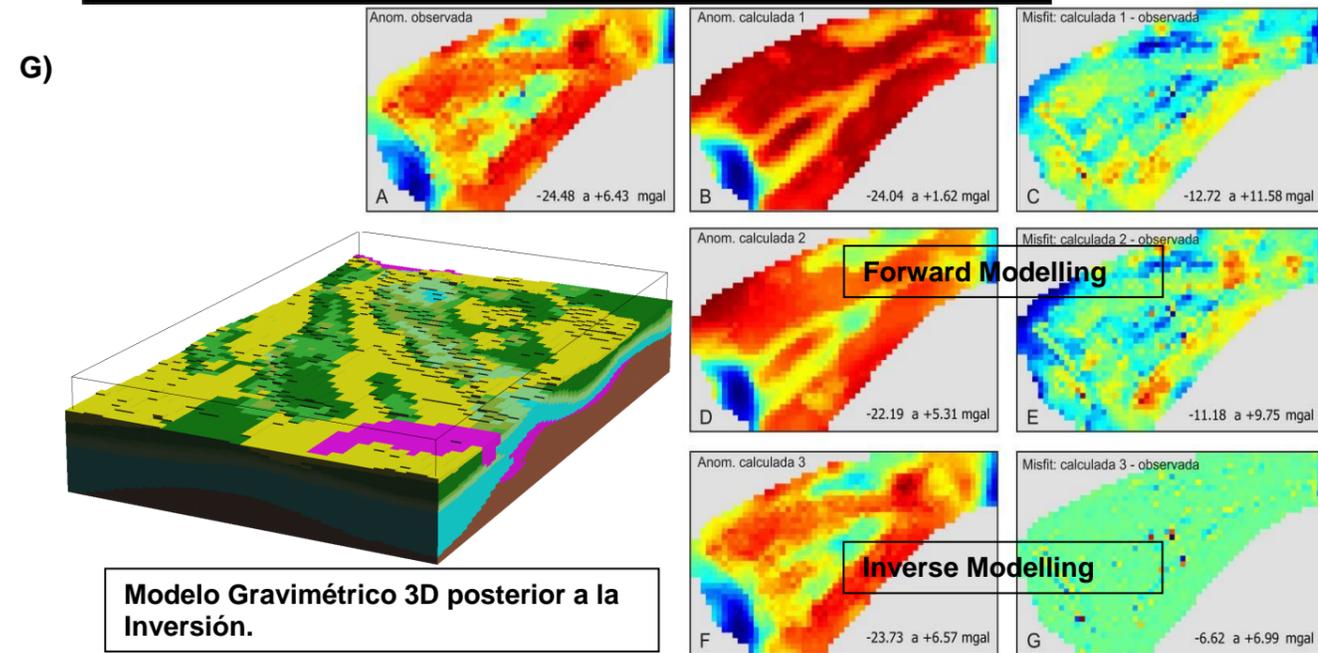
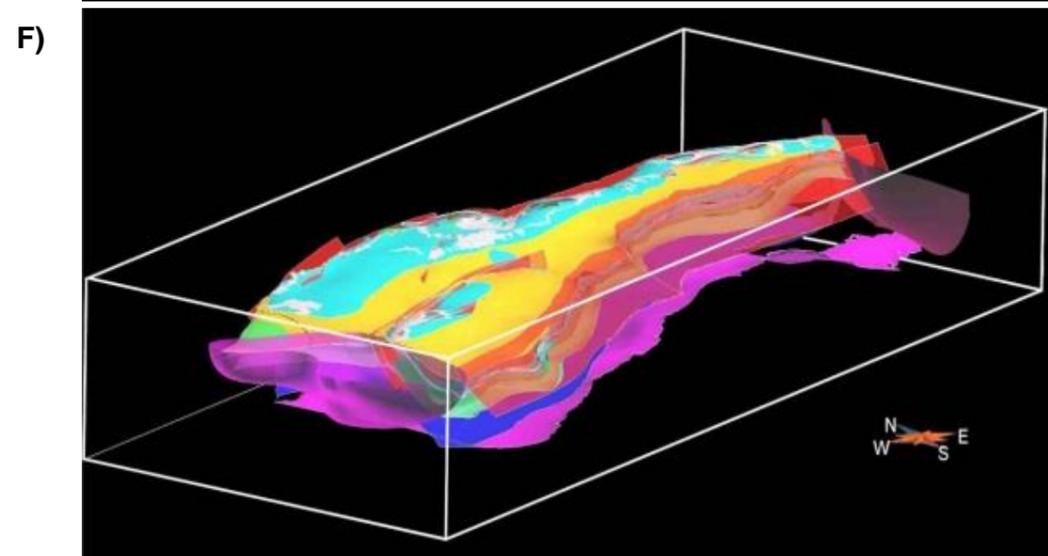


Figura 10b. Modelación Acuíferos de Solana y Volcadores-Onteniente. E) Vista 3D con el programa gOcad de los sondeos mecánicos (amarillo), cortes interpretados, SEVs con el modelo de resistividades de cada sondeo (naranja). F) Vistas del Modelo geológico 3D (gOcad) del Acuífero de Solana-Volcadores-Onteniente. G) Resultados de las anomalías de Bouguer calculadas y misfit con el Forward modelling gravimétrico 3D y la Inversión gravimétrica 3D que se usa para cartografiar las unidades geológicas profundas (Triásico, Jurásico y Cretácico Inferior. Modelo gravimétrico 3D Post-Inversión. H) Mapa de isobatas del muro del Cenomaniense C1 (m.s.n.m). I) Muro del Jurásico (m.s.n.m). En gris se representa la posición de los diapiros triásicos.

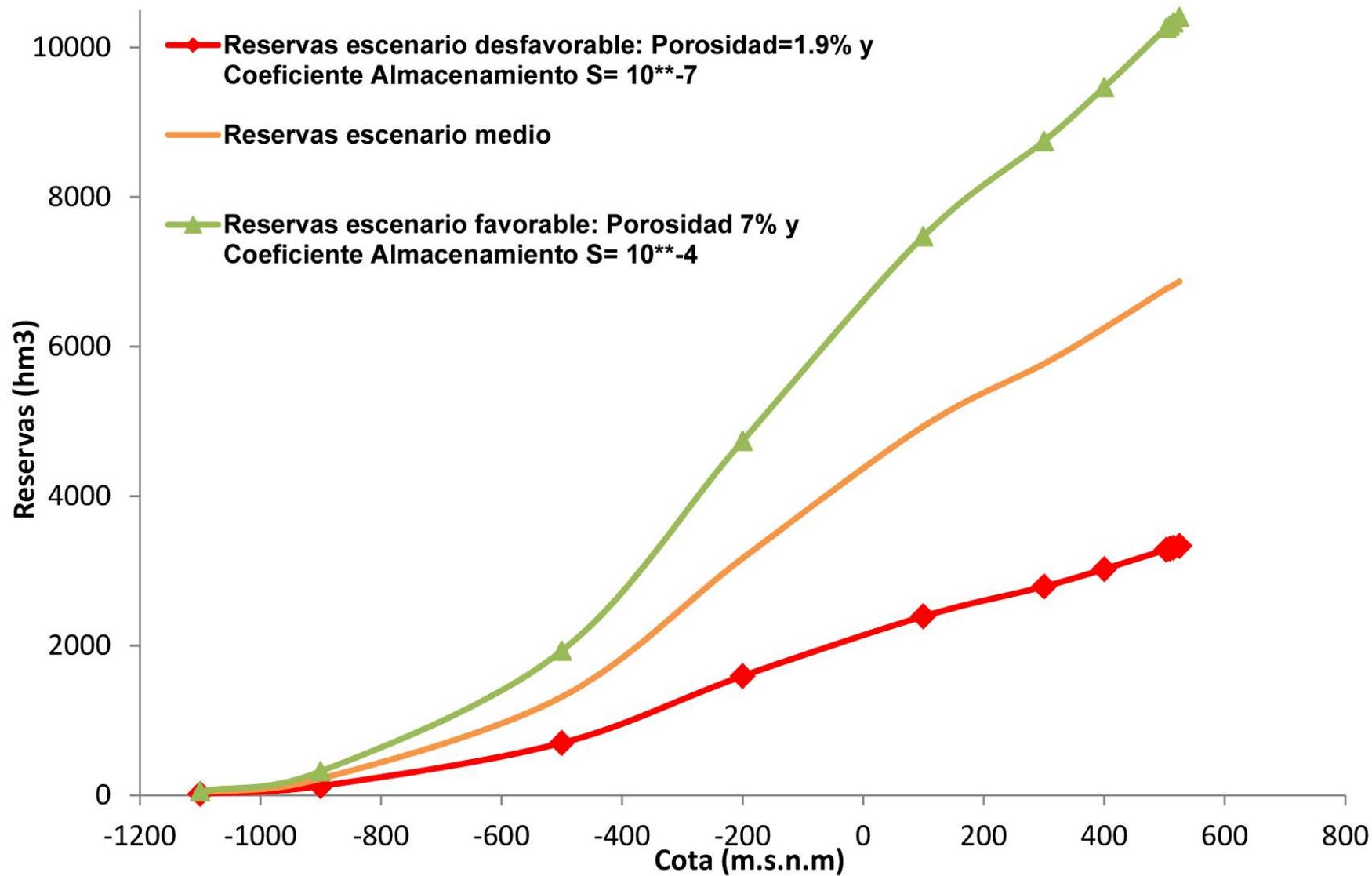


Figura 10c. Curvas de reservas totales del Acuífero de Solana. Obtenidas a partir del modelo 3D del mismo, para dos escenarios de porosidades abiertas (1.9% y 7%) y coeficientes de almacenamiento (10^{-7} y 10^{-4}), y escenario medio.

TABLA IV. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO ORCHETA-CABEZÓN DE ORO		
DESCRIPCIÓN	<p><u>Orcheta</u>: 39 km² (16 km² de afloramientos permeables). Acuífero: calizas turonienses y niveles calcáreos de base del Senoniense. Base impermeable: margas de base del Cenomaniense. Recursos medios renovables de 0.9 hm³/año (DPA. 2010a). Cotas medias comprendidas entre 660 m y 125 m.</p> <p><u>Cabezón de Oro</u>: 13.57 km² (10.27 km² de afloramientos permeables). Acuífero: más de 250 m de calizas grises jurásicas del Malm. Base impermeable: arcillas y limolitas del Triásico. Recursos medios renovables de 1.0 hm³/año (DPA, 2010a). Cotas medias comprendidas entre 1170 m y 510 m.</p>	
ELEMENTOS Y EXTENSIÓN MODELO 3D	<ul style="list-style-type: none"> -Muro Neógeno. -Muro Paleógeno. -Muro Cretácico Superior margoso (Senoniense. Techo del Acuífero). -Muro Cretácico Superior (muro Cenomaniense, por debajo del muro del acuífero) -Muro Cretácico Inferior -Muro Jurásico (Acuífero). -Muro Triásico. <p>Nº fallas principales: 3. Modelo de 212 km²</p>	
DATOS DE SUPERFICIE Y SUBSELO	Cartografía Magna	Contactos, buzamientos y fallas. Hoja 847 (Villajoyosa)
	Cortes geológicos	10 cortes geológicos (9 de elaboración propia y uno procedente del MAGNA)
	Sísmica	Líneas RV-87-01, RV-87-02, RV-87-03, RV-11V (años 1984-85) y BT-7 (año 1978)
	Gravimetría/ SEV's	NO
	Sondeos	9 sondeos hidrogeológicos entre 100-800 m de profundidad. Procedencia: DPA
OBSERVACIONES DPA	Interesa el espesor de Paleógeno en el borde costero.	
MODELO PREVIO	Reservas totales Orcheta sin Pequerina 6.2 hm ³ , Orcheta con Pequerina 10.1 hm ³ y Pequerina 3.9 hm ³ para una porosidad de 0.3% y Ss de 1.8E-6. Reservas totales para Cabezón de Oro 170 hm ³ , para una porosidad entre 0.5% y 2.25% (Determinación del volumen de reservas útiles en los embalses subterráneos de abastecimiento público, para la información continua a los municipios. DPA, 2009)	
COMPLEJIDAD	Alta, tanto en estratigrafía como en estructura: gran incertidumbre acerca de extensión, geometría y saltos de cabalgamientos y, sobre todo, de espesores sedimentarios.	

TABLA IV. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO ORCHETA-CABEZÓN DE ORO

<p>RESULTADOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS. IMPLICACIONES</p>	<p><u>Modelo geológico 3D:</u> ajustado a la geología de superficie (falta de datos de subsuelo). Estructura del acuífero en “silla de montar”, constituida por un monoclinal vergente al NO, culminante en los anticlinales de Orcheta (eje NE-SO de la silla sobre los anticlinales de Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta, figura 11E), con depocentros al N de las fallas de Macaroba y Orcheta, y elevaciones laterales al SO (anticlinal Cabezón de Oro) y NE (diapiro de Finestrat).</p> <p><u>Límites del acuífero:</u> los límites impermeables del acuífero de Orcheta están bien establecidos (DPA, 2010) al E-NE (afloramientos de Trías en facies Keuper de Finestrat) y en el límite occidental por el afloramiento del impermeable de base del Cenomaniense en el núcleo del anticlinal de Carcondo. Los límites estructurales N y S serían los cabalgamientos de Orcheta y Paleógeno, respectivamente, cuyos saltos aislarían el acuífero, lo que puede ser el caso del cabalgamiento al N, pero no del Paleógeno al S (figura 11D).</p> <p><u>Cálculo de reservas:</u> las reservas totales de Orcheta son 5.95 hm³ (por sectores: La Pequerina: 5.10 hm³, Embalse de Amadorio: 0.15 hm³ y Benienzo: 0.7 hm³). Las reservas estimadas de Cabezón de Oro son de 18.45 hm³. En este último caso, la diferencia con los resultados del informe DPA, 2009 se justifican por el nivel piezométrico usado en este informe (150 m, el más bajo debido al agotamiento del acuífero) y a que en el modelo 3D resultante el anticlinal jurásico tiene en su núcleo los materiales arcillosos del Keuper que suponen una barrera impermeable que resta volumen al acuífero jurásico.</p> <p><u>Calidad del modelo:</u> incertidumbres importantes, en particular por lo que respecta a espesores tanto del Cretácico Superior/Inferior como del Jurásico. Se han modelado dos escenarios alternativos, figuras 11 y 12, denominados de Cretácico Superior grueso y Cretácico Inferior grueso, según se interprete la línea sísmica BT7 y la columna del sondeo La Macaroba que son las claves del modelo 3D de Orcheta (figura 11C).</p> <p><u>Implicaciones del modelo:</u> se han propuesto dos modelos geológicos en función del espesor del paleógeno en la parte sureste y el espesor del Cretácico Superior y Cretácico Inferior en todo el modelo. Un primer modelo considera el Paleógeno y el Cretácico Inferior “delgados”. Según este modelo el Paleógeno en la zona litoral alcanzaría los -500 m s.n.m, mientras que el Cretácico Inferior tendría un espesor medio de 400 m. La otra alternativa es considerar un Paleógeno y Cretácico Inferior “gruesos”, lo que aumenta considerablemente sus espesores en el modelo (para ello se han reinterpretado la línea sísmica BT-7 y el sondeo Macaroba-1, figura 11C). Las diferencias entre estos dos modelos no sólo radican en el aumento de espesor (entre 300-500 m) Paleógeno y Cretácico Inferior, sino también en la geometría de la cuenca, con un promontorio relativo muy desarrollado en el modelo más grueso en estos sistemas centrado en las coordenadas x=739.000 e y=4.266.000 (figuras 12B). Estas diferencias son difíciles de contrastar debido a la falta de datos de subsuelo, pero tendrían implicaciones importantes en el caso de que los materiales paleógenos fueran explotados ya como acuífero, o sobre todo como reservorio de almacenamiento de sustancias de rechazo de diversos procesos industriales (salmueras u otras).</p> <p>No obstante, y teniendo en cuenta los dos modelos propuestos, los espesores y reservas del acuífero de Orcheta, en el Cretácico Carbonatado, y el techo del mismo, apenas si sufrirían modificaciones, por lo que las reservas hidráulicas resultantes no se verían modificadas..</p>
<p>I. HIDRO PROAL</p>	<p>García Lobón, J.L., Reguera García, M.I., Rey Moral, C., Pérez Ortiz, I., Martín León, J. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL SISTEMA ACUIFERO DE LOS ANTICLINALES DE ORCHETA (Hoja 847, Villajoyosa; Alicante). Fondo Documental del IGME. 65 páginas (nº Informe SID por asignar).</p>

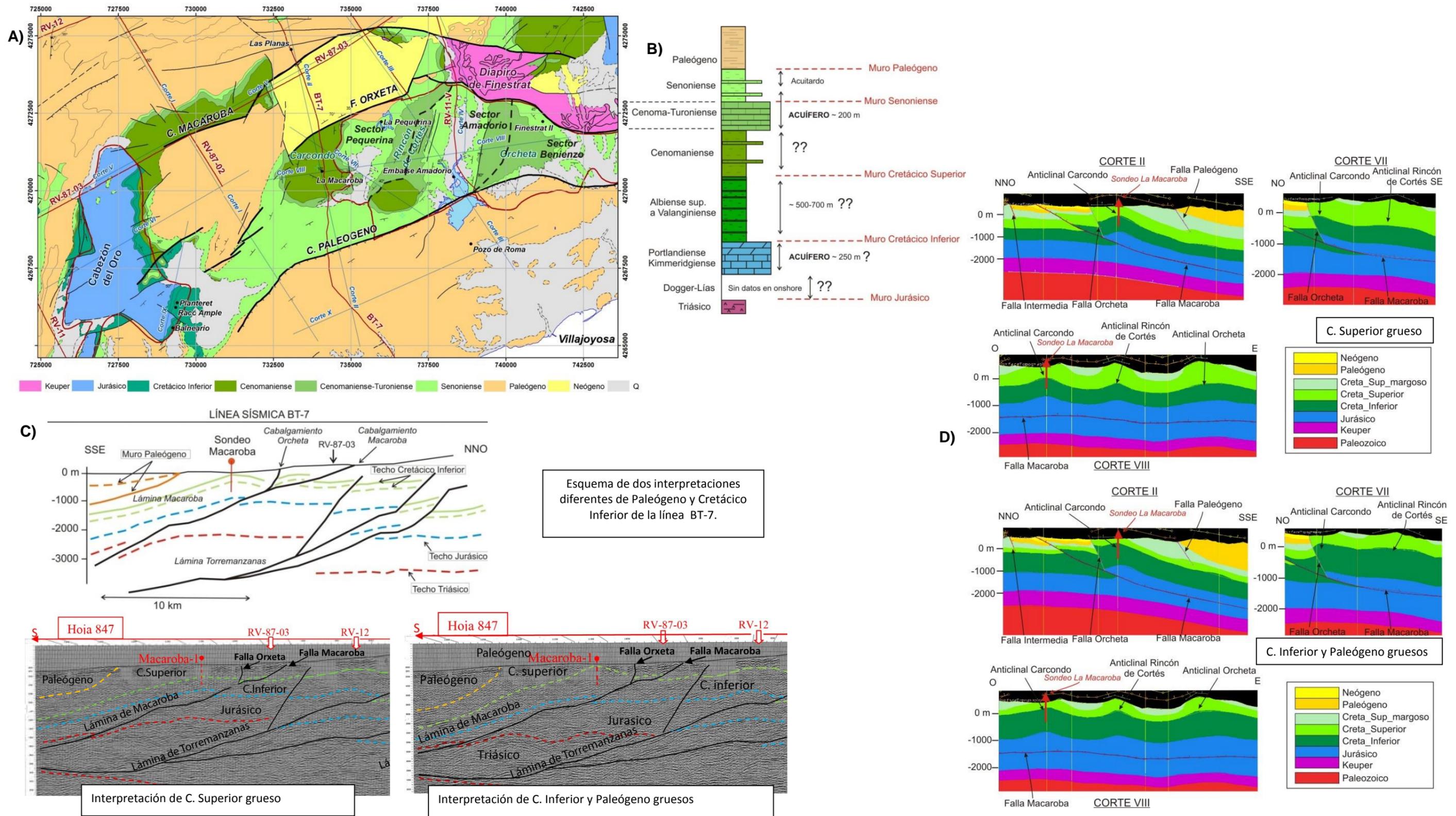


Figura 11a. Modelación de los acuíferos de los anticlinales de Orcheta y Cabezón de Oro. **A)** Contexto geológico del Acuífero de los Anticlinales de Orcheta (A. de Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta). Se indican líneas sísmicas, cortes y sondeos hidrogeológicos. **B)** Columna estratigráfica sintética del área del acuífero. Con línea discontinua se marcan los límites principales usados como superficies de referencia en la construcción del modelo 3D. Sin sondeos de control del Cretácico Inferior y del techo del Jurásico, los espesores sedimentarios presentan gran incertidumbre. **C)** Corte tectónico esquemático según la línea BT-7 y dos interpretaciones de la misma: a la izquierda, interpretación de Cretácico Inferior y Paleógeno más delgados, en la que el sondeo Macaroba cortaría el mismo espesor de C. Superior y C. Inferior (unos 420 m); a la derecha, interpretación de Cretácico Inferior y Paleógeno más gruesos, donde el sondeo Macaroba cortaría sólo unos 150 m de C. Superior. **D)** Visualización de tres de los 10 cortes geológicos (ver situación en A) utilizados como secciones para la construcción del modelo en 3D Geomodeller, en los dos casos de Cretácico Inferior y Paleógeno más delgados y más gruesos.

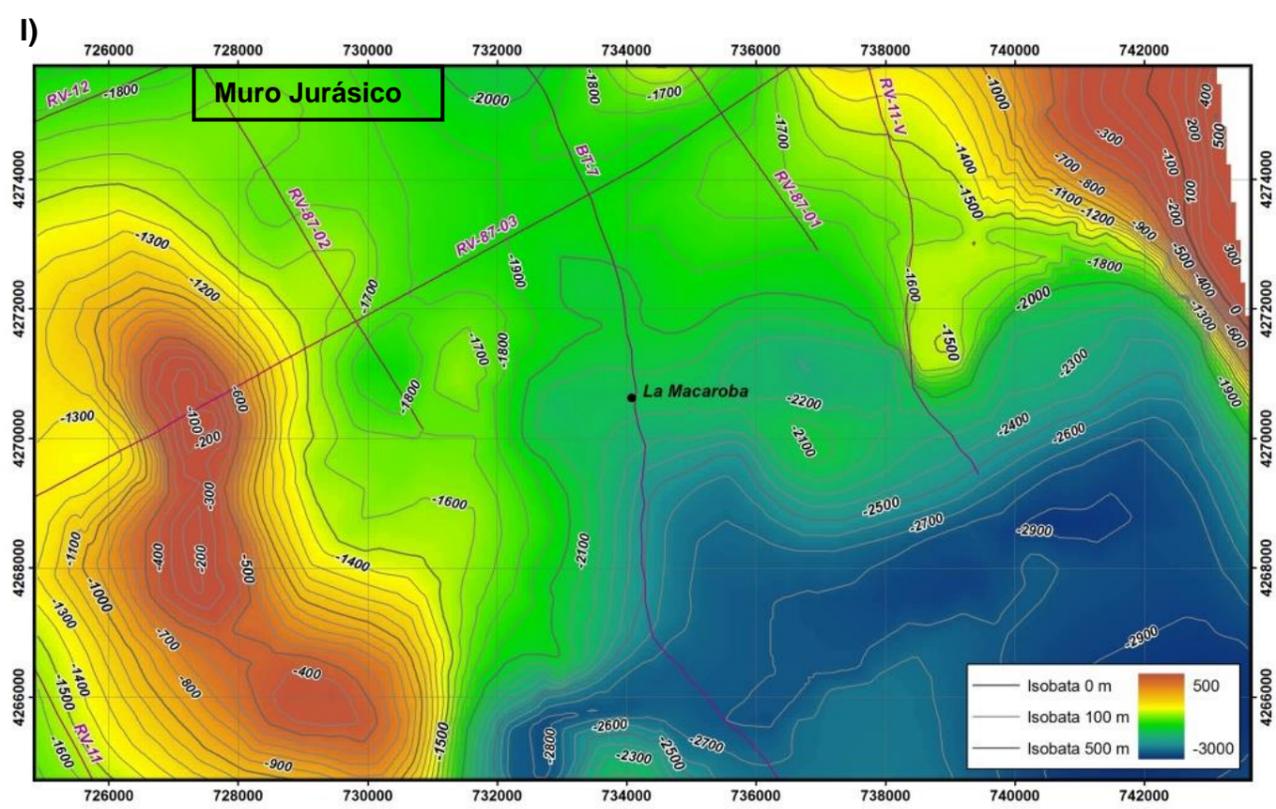
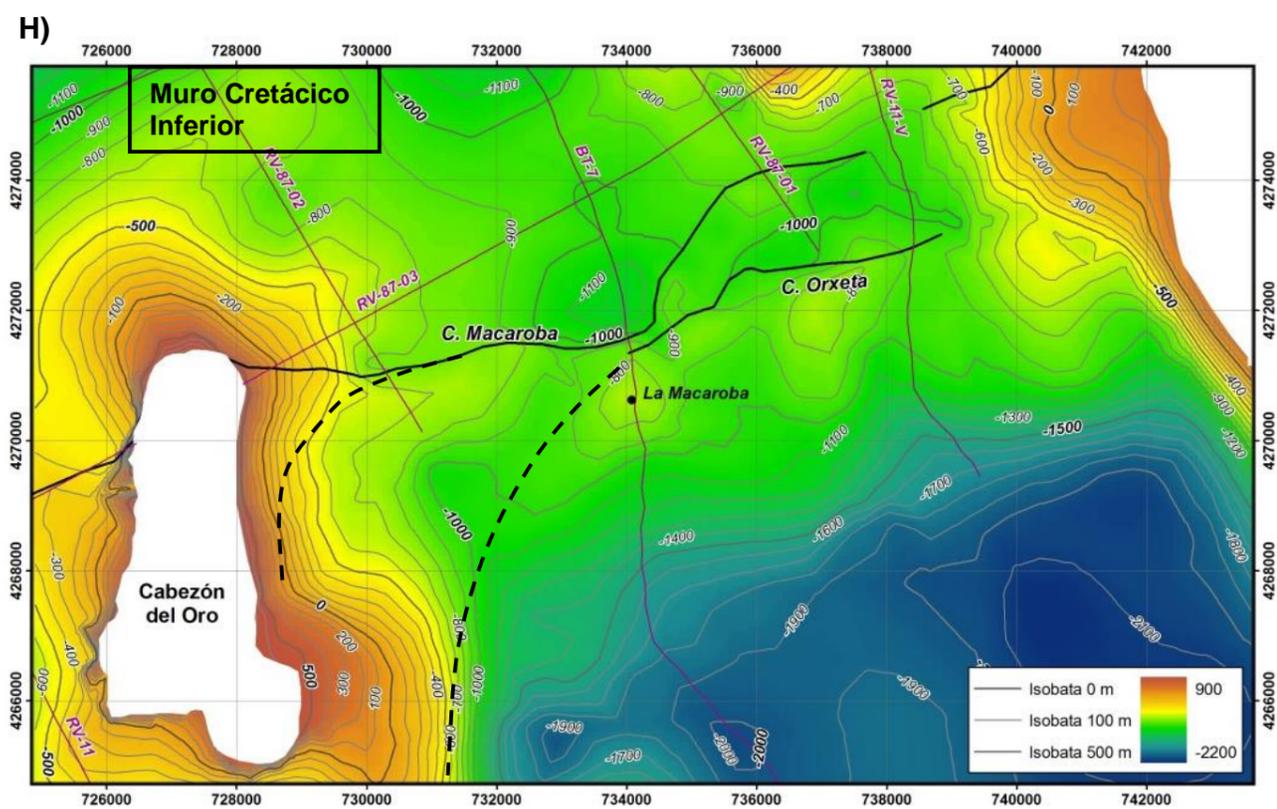
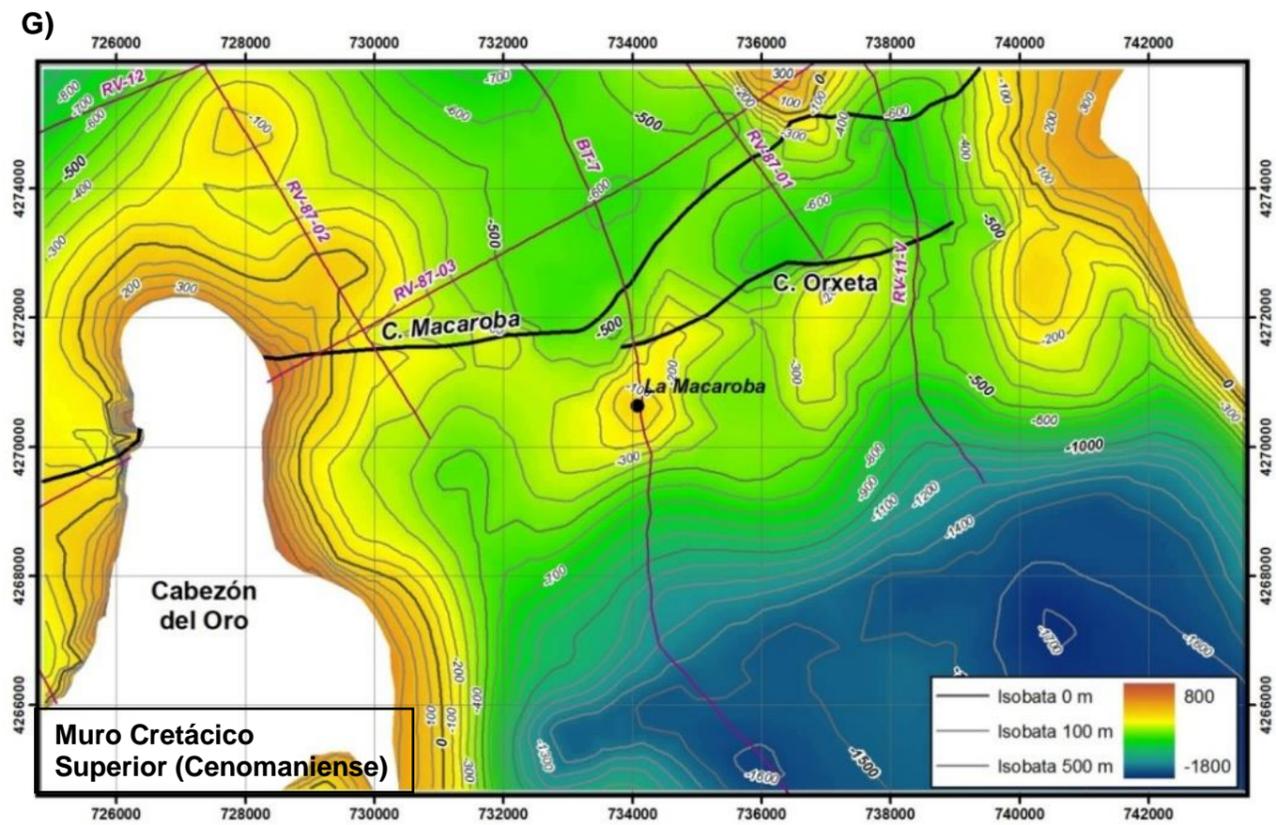
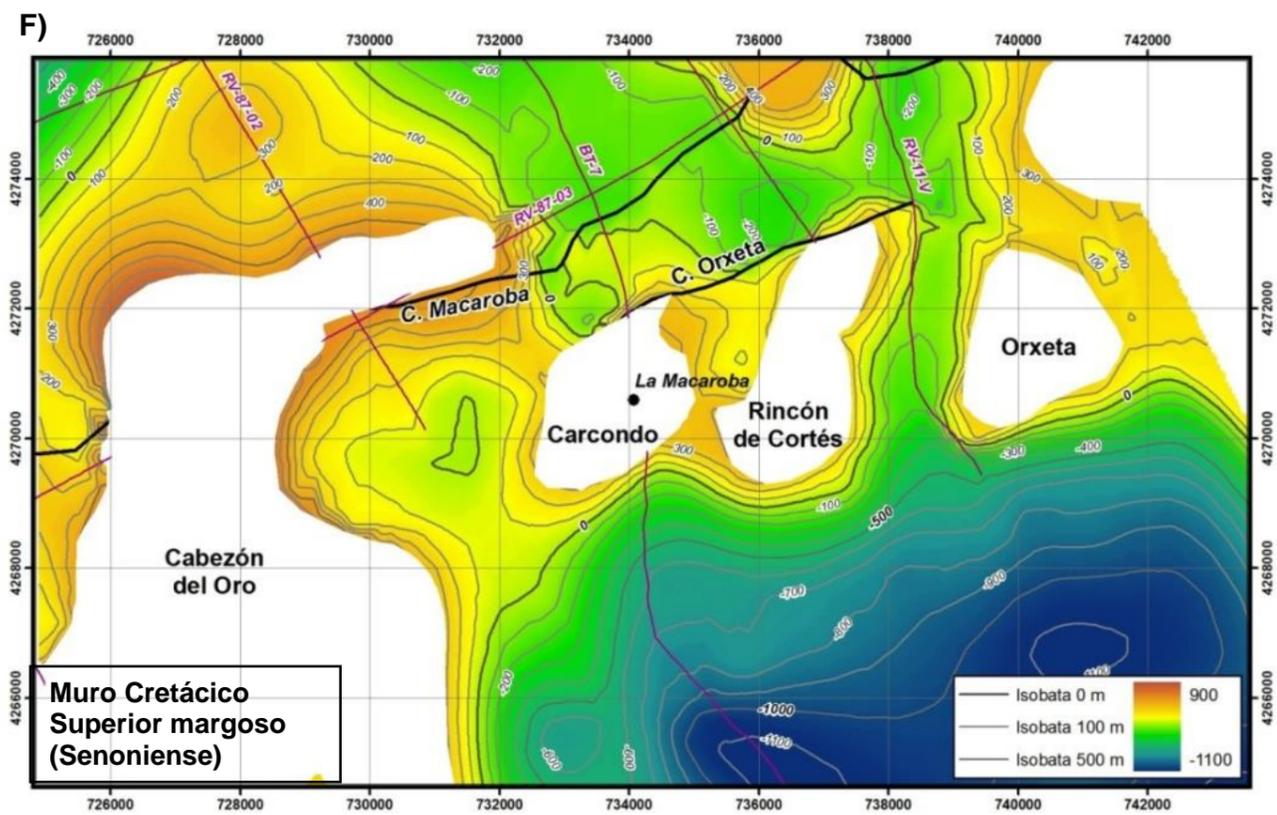


Figura 11b. Modelación de los acuíferos de los anticlinales de Orxeta y Cabezón de Oro. Isobatas de Superficies de Referencia (m.s.n.m): **F)** Muro Cretácico Superior margoso; **G)** Muro Cretácico Superior; **H)** Muro Cretácico Inferior. A trazos, alternativa donde los cabalgamientos de Macaroba y Orxeta giran al SO, a nivel de techo del Jurásico, aislando cabezón del Oro de los anticlinales de Orxeta; **I)** Muro Jurásico.

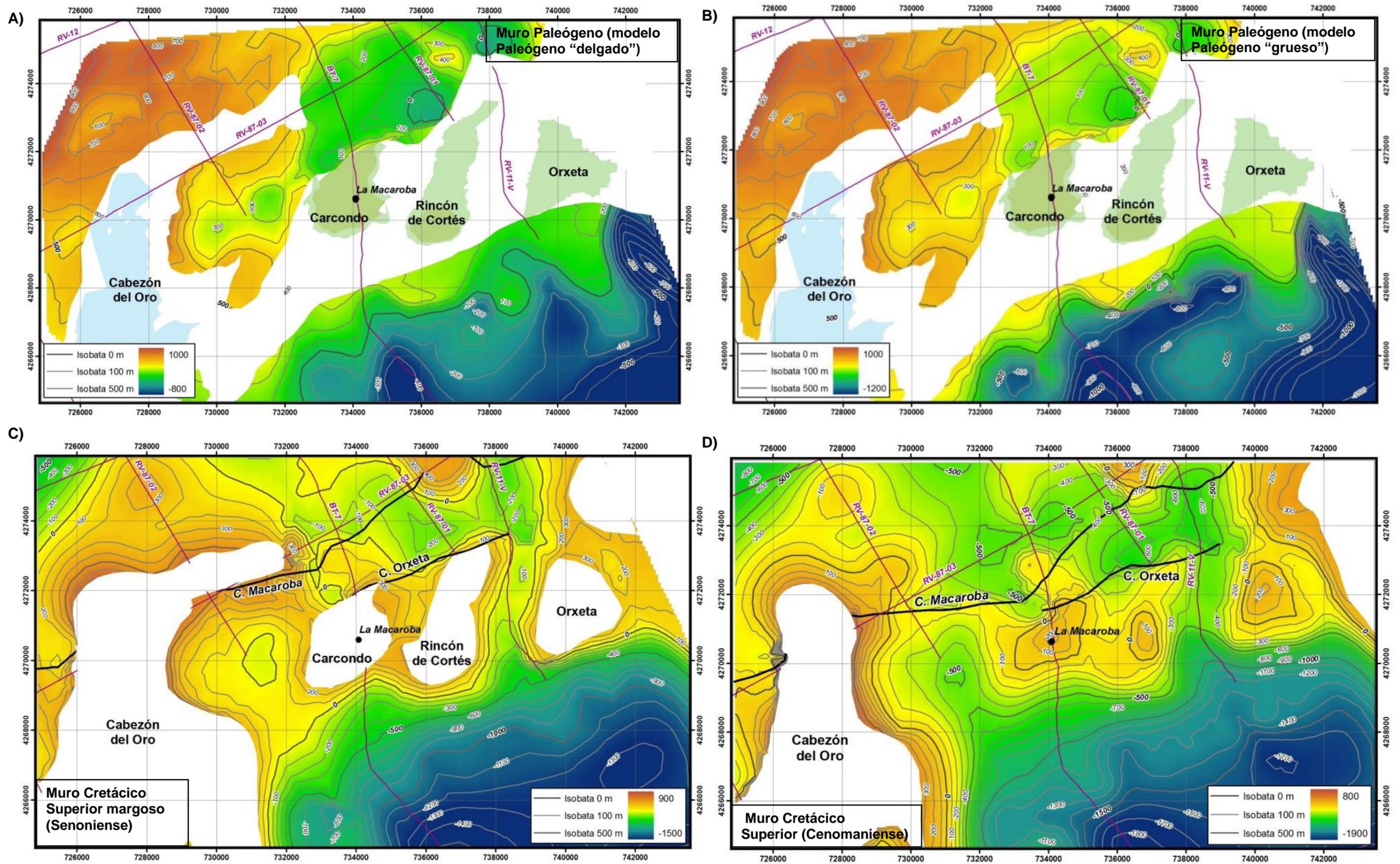


Figura 11c. Modelación de los acuíferos de los anticlinales de Orxeta y Cabezón de Oro. Isobatas de Superficies de Referencia (m.s.n.m.): A) Muro Paleógeno "delgado". Escenario de Cretácico Inferior y Paleógeno gruesos; B) Muro Paleógeno "grueso"; C) Muro Cretácico Superior margoso; D) Muro Cretácico Superior.

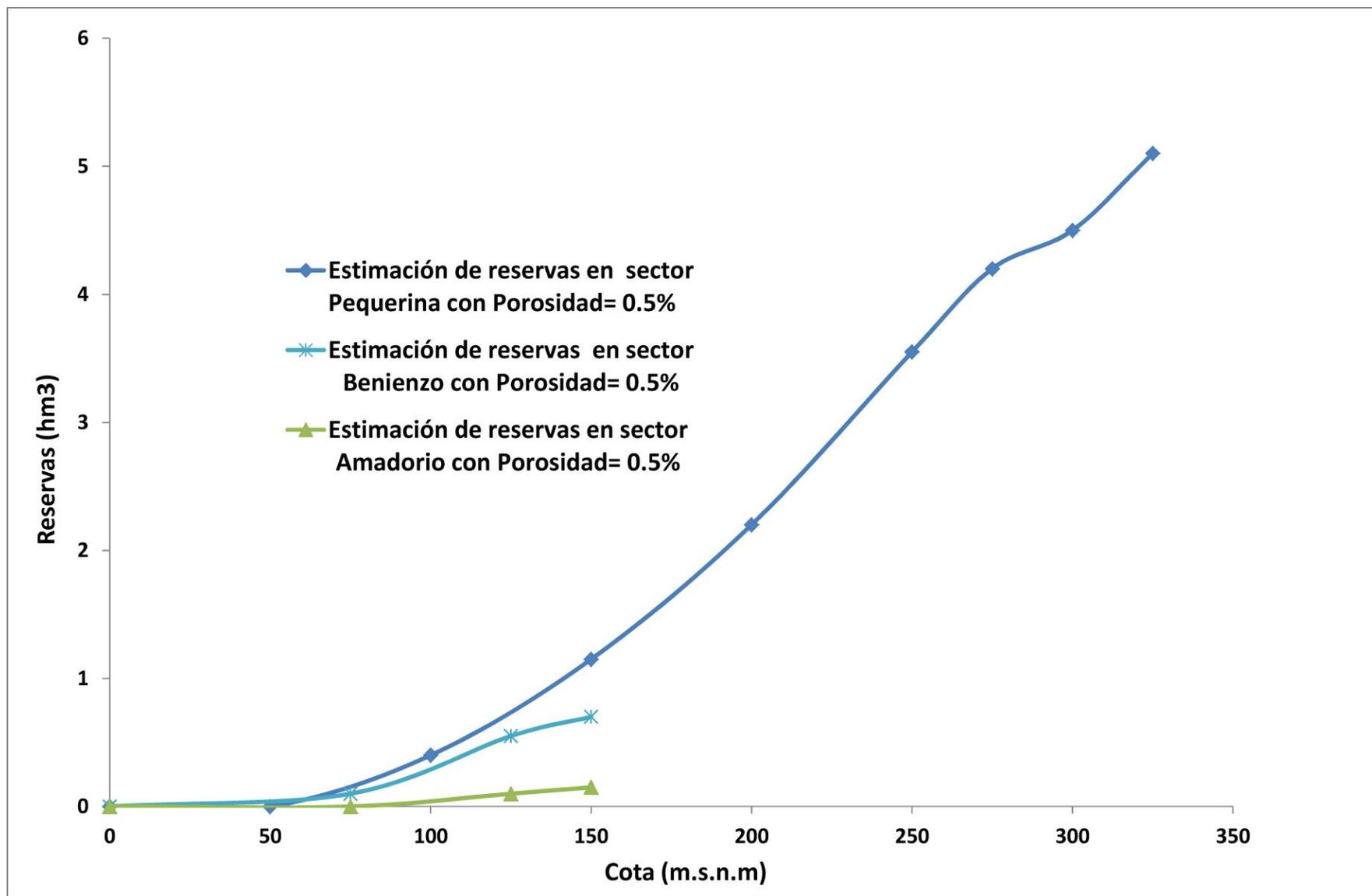


Figura 11d. Curvas de reservas totales del Acuífero Orcheta. Obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero. Se distinguen los sectores Pequerina, Benienzo y Amadorio.

TABLA V. RESUMEN DE RESULTADOS. CABO ROIG-CAMPO CARTAGENA

DESCRIPCIÓN	<p>El dominio hidrogeológico (nº 28) más meridional de la provincia de Alicante comprende los acuíferos de Cabo Roig y Campo de Cartagena. <u>Cabo Roig</u>: Extensión de 61 km² de los que 18 km² son afloramientos permeables formados por areniscas y calcarenitas del Plioceno Inferior (potencia entre 10 y 100 m). Base impermeable margas verde-grises (Mioceno Superior-Messiniense) en discordancia erosiva. Sello: margas blancas del Plioceno Superior. Recursos medios renovables= 3 hm³/año (DPA. 2010a). <u>Campo Cartagena</u>. Se han definido cinco niveles acuíferos constituidos por los materiales permeables (carbonatados y detríticos) pertenecientes al Triásico, Tortonense, Messiniense, Plioceno y Cuaternario. Recursos medios renovables= 3.5 hm³/año (DPA. 2010a).</p>	
ELEMENTOS MODELO 3D	<p>-CABO ROIG: Techo y muro de calcarenitas pliocenas/Techo Triásico carbonatado. Nº fallas principales: 2. Modelo de 61 km² -CAMPO CARTAGENA: SÓLO Techo Triásico carbonatado. Modelo de 109 km² en la provincia de Alicante.</p>	
DATOS DE SUPERFICIE Y SUBSELO	Cartografía Magna	Contactos, buzamientos y fallas. Hoja 935 (Torrevieja)
	Cortes geológicos	3 Cortes reinterpretados y 4 elaborados para ajuste del modelo 3D
	Sísmica	CABO ROIG: S-82-51, S-84-66N, S-84-64 y S-84-68 (1982-1986) CAMPO CARTAGENA: nº de líneas=35
	Gravimetría	No usada (pocos datos en Sector sur)
	SEV's	No usados (Sector norte)
	Sondeos	CABO ROIG: 18 sondeos hidrogeológicos + 1 de petróleo (S. Miguel de Salinas 1). Sondeos petróleo área de Torrevieja: Benejuzar-1, La Mata-1, Rojales-1, S.M. de Salinas-2, La Marina-1 (control de techo del Trías)
OBS. DIPUTACIÓN	De interés la evolución lateral de los tramos permeables en el Campo de Cartagena (V. Baja). El Messiniense (M1,M2,M3) no es cartografiable en sísmica	
MODELO PREVIO	DPA-IGME 2007a, b. Carencia de información relativa a reservas.	
COMPLEJIDAD	<p>Complejidad media: 1) Estratigrafía: la sísmica permite una interpretación fiable del basamento triásico y del Mioceno inferior, pero no del M. Superior-Plioceno. La equivalencia de unidades de estratigrafía sísmica petrolera e hidrogeológica, es muy dudosa y no tiene efectos en las superficies de referencia del modelo geológico de Cabo Roig en tanto en cuanto no se han usado interpretaciones de reflectores superiores que aparecen en las 3 líneas sísmicas que atraviesan el acuífero para la reconstrucción 3d de superficies Pliocenas y Messinienses. Ello se debe a que los espesores y profundidades para tales superficies derivados de sísmica de reflexión calada en sondeos de petróleo y los obtenidos en cortes y sondeos hidrogeológicos, son incompatibles. 2) Estructura: incertidumbre de los saltos de las fallas principales que limitan el acuífero al Norte y al Sur.</p>	

TABLA V. RESUMEN DE RESULTADOS. CABO ROIG-CAMPO CARTAGENA

<p>RERESULTADOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS. IMPLICACIONES</p>	<p><u>Modelo geológico 3D de Cabo Roig</u>: basado en cortes hidrogeológicos apoyados en sondeos. Consta de 3 superficies de referencia, una Triásica y dos del Plioceno inferior, techo y muro del acuífero, más dos fallas principales. El acuífero presenta una geometría sencilla configurándose como un promontorio local en el que la lámina de Plioceno desciende W-E hacia la línea de costa, y queda delimitado por dos depocentros, uno al Norte (cuenca de Torrevieja), a través de la Falla de San Miguel de Salinas, y otro al Sur (Campo Cartagena-Vega Baja), a través de la Falla de Río Seco. El descenso, de unos 200 m en 6 km, va acompañado de un aumento de espesor, desde unos 30 m al Oeste a unos 100 m en la línea de costa, donde techo y muro se encuentran bajo el nivel mar, profundizando el muro hasta unos -200 msnm.</p> <p><u>Límites del acuífero</u>: los límites oeste y este del acuífero están bien establecidos sin controversia (pe, DPA-IGME, 2013). Respecto a los límites N y S, el acuífero de Cabo Roig constituye a grandes rasgos lo que podría denominarse un pequeño horst tectónico que viene condicionado por sus fallas de borde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Al norte, la Falla de S. Miguel de Salinas, con bloque septentrional hundido, en el que se sitúa la cuenca neógena de Torrevieja. Aunque el salto de esta falla es discutido, en el modelo 3D de este trabajo resulta ser de unos 100 m, aunque sin control de sondeos, de modo que la falla muy probablemente aísla el acuífero de Cabo Roig de la cuenca de Torrevieja. • Al sur, la Falla de Río Seco, de dirección W-E, con bloque meridional hundido, en el que se sitúa la cuenca neógena del Campo de Cartagena, propiamente dicha. En el modelo 3D de este trabajo, el salto resulta ser de unos 40 m, aunque con un control de sondeos y sísmico escaso, y no aísla el acuífero de Cabo Roig que se prolonga hacia el Campo de Cartagena. <p><u>Cálculo de reservas</u>: el acuífero presenta un volumen de roca saturada de unos 2.2 km³. Si se considera un rango de valores de porosidad entre un 1.0–3.0 %, compatible con los escasos datos petrofísicos disponibles, las reservas totales de agua en el acuífero quedarían comprendidas entre 22 y 66 hm³, respectivamente, para las porosidades mencionadas, de las que entre 7,2 y 21,6 hm³ son aptas para consumo y entre 2,8 y 8,4 hm³ están salinizadas (índice de salinidad según norma Riverside con valores de conductividad entre 4000-5000 µs/cm). Reservas explotables no salinizadas entre 0,2-0,6 hm³.</p> <p><u>Cálculo de capacidad de almacenamiento geológico del Triásico y Complejo mioceno basal desde el Campo de Cartagena a la Cuenca de Torrevieja</u>: En cuanto a Geometría del Basamento Triásico para usos geotérmicos o de almacenamiento geológico, se ha obtenido la cartografía del subsuelo del mismo en una amplia extensión de unos 40 x 40 km. Se han cartografiado estructuras antiformales de basamento en Campo de Cartagena, Benejuzar-Rojales y A. Hurchillo con una capacidad que podría estimarse en más de 120 millones de Tm de CO₂, aunque se requerirían sísmica de reflexión y sondeos adicionales para definir geometría y características petrofísica de almacenes objetivo.</p> <p><u>Calidad del modelo</u>: la irregular distribución de sondeos, y su escaso número en conjunto, hacen que el modelo tenga un alto grado de incertidumbre. Se precisa revisión geológica, estratigráfica y petrofísica para caracterizar por sísmica los tramos Messinienses de una manera compatible con la interpretación hidrogeológica del área de Cabo-Roig.</p>
<p>INFORME</p>	<p>Pérez Ortiz, I., García Lobón, J.L., Marín Lechado, C., Rey Moral, C., Martín León, J. 2013. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG Y CARTOGRAFÍA DE SUBSUELO DEL BASAMENTO TRIÁSICO DEL ENTORNO CABO ROIG-CAMPO DE CARTAGENA. Fondo Documental del IGME. 67 páginas (Informe SID nº 64105). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp</p>

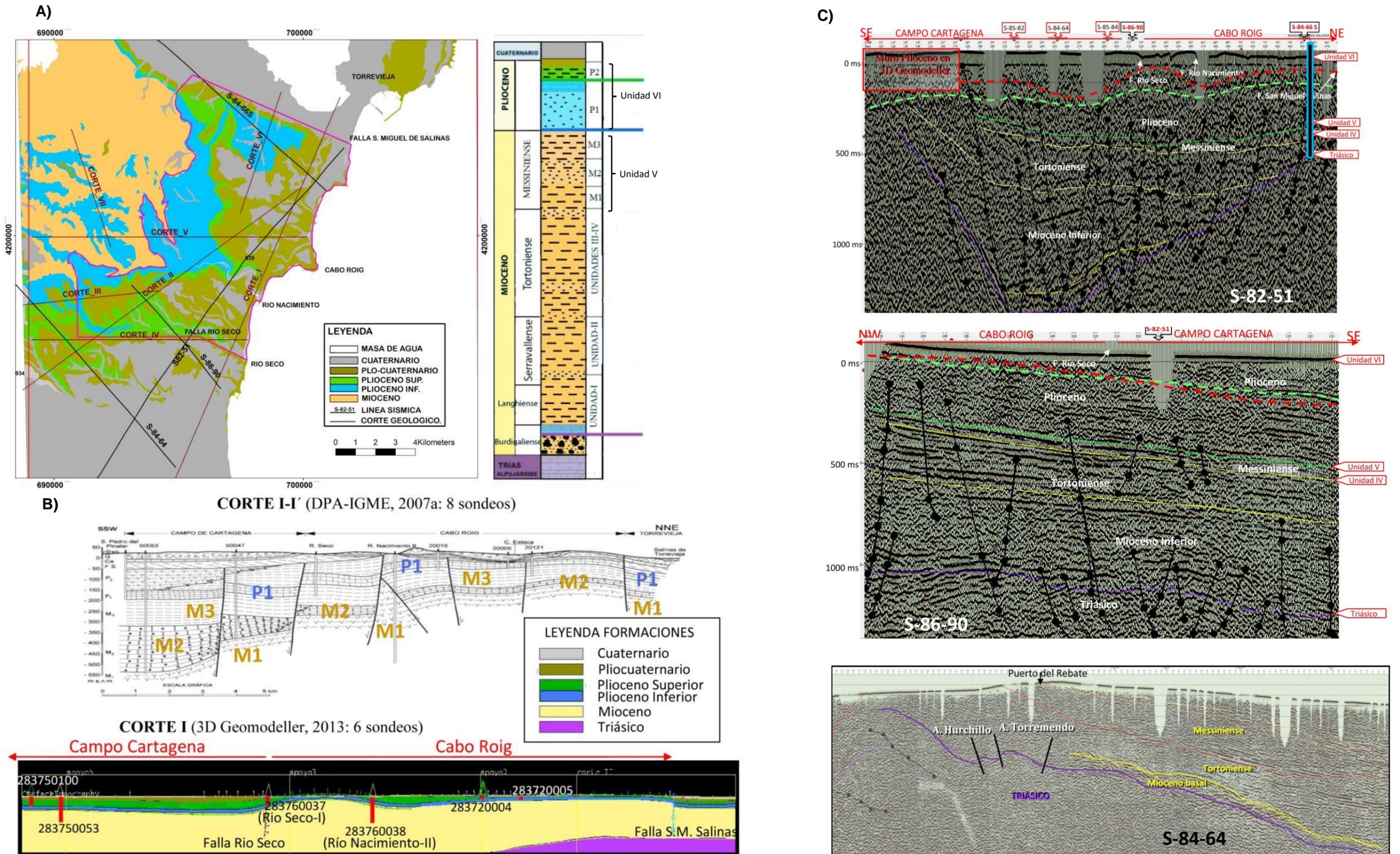


Figura 12a. Modelación Acuífero de Cabo Roig y Triásico Campo de Cartagena. A) Esquema de situación de los cortes geológicos, sísmica y sondeos utilizados en la modelización 3D del acuífero de Cabo Roig sobre mapa geológico de la zona de estudio (Geode). Se indica afloramiento del acuífero de Cabo Roig (azul) y su perímetro (rosa). B) Corte hidrogeológico I y sección correspondiente en el Geomodeller. C) De Arriba abajo: Sección Sísmica S-82-51. Subparalela a la costa, con horizontes de estratigrafía sísmica interpretados y calados en el sondeo de petróleo S. Miguel de Salinas-1 donde se indican techos de Unidades. Las fallas son de pequeño salto. Rojo discontinuo: muro del acuífero Plioceno en modelo 3D Geomodeller; verde discontinuo, interpretación alternativa sísmica del muro del Plioceno. En medio: sección sísmica S-86-90. Abajo: línea sísmica S-84-64-MU (Antiforme Campo de Cartagena).

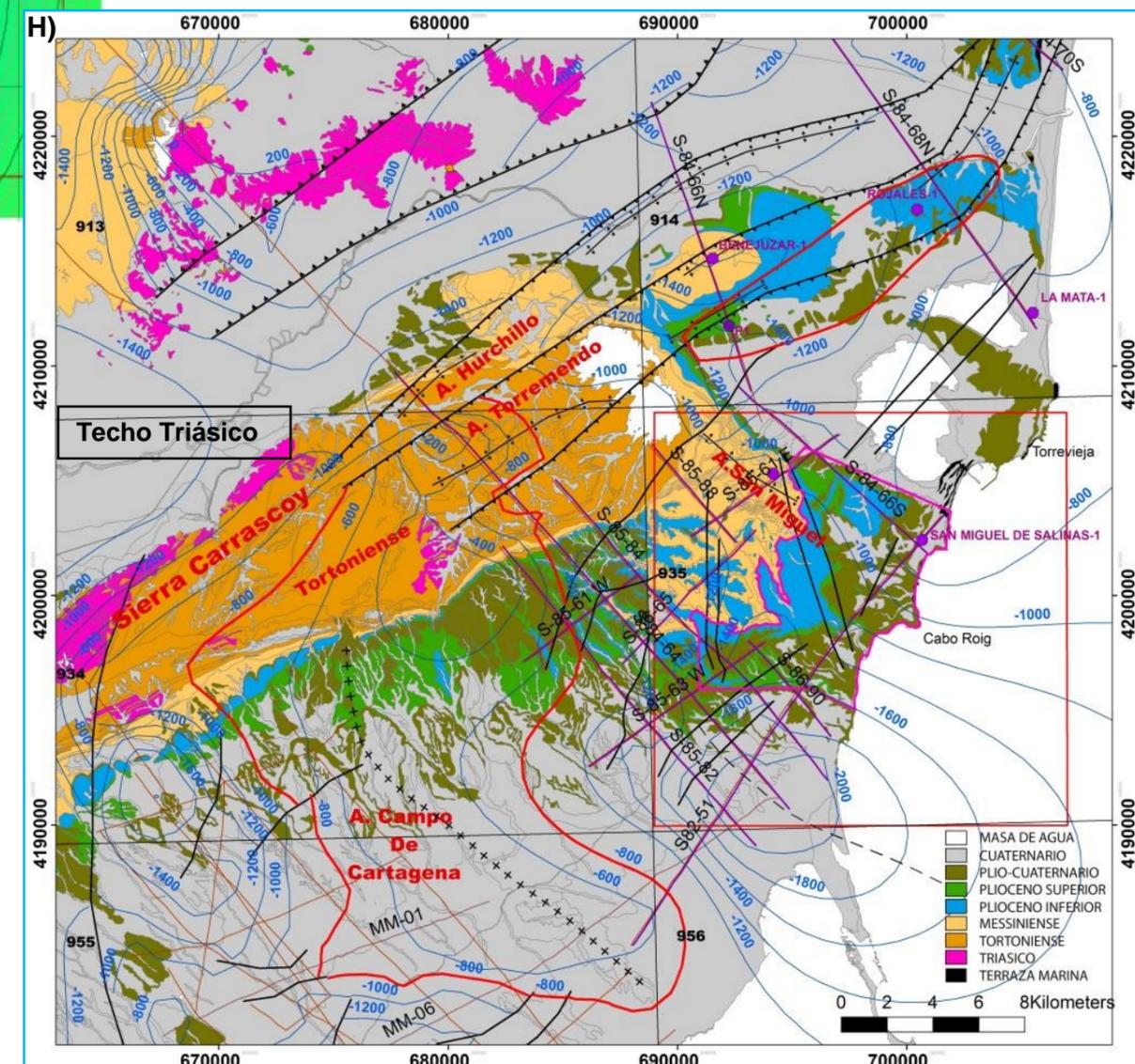
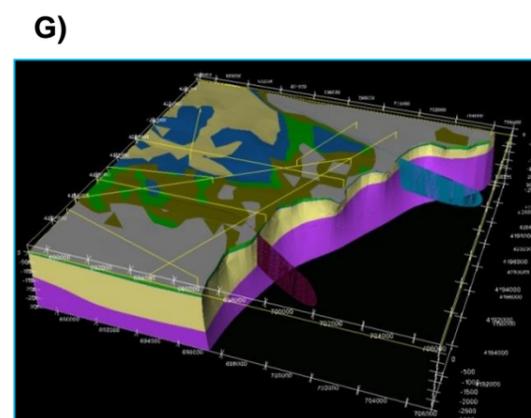
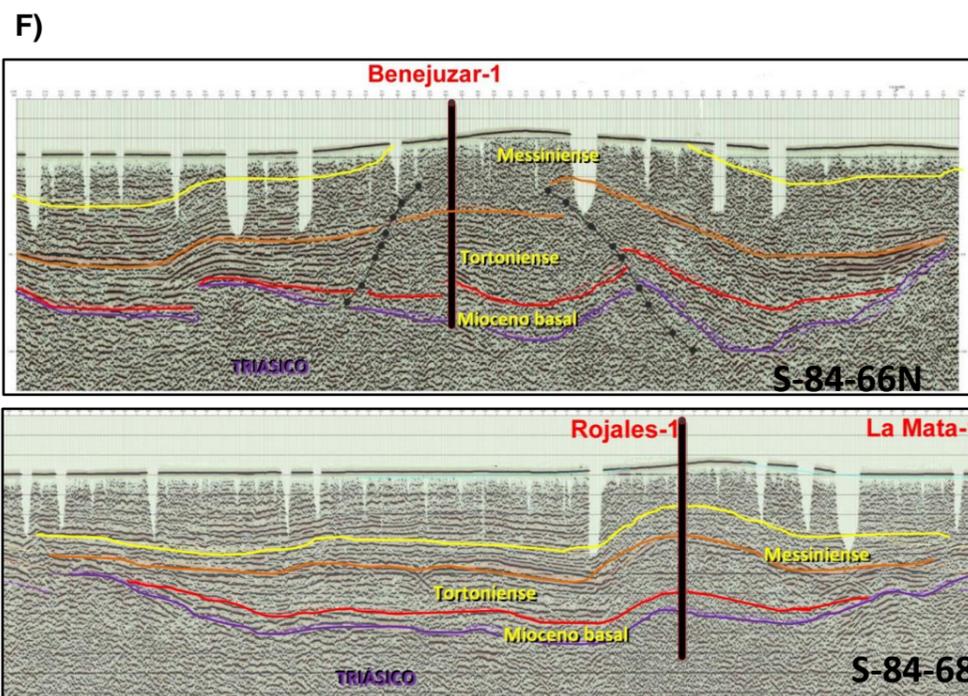
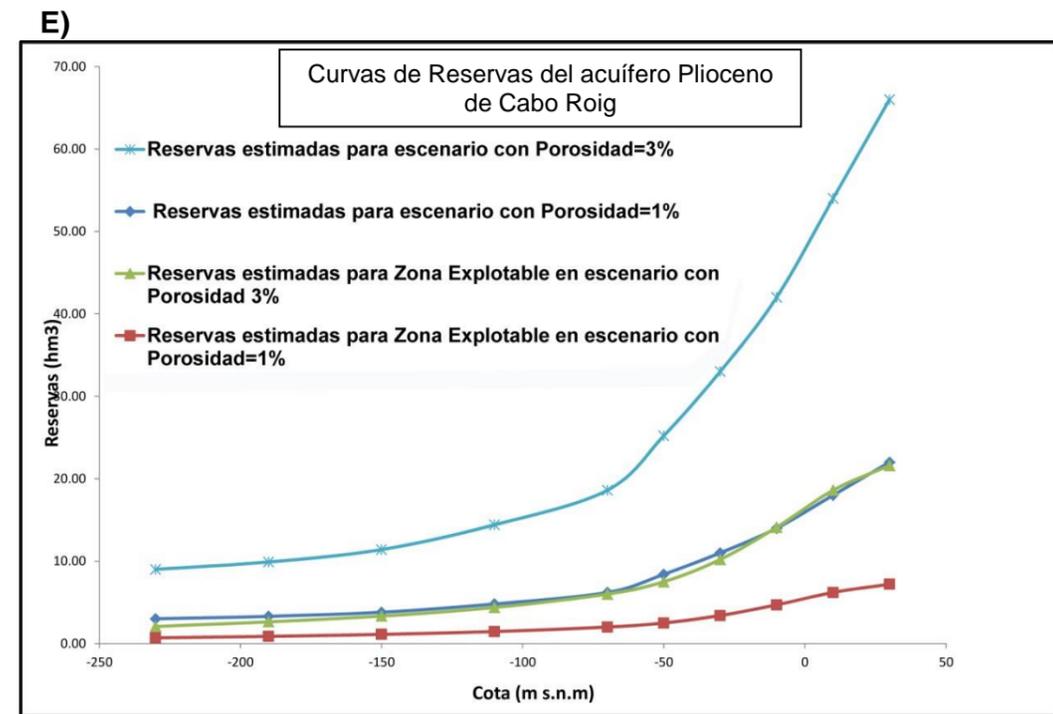
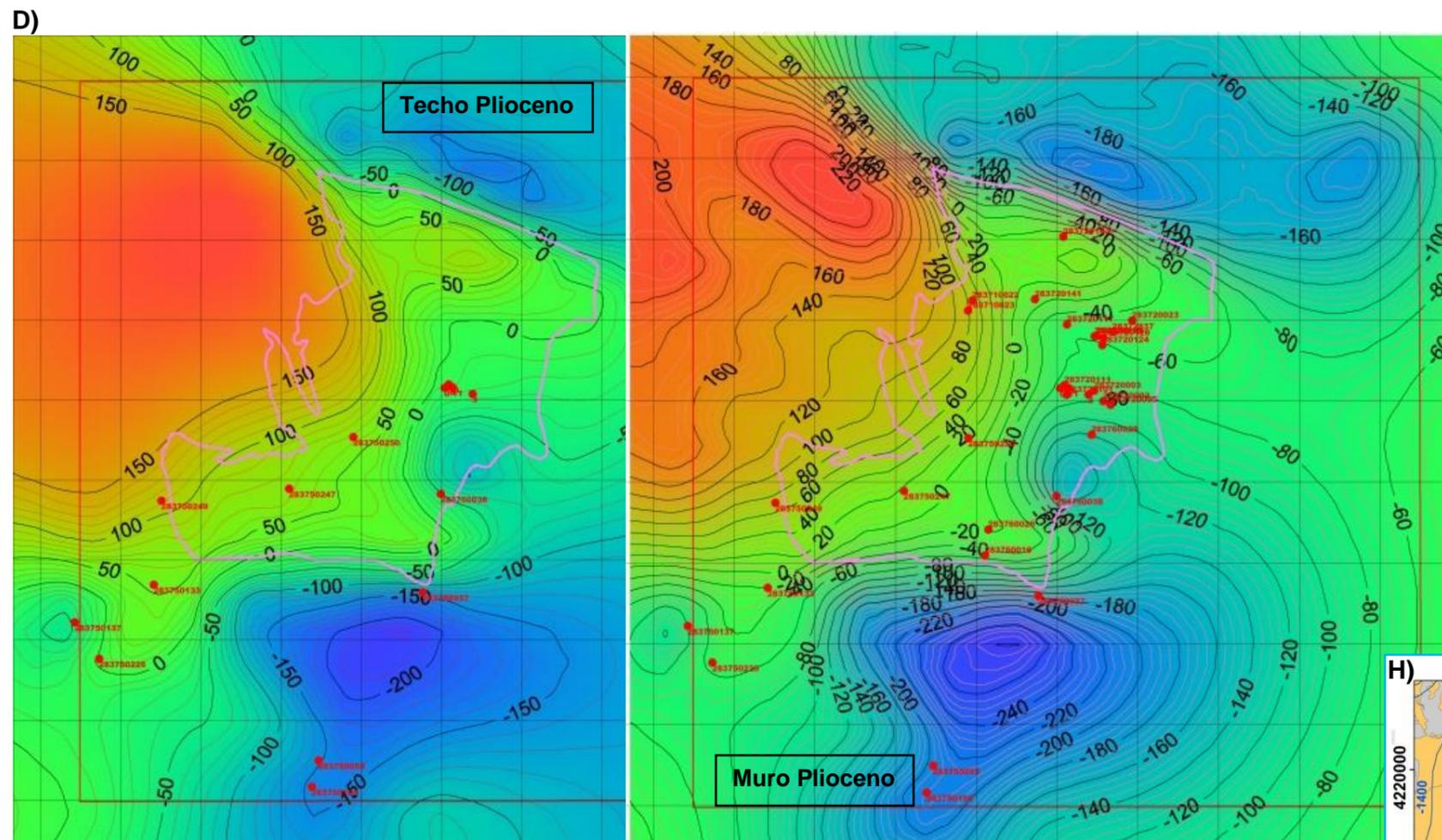


Figura 12b. Modelación Acuífero de Cabo Roig y Triásico Campo de Cartagena. D) Mapa isobatas (m.s.n.m.) del Techo (izquierda) y Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig (perímetro en rosa). En rojo: límites del modelo 3D (retícula cada 2 km). E) Curvas de Reservas del acuífero Plioceno. F) Líneas sísmicas: S-84-66N (sondeo Benejuzar) y S-84-68-MU (sondeos de petróleo Rojales y La Mata). G) Modelo 3D Obtenido. H) Isobatas (m.s.n.m.) y estructuras de basamento Triásico desde el Campo de Cartagena a la Cuenca de Torrevieja sobre mapa geológico 1:50.000 (Geode). En rojo: estructuras de almacenamiento al Complejo mioceno basal y Triás.

TABLA VI. RESUMEN DE RESULTADOS. ACUIFERO SERRAL-SALINAS		
DESCRIPCIÓN	<p>Extensión de 266 km² de los que 158 km² son afloramientos permeables formados por calizas y arenas del Aptiense-Albiense, dolomías del Cenomaniense y calizas del Senoniense.</p> <p>Recursos medios renovables de 4 hm³/año (DPA. 2010a). Cotas medias comprendidas entre 500 y 1200 m.s.n.m.</p>	
ELE-MENTOS MODELO 3D	<p>-Muro Neógeno. -Muro Paleógeno (Techo del acuífero). -Muro Senoniense (Acuífero). -Muro Cenomaniense (Acuífero). -Muro Aptiense-Albiense, (Muro del acuífero).</p> <p>13 fallas principales. Modelo de 268 km²</p>	
DATOS DE SUPERFICIE Y SUBUSELO	Cartografía Magna	Contactos, buzamientos y fallas de las hojas 845 (Yecla) y 870 (Pinoso)
	Cortes geológicos	10 cortes geológicos de elaboración propia
	Datos estructurales	373 medidas de dirección y buzamiento estratificación, a partir de Cartografía geológica y fotointerpretación (Ortofotografías y MDT 10m)
	Sísmica	RV-60, RV-78, RV-79, RV-63, RV-64 y RV-80 (1985), 115 km de líneas a interpretar.
	Gravimetría	NO
	SEV/SED T	94 SED T
	Sondeos	38 sondeos hidrogeológicos. Entre 114-820 m. Procedencia: DPA e IGME
OBS. DPA		
MOD. PRE-VIOS	DPA-IGME. 2003 y 2007c, DPA, 2010c. Establece una Ss de 6E-5 y una porosidad eficaz de 0,1 %.	
COM- PLEJI- DAD	Media	

RESULTADOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS. IMPLICACIONES	<p><u>Modelo geológico 3D:</u> 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 NO de este pliegue se desarrolla una falla inversa lítrica. Existen fallas normales menores perpendiculares y paralelas a la traza axial de los pliegues. La Sierra del Serral es un bloque separado en forma de arco de dirección NE-SO. Hacia el SE el modelo 3D presenta una depresión Neógena correspondiente a una sinforma que desarrolla hacia el sur pequeños anticlinales como el de la Sierra de la Sima (figura 13A). La profundidad máxima alcanzada para la base del acuífero es de -680 m.s.n.m. El espesor medio del acuífero es de unos 600 metros. No se han encontrado criterios geológicos que permitan dividir esta estructura en dos áreas con comportamientos hidrogeológicos independientes. El límite suroccidental del acuífero se ha modificado e incluido la Sierra de Las Pansas.</p> <p><u>Límites del acuífero:</u> El acuífero está limitado al NO por el cabalgamiento frontal de la Sierra del Serral y Sierra de Salinas sobre el Prebético externo y los materiales acuitados del Cretácico inferior. El límite NE estaría definido por el diapiro del Vinalopó y el límite SO por la falla que separa la Sierra del Carche de la Sierra de las Pansas. 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</p> <p><u>Cálculo de Reservas:</u> La mediana de la porosidad abierta en 44 muestras de campo es del 2.75% y los percentiles 25 y 75 de 1.5 y 4.5%, respectivamente. Las reservas totales de agua en el acuífero de Serral-Salinas en régimen natural están comprendidas entre los 1130 y los 3390 hm³. Las reservas dinámicas están comprendidas entre los 51 y 155 hm³.</p> <p><u>Calidad del modelo:</u> La calidad del modelo 3D es aceptable. No obstante la mayor incertidumbre se localiza en el sector occidental bajo la depresión neógena debido a que no existen sondeos que corten el acuífero. En cualquier caso las líneas sísmicas han permitido interpretar la geometría general de esta unidad a partir de la continuación desde superficie del reflector que llega a aflorar y de los sondeos convertidos a tiempo según la ley de velocidad obtenida.</p> <p><u>Implicaciones del modelo:</u> 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 (DPA-IGME, 2007). No obstante, todo parece indicar que los principales tramos acuíferos, constituidos por las dolomías del Cenomaniense y las calizas de Senonense podrían tener 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.</p> <p>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 13A, 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 km², de los que 83 km² corresponderían a afloramientos carbonáticos permeables.</p>
INFORME	<p>Marín Lechado, C., Martos Rosillo, S., García Lobón, J.L., Fernández-Leyva, C, 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO SERRAL-SALINAS Y EVALUACIÓN DE LAS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. 112 páginas (nº Informe SID por asignar).</p>

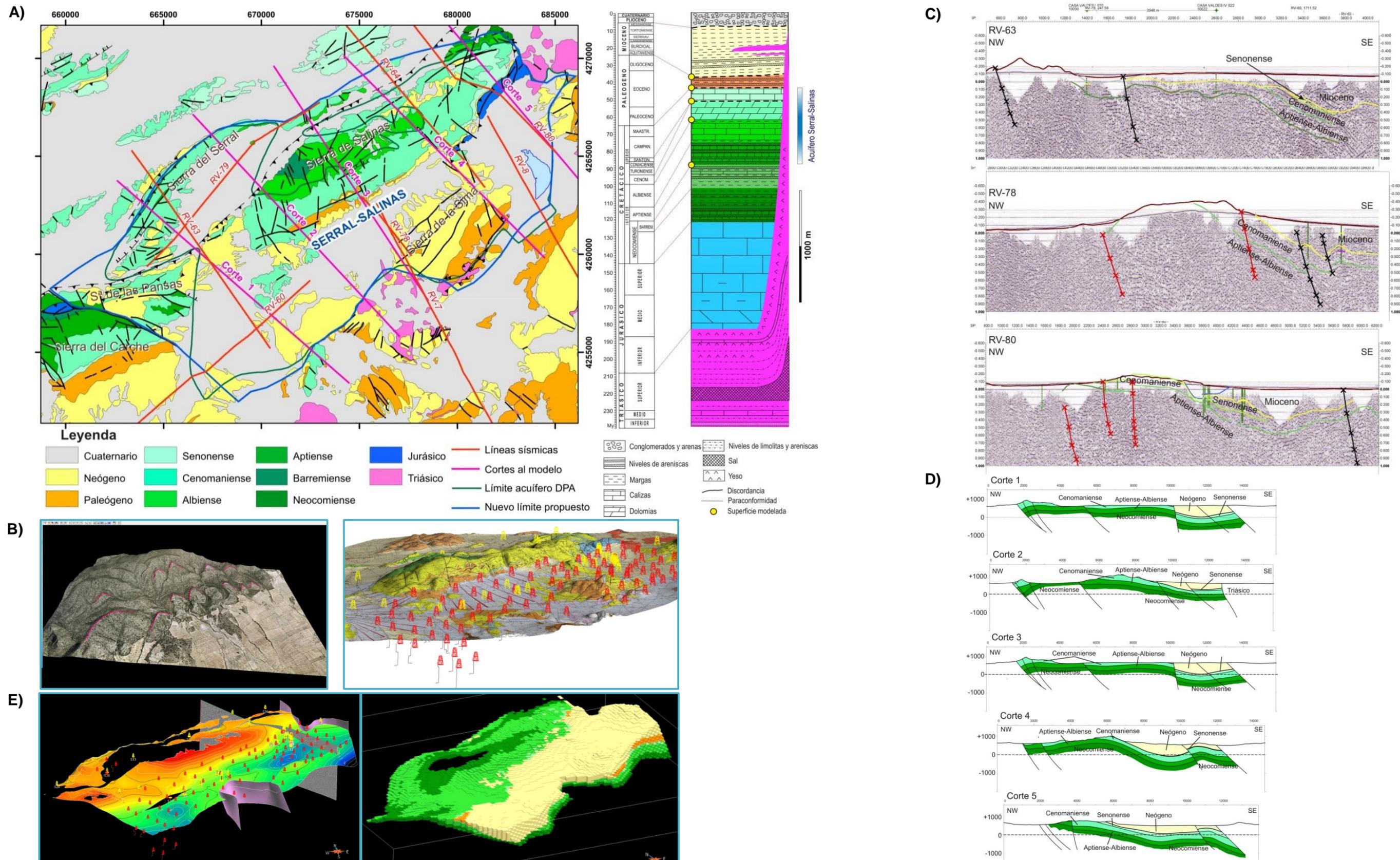


Figura 13a. Modelación Acuífero Serral-Salinas. Arriba. A) Mapa geológico del área estudiada con indicación de Sierras principales. Límites de los acuíferos estudiados en azul. Se posicionan cortes y líneas sísmicas. **B)** Fointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D en Sierra de Salinas. **Derecha:** Vista 3D de los sondeos mecánicos (amarillo) y SEDT (rojo) y el modelo de resistividades de cada sondeo con el programa gOcad. **C)** Perfiles sísmicos RV-63, 78 y 80 en formato digital seg-y convertido a profundidad. Se muestra la interpretación realizada de los horizontes sísmicos. **D)** Cortes geológicos 1 a 5 realizados al modelo 3D generado en el proyecto. **E)** Vista 3D del muro del Cenomaniense del Acuífero de Serral-Salinas junto con los sondeos mecánicos, los SEDTs y la línea RV-80 (en gris). **Derecha:** Vista del modelo voxet de Sierra de Salinas. Cada celda tiene un atributo litológico

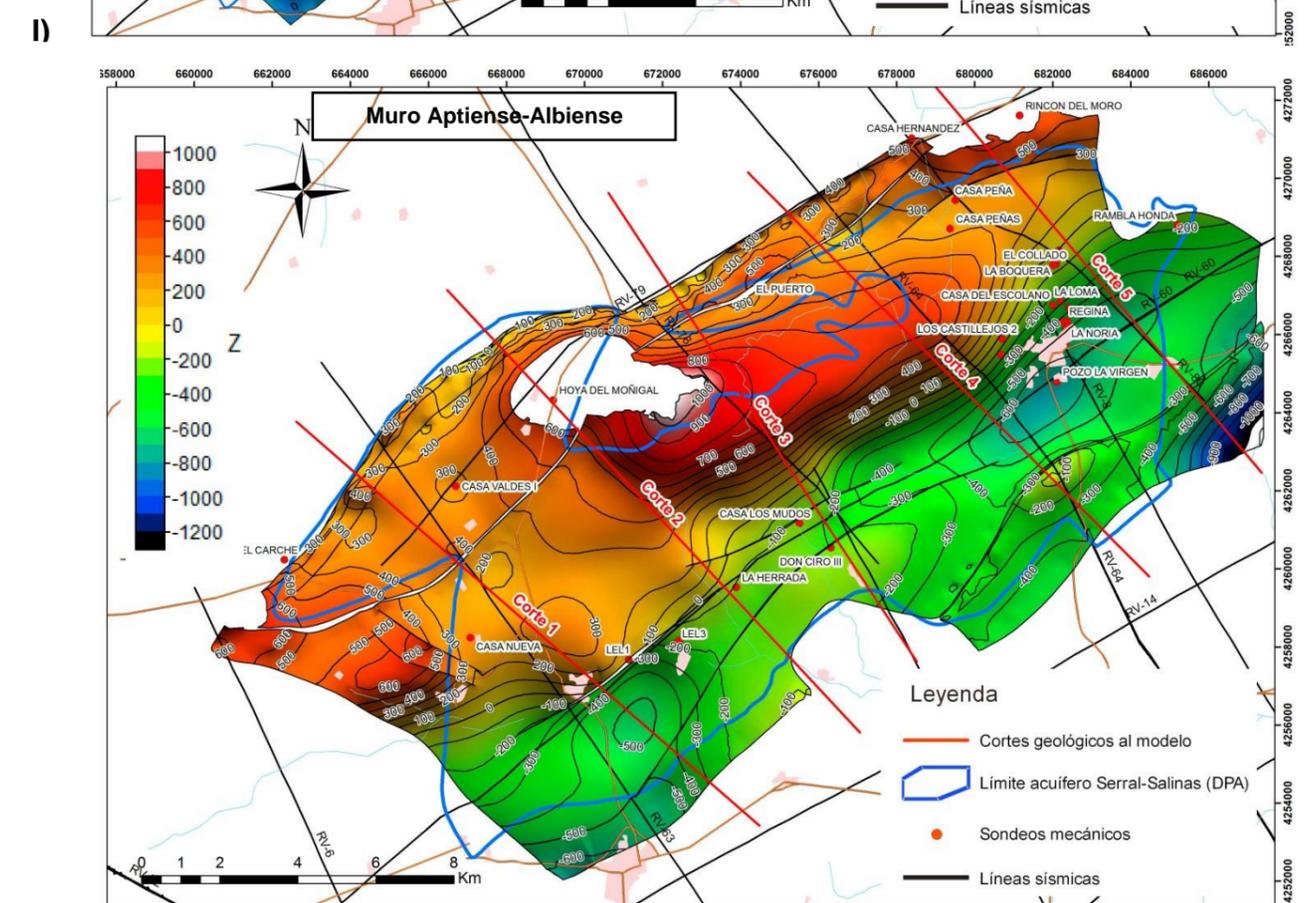
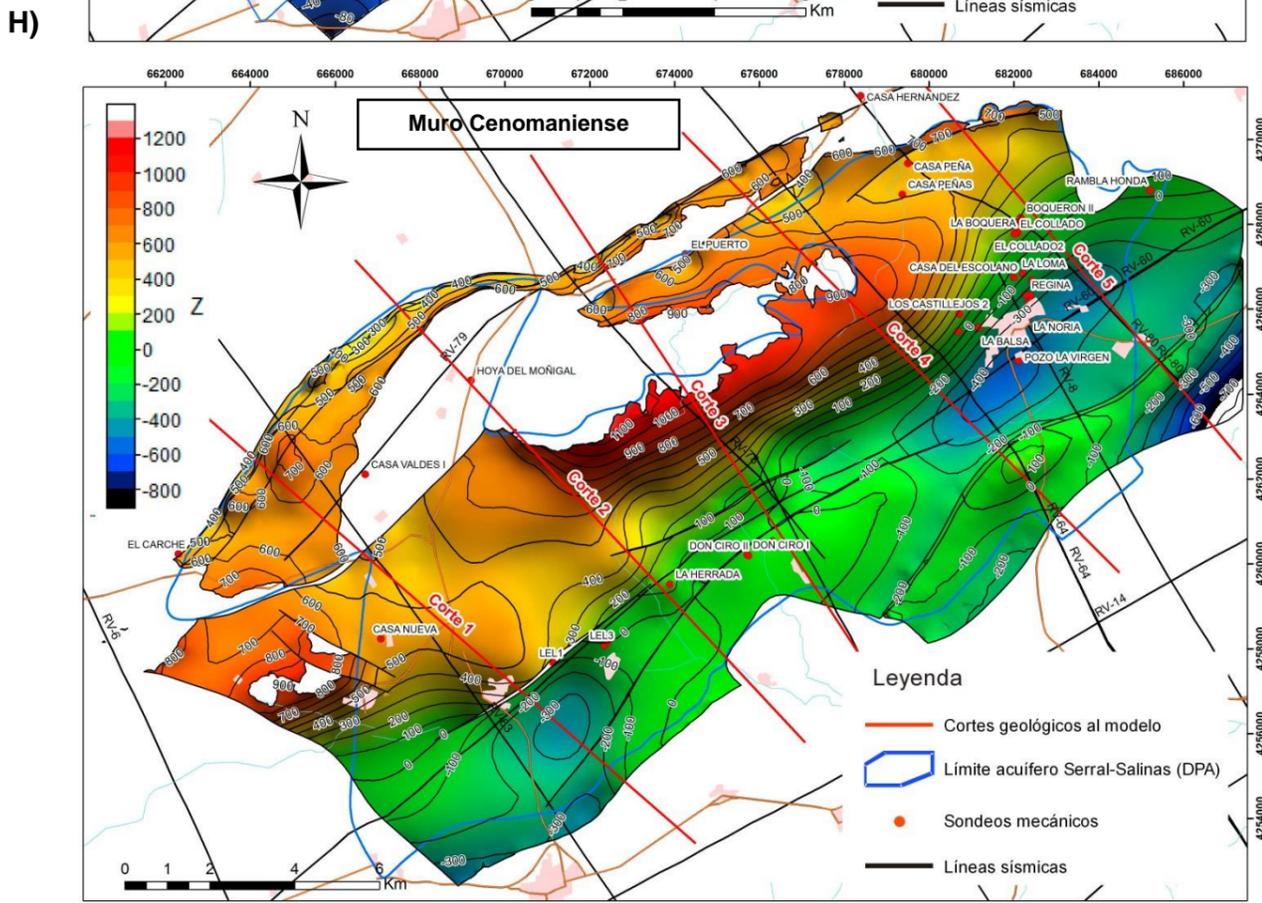
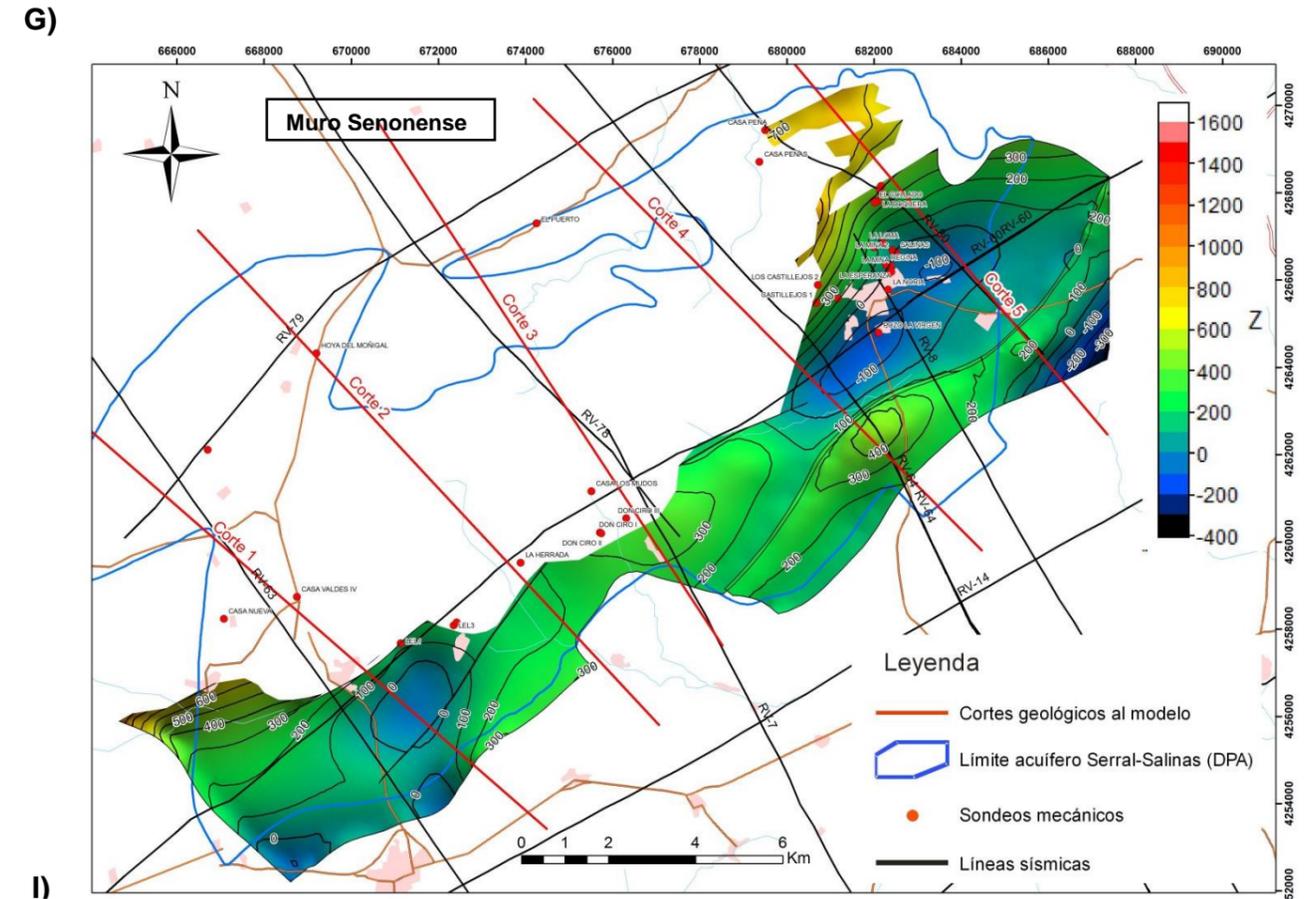
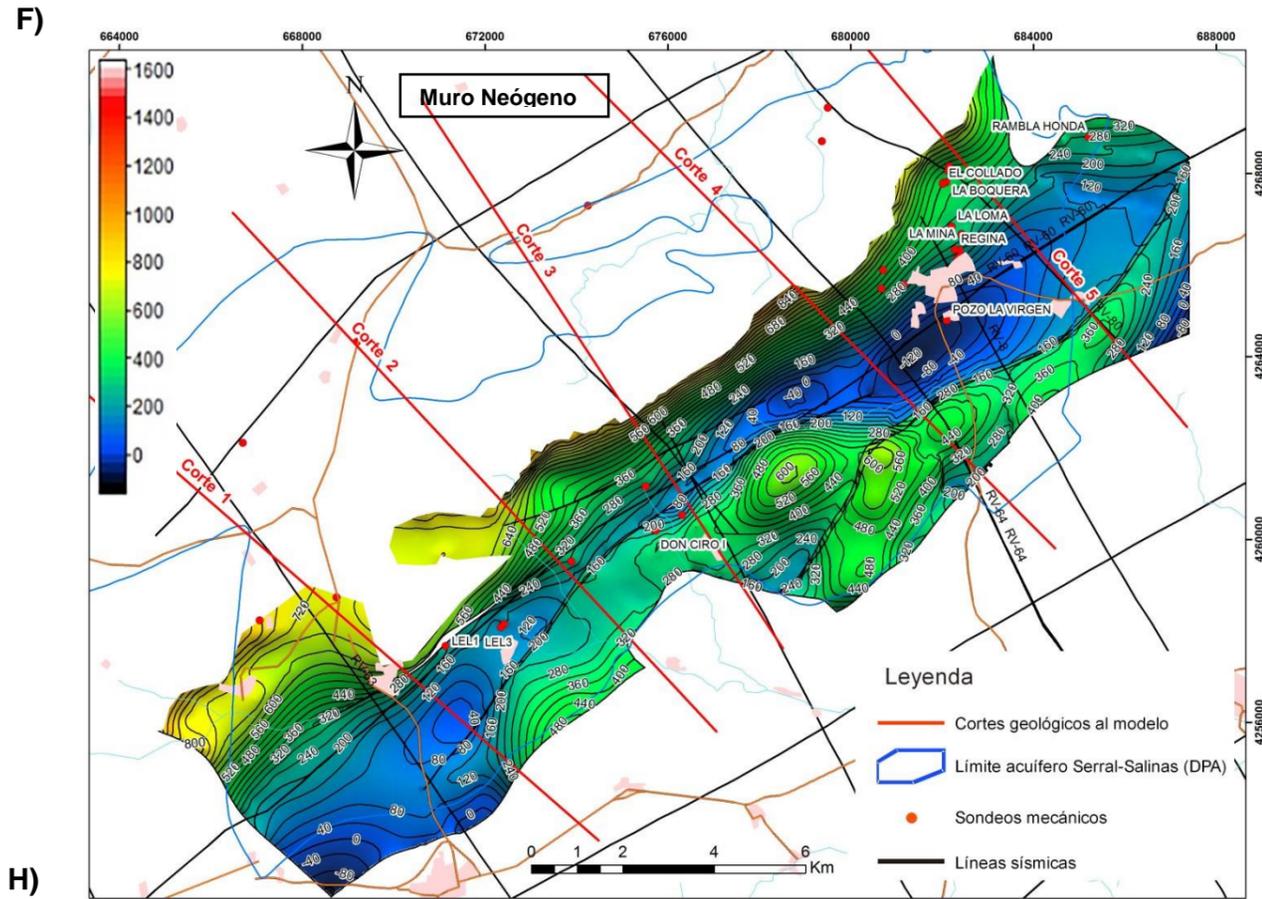


Figura 13b. Modelación Acuífero Serral-Salinas. Mapas de isobatas de muro de: **F)** Unidad Neógena (800 a -120 m.s.n.m.) **G)** Unidad Senonense **H)** Unidad Cenomaniense **I)** Unidad Aptiense-Albiense (1000 a -1000 m.s.n.m.).

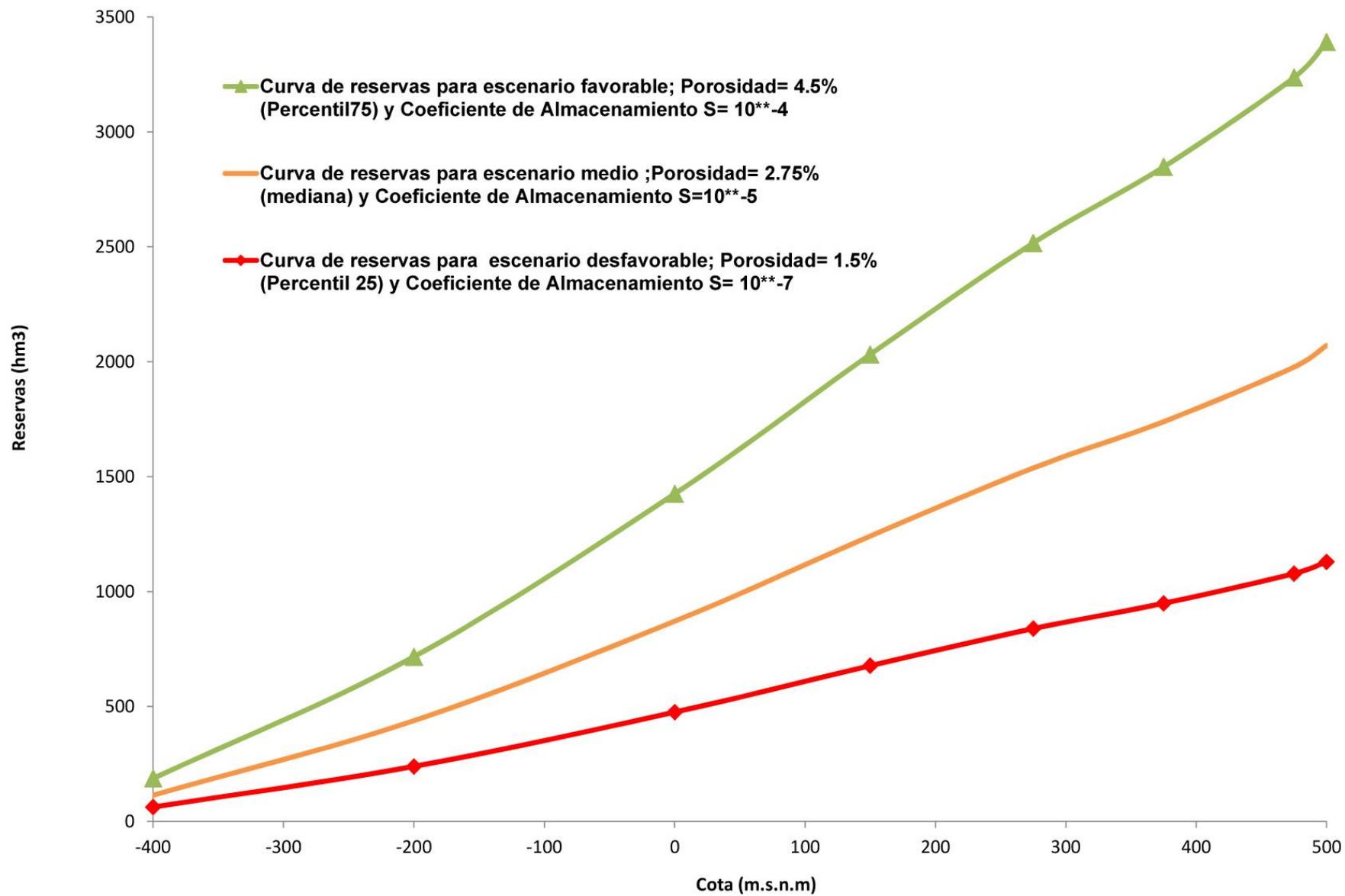


Figura 13c. Curvas reservas del acuífero Serral-Salinas. Estimadas para distintos escenarios de porosidades y coeficientes de almacenamiento a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero.

4.3 Caracterización del sistema poroso de los de acuíferos profundos de Alicante

4.3.1 Estudio petrográfico de rocas calcáreas de los acuíferos Solana, Serral-Salinas y Carrascal-Ferrer

Los estudios petrográficos llevados a cabo en los afloramientos carbonatados de los acuíferos Solana, Serral-Salinas y Carrascal-Ferrer, han permitido la caracterización de las microfacies muestreadas y su clasificación según los esquemas propuestos por Dunham (1962), Folk (1959, 1962) y Lucía (1999). Se han estudiado en el microscopio óptico 131 láminas delgadas. 95 corresponden a calizas y el resto dolomías y calizas parcialmente dolomitizadas. Puesto que la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5 μm , en estos estudios sólo se ha incluido la caracterización del espacio poroso grueso, es decir, vacíos superiores a 10 μm . Para la porosidad más fina (poros por debajo de 1 μm) sería necesaria la utilización de técnicas y medidas complementarias en futuros estudios, tales como la Microscopía Electrónica de Barrido y el Análisis Digital de Imagen. Igualmente se han caracterizado las microfracturas, sus dimensiones y distribución en cada muestra.

Las muestras que han sido estudiadas del acuífero de Carrascal-Ferrer (51), en general conservan la textura deposicional, lo que permite clasificarlas según los esquemas propuestos por Folk o Dunham. Hay algunos casos en los que están presentes ciertos reemplazamientos, es decir, dolomitizaciones incipientes que destruyen parcialmente la textura original (CA-S1-10 y CA-S1-15). Generalmente se trata de muestras de porosidad muy baja; así se deduce de las observaciones utilizando la técnica de la microscopía de transmisión, y los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta ($0,1 \leq (\%) \leq 5,6$). Las microfracturas son la porosidad abierta que se identifica más fácilmente en estas láminas estudiadas, si bien aparecen generalmente muy localizadas y selladas con cemento y/o matriz. La porosidad abierta interpartícula es prácticamente inexistente con la técnica utilizada en este estudio. Predominan los Wackestone/Packstone, así como la Clase Petrofísica 3.

Por formaciones o edades, se han obtenido los siguientes datos:

- **Mioceno/Aquitaniense:** se trata básicamente de microfacies que conservan su textura deposicional, del tipo Mudstone/Wackestone, Clase petrofísica 3 de Lucía. Facies en general poco fracturadas, porosidad muy baja.
- **Paleógeno/Oligoceno:** predominan las microfacies Wackestone/Packstone, Clase petrofísica 2 y 3 de Lucía. Algo de fracturación sellada con cemento en buen número de muestras.
- **Caliza de Jaén:** predominan las microfacies Wackestone/Packstone; Clase 2 y 3 de Lucía
- **Formación Jumilla:** Microfacies variadas y clase petrofísica 1 y 3.
- **Formación Sácaras:** la microfacies predominante es el Packstone y la clase petrofísica la Clase 2.
- **Formación Seguilí:** predominan las microfacies Wackestone/Packstone, Clase petrofísica 3 de Lucía.

En el acuífero de **Solana**, casi el 50% de un total de 40 muestras son dolomías de la Formación Quesada y Benejama (dolograinstone y dolopackstone). El resto de

muestras conservan casi íntegramente la textura deposicional, predominando los mudstone frente a los packstone y wackestone. Se está ante muestras de porosidad muy variable, tanto entre formaciones como dentro de las mismas. Así lo indican los datos de laboratorio, donde la porosidad abierta medida varía entre $0,5 \leq (\%) \leq 32,9$, coincidiendo frecuentemente los datos porosidad abierta altos con aquellas muestras que exhiben espacios vacuolares de geometrías irregulares y microfracturas abiertas o parcialmente selladas con precipitados posteriores.

Por formaciones o edades, se obtienen los siguientes datos:

- **Formación Utrillas:** solo se ha estudiado una muestra de esta formación, por lo que la representatividad de la misma está muy limitada. Se trata de un mudstone, clase petrofísica 3, con espacios vacuolares heterogéneos en cuanto al tamaño y muy continuos en toda la lámina, y microfracturas abiertas abundantes.
- **Formación Quesada:** se trata de un paquete dolomitizado, con fábricas entre dolograstone y dolopackstone, y por tanto clases petrofísicas 1 y 2. Los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta se mueven en los valores de $0,7 \leq (\%) \leq 8,2$. Presencia de microfracturas generalmente selladas, si no en su totalidad, si parcialmente. Espacios vacuolares presentes, frecuentemente ocasionales, con tamaños muy variables, alcanzando en algunos caso varios mm de diámetro.
- **Formación Franco:** formación compuesta tanto por paquetes dolomitizados como por facies más lodosas parcialmente dolomitizadas. Predominan los mudstone, con generalizada porosidad vacuolar, alcanzando incluso varios mm y microfracturas abiertas. En los dolopackstone también con frecuentes los espacios vacuolares generalmente, sin llegar al mm de diámetro, con formas subredondeadas. Los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta se mueven en los valores de $1,3 \leq (\%) \leq 27$. Clases petrofísicas 2 y 3.
- **Formación Benejama:** formación heterogénea en cuanto a la fábrica de las muestras estudiadas, con algunos paquetes también dolomitizados. Clases petrofísicas 1, 2 y 3. Los espacios vacuolares son muy accesorios en general y la microfracturación es escasa y aparece sellada. Los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta está comprendida entre $0,8 \leq (\%) \leq 6,1$.
- **Formación calcarenitas+margas+calizas (Cretácico Superior):** formación con facies packstone y mudstone, y por tanto clases petrofísicas 2 y 3. Porosidades variables, los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta se mueven en los valores de $0,5 \leq (\%) \leq 11,6$. Al microscopio se observa una vuggy porosity generalizada en algunos casos, mientras que en otras es muy accesorio. La microfracturación es prácticamente inexistente.

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 del Cretácico Superior.

Generalmente se está 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 ($0,4 \leq (\%) \leq 23,4$),

Por formaciones o edades, obtenemos los siguientes datos:

- **Calizas de algas y/o biocalcarentitas (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 ($8,4 \leq (\%) \leq 23,4$).
- **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 ($0,4 \leq (\%) \leq 2,7$) 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 ($0,7 \leq (\%) \leq 3,3$). Sin embargo, tenemos 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, 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. Se trata de dolograinsstones, Clase petrofísica 1 con una porosidad interpartícula variable ($1,5 \leq (\%) \leq 6,9$). 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 $3,8 \leq (\%) \leq 14,0$. Al microscopio se observa una vuggy porosity de accesoría, coincidiendo con los valores de porosidad interpartícula más baja, a generalizada, coincidiendo con los valores más altos.

4.3.2 Porosidad abierta de muestras de rocas calcáreas de los acuíferos Solana, Serral-Salinas y Carrascal-Ferrer

Los resultados de los 134 análisis de porosidad realizados en calizas y dolomías de los acuíferos carbonáticos de Carrascal-Ferrer, Solana y Serral-Salinas muestran que la porosidad mediana es del 2,3%, con percentiles 25 y 75 de 0,8 y 4,5 %, respectivamente.

Debe ser indicado que en este análisis de resultados no se ha considerado una de las muestras recogidas en el acuífero de Solana, al corresponder con una muestra margoarcillosa muy alterada y de facies Utrillas, situada en el muro del acuífero. La porosidad media es de 3,7% con una desviación estándar asociada de 4,66%. En la Tabla VII, donde se presentan los principales estadísticos descriptivos de los resultados de la medida de la porosidad, también se han incluido los de la densidad aparente.

	Porosidad (%)	Densidad (kg/m³)
Mediana	2,30	2663,0
P25	0,80	2612,2
P75	4,5	2690,0
Media	3,70	2631,8
DE	4,66	112,6
Mín.	0,10	2074,0
Máx.	27,00	2786,0
N de muestras	134	134

Tabla VII. Estadísticos de posición de los valores de porosidad abierta (%) y de densidad (kg/m³) de las muestras analizadas.

Por otro lado, se debe indicar que del total de muestras analizadas 35 corresponden a dolomías y el resto (99) a calizas. La mediana de porosidad de las dolomías y sus primer y tercer cuartil son de 3,8, 1,57 y 6,12%, respectivamente. En el caso de las calizas la mediana es de 1,75 y los percentiles 25 y 75 de 0,73 y 3,6%, respectivamente.

Los histogramas de la porosidad agrupados para el total de las muestras y por acuíferos se presentan en la Figura 15, donde se comprueba que la distribución de las muestras no se ajusta bien a una distribución normal, por lo que, en adelante, se ha considerado conveniente hablar de valores medianos y de los percentiles correspondientes al primer y al tercer cuartil. La existencia de valores anómalos está, fundamentalmente, relacionada con la presencia fracturas abiertas o parcialmente selladas y/o cavidades (touching vug porosity) en algunas de las probetas analizadas. Por otro lado, algunas facies bioconstruidas presentan altos valores de porosidad interconectada. En este sentido, debe ser indicado que el 81 % de las muestras tienen porosidades menores del 5%, por lo que utilizando la clasificación de Archie, de uso en investigación petrolera, se pueden considerar que consisten en rocas carbonáticas con pobre porosidad.

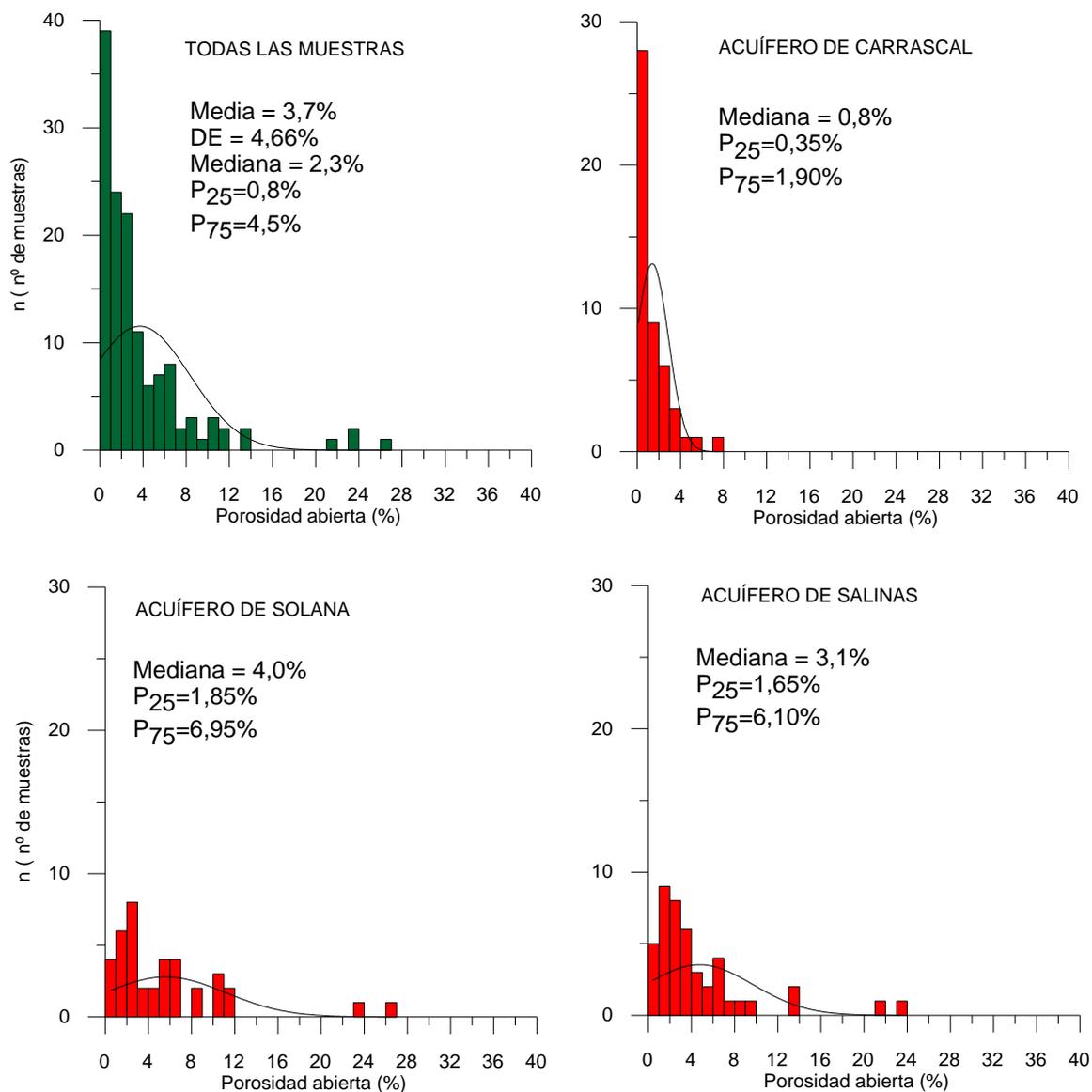


Figura 14. Histogramas de la porosidad correspondientes a la totalidad de las muestras y a las muestras ordenadas según el acuífero de procedencia.

Los datos de densidad determinados presentan una mediana y unos percentiles 25 y 75 de 2663, 2612 y 2690 kg/m³, respectivamente. La distribución de los datos tampoco es normal (Figura 16). Existen datos anómalos con densidades por debajo de lo normal, debido a la presencia de probetas con abundante porosidad intrapartícula.

Los estadísticos representativos agrupados por acuíferos se presentan en la Tabla VIII y se sintetizan en los gráficos de caja –bigote de la Figura 17.

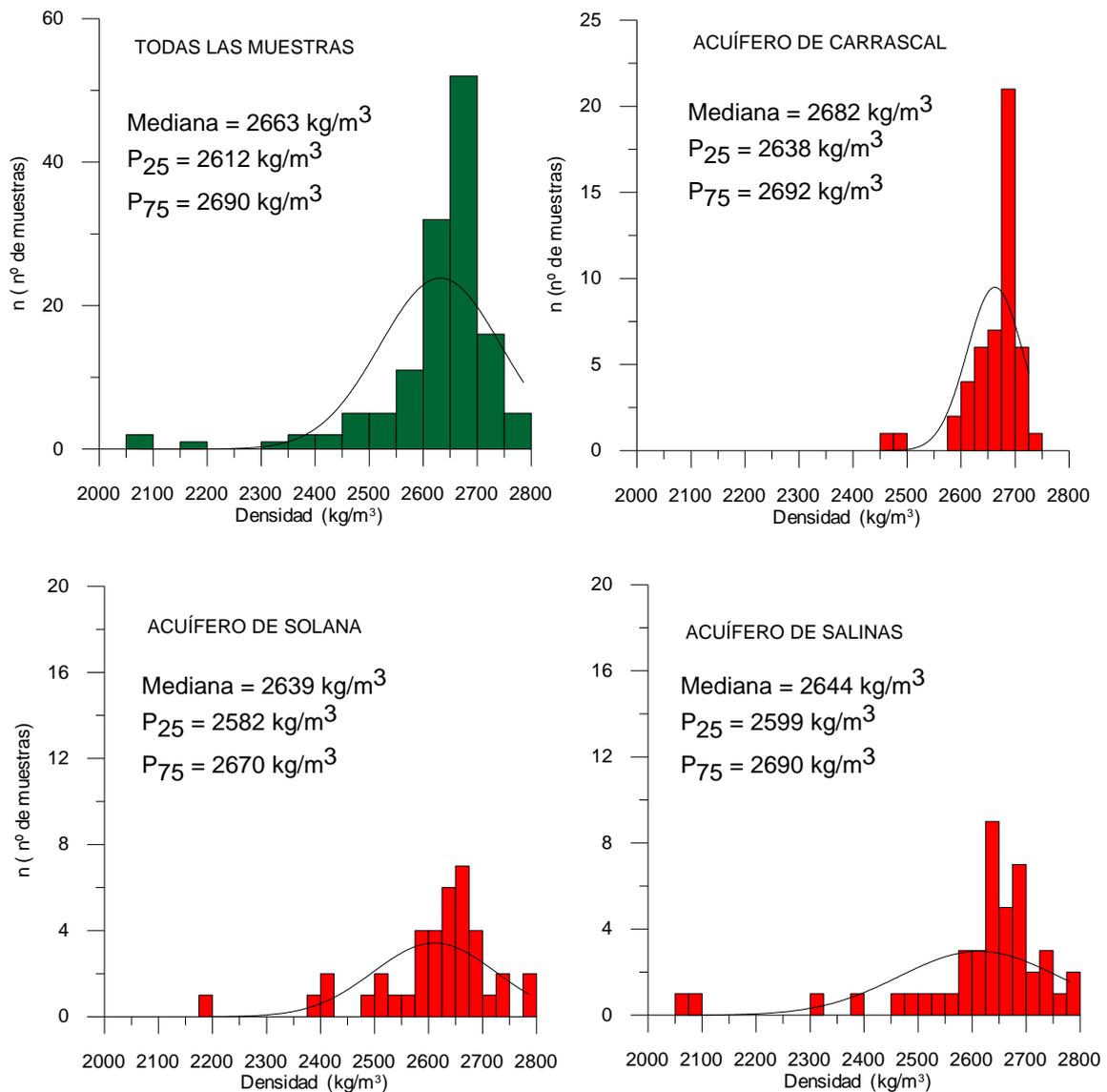


Figura 15. Histogramas de la densidad de la totalidad de las muestras y de las muestras ordenadas según el acuífero de procedencia.

La mayor porosidad se mide en el acuífero de Solana con una mediana del 4% y un primer y tercer cuartil del 1,85 y del 6,95%, respectivamente. En el acuífero de Carrascal es donde se consiguen los menores valores de porosidad, con una mediana del 0,8% y unos percentiles 25 y 75 de 0,35 y 1,40%, respectivamente. Por su parte, las muestras del acuífero de Salinas presentan una porosidad mediana de 3,1%, un percentil 25 de 1,65% y un percentil 75 de 6,1%.

	General		Carrascal		Solana		Salinas	
	Poros (%)	Den (kg/m ³)						
Mediana	2,30	2663	0,80	2682	4,00	2639	3,10	2644
P25	0,80	2612	0,35	2638	1,85	2582	1,65	2599
P75	4,50	2690	1,40	2692	6,95	2670	6,10	2690
Media	3,70	2631	1,35	2662	5,58	2610	4,75	2612
DS	4,66	112	1,50	52	5,66	115	5,02	149
Max	27,00	2786	7,50	2726	27,00	2786	23,40	2782
Min	0,10	2074	0,10	2457	0,50	2178	0,40	2074
N	134	134	51	51	39	39	44	44

Tabla VIII. Estadísticos de posición de los valores de porosidad abierta (%) y de densidad (kg/m³) de las muestras analizadas organizados por acuíferos.

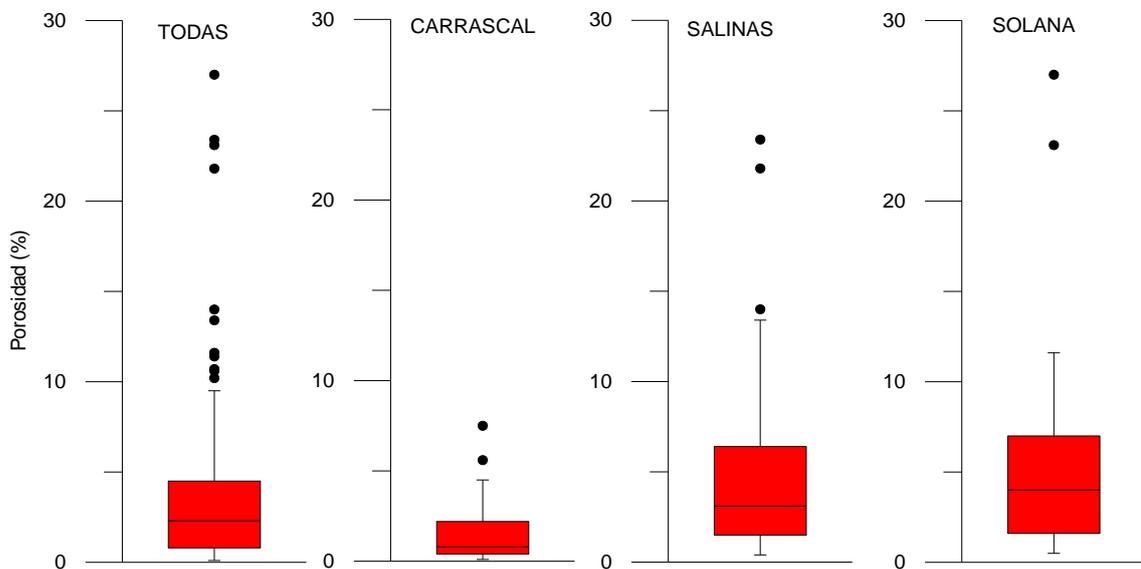


Figura 16. Diagramas de caja-bigote de la densidad totalidad de las muestras y de las muestras ordenadas según el acuífero de procedencia.

En el caso de la densidad, los valores medianos quedan comprendidos entre 2639 kg/m³ del acuífero de Solana y los 2682 kg/m³ del acuífero de Carrascal.

Por otro lado, en la Figura 18 se presenta un diagrama de dispersión en el que se relaciona densidad y porosidad. En esta gráfica, en la que se distinguen las muestras según el acuífero de procedencia, se comprueba la existencia de dos alineaciones de puntos, quedando la más desplazada hacia los mayores valores de densidad compuesta, fundamentalmente en su mayoría, por muestras de naturaleza dolomítica. En esta misma gráfica, los puntos de mayor porosidad medidos en el acuífero de Salinas consisten en unas calizas algales miocenas con grandes poros interpartícula, mientras que las correspondientes al acuífero de Solana se deben a la existencia en la lámina de grandes fracturas abiertas.

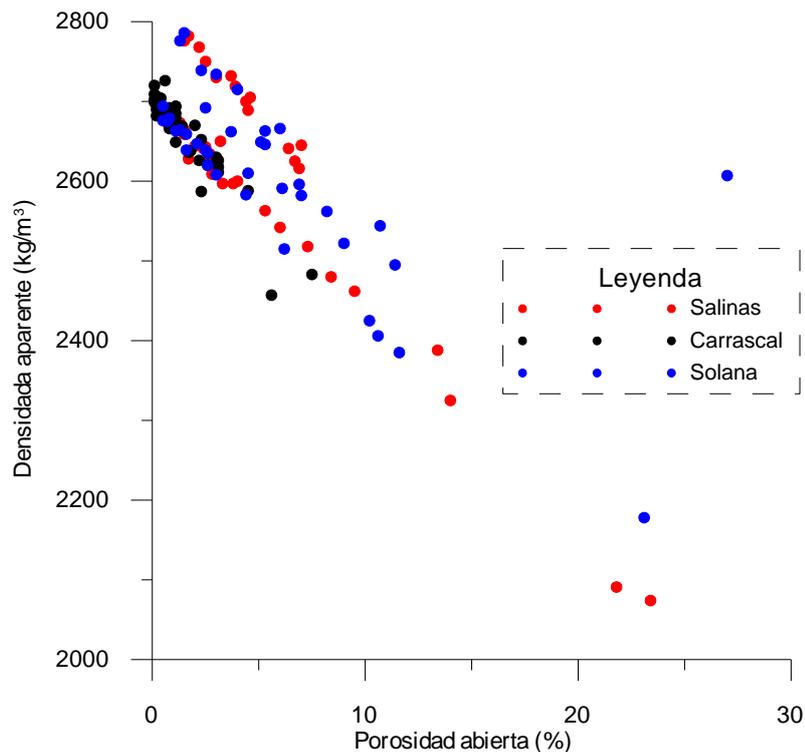


Figura 17. Gráfico de dispersión en el que se relacionan densidad aparente (kg/m^3) y porosidad abierta (%) correspondientes a todas las muestras analizadas, diferenciadas por el acuífero de procedencia.

Cuando se analiza la distribución estadística de la porosidad, según la edad de los materiales analizados, se comprueba que hay un reducido número de muestras de materiales terciarios y jurásicos (Tabla IX), cuestión que aminora la representatividad de los estadísticos de posición que se presentan.

	Oligoceno		Aquitaniense		Cretácico Superior		Cretácico Inferior		Jurásico	
	Poros. (%)	Den. (kg/m^3)	Poros. (%)	Den. (kg/m^3)	Poros. (%)	Den. (kg/m^3)	Poros. (%)	Den. (kg/m^3)	Poros. (%)	Den. (kg/m^3)
Mediana	3,00	2630	0,20	2700	3,35	2662	1,20	2669	2,50	2645
P25	0,80	2611	0,10	2698	1,45	2596	0,80	2634	1,10	2634
P75	3,10	2690	0,30	2705	6,25	2700	2,30	2682	4,00	2693
Media	2,73	2620	0,74	2686	4,71	2631	1,68	2654	2,89	2656
DS	2,51	93	1,27	35	5,02	113	1,34	37	2,21	56
Max	7,50	2720	3,00	2705	27,00	2786	7,30	2694	7,00	2750
Min	0,10	2457	0,10	2623	0,10	113	0,20	37	0,40	2563
N	9	9	5	5	68	68	40	40	9	9

Tabla IX. Estadísticos de posición de los valores de porosidad abierta (%) y de densidad (kg/m^3) de las muestras analizadas, organizados por edad de los materiales muestreados.

En el caso de los materiales de edad Aquitaniense (Figura 19) la porosidad media resulta muy baja, con una mediana del 0,2%, un percentil 25 de 0,1 y un percentil 75 de 0,3%. Los materiales oligocenos presentan una porosidad mediana del 3% con percentiles 25 y 75 de 0,8 y 3,1%, respectivamente. Debe ser destacada la existencia de tres muestras de biocalcarenitas del Mioceno medio, no incluidas en la Tabla IX; muestreadas en Serral-Salinas, con una porosidad comprendida entre el 8 y el 23%.

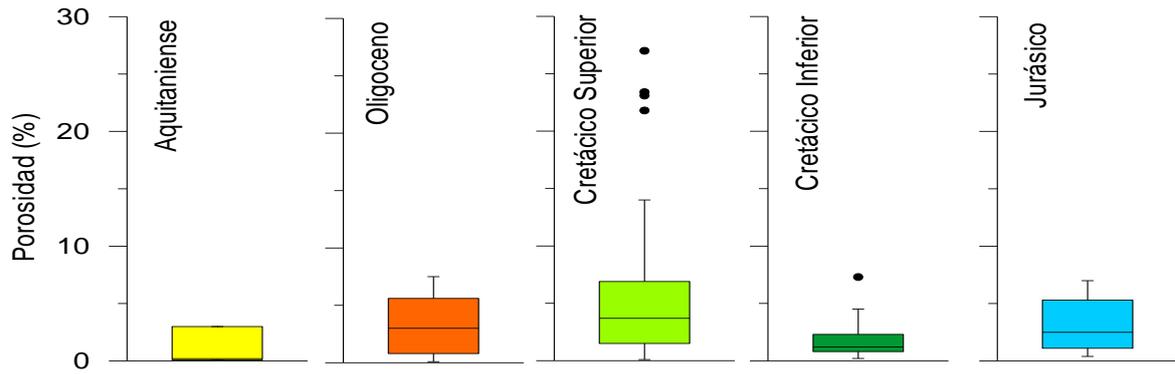


Figura 18. Diagramas de caja-bigote de la porosidad de la totalidad de las muestras y de las muestras por edad.

La mayor porosidad mediana y el mayor rango intercuartílico lo presentan las muestras del Cretácico Superior con valores de 3,35 y 4,8%, respectivamente. Las muestras del Cretácico Inferior presentan valores medianos del 1,20% con percentiles 25 y 75 de 0,8 y 2,3%. Por último, las muestras tomadas en afloramientos jurásicos presentan una porosidad mediana de 2,5% y un primer y tercer cuartil del 1,1 y del 4%, respectivamente. De lo anterior se deduce que en la zona investigada no existe una correlación evidente entre la edad y la porosidad de los materiales carbonáticos. Por su parte, en la Figura 20, se presentan todos los valores de porosidad agrupados por su edad.

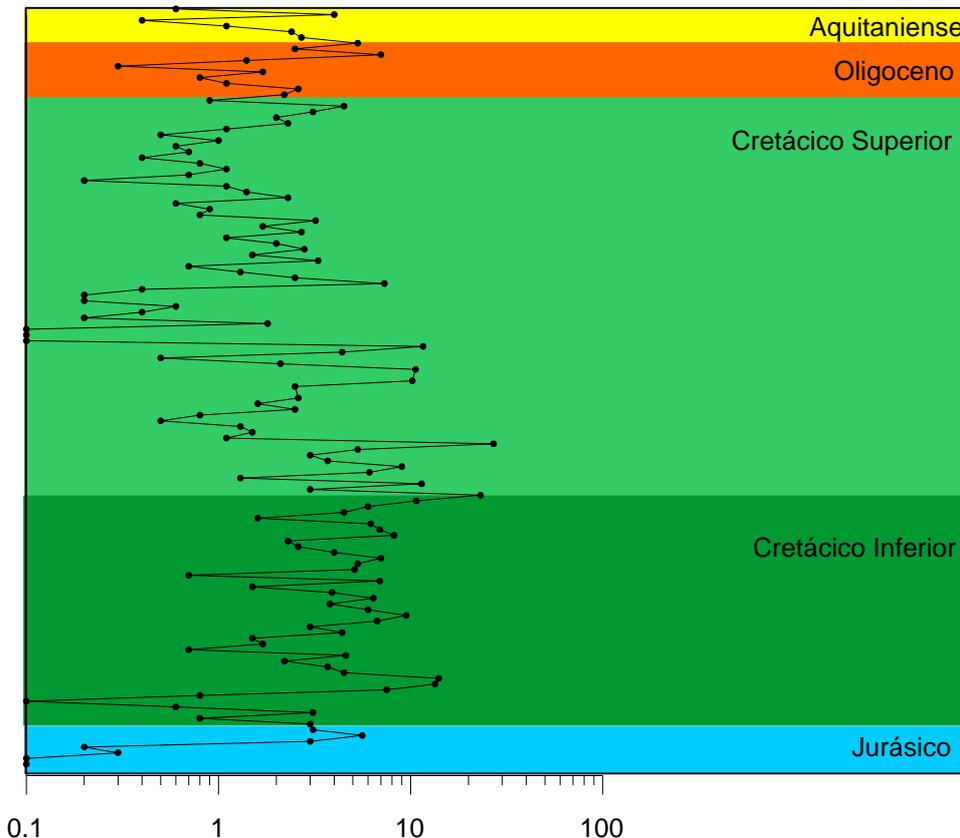


Figura 19. Diagrama de dispersión de la porosidad (% , escala logarítmica) de la totalidad de las muestras agrupadas por edad.

Por último, se ha realizado un diagrama de caja bigote de la porosidad (figura 21) agrupando las muestras según la clase petrofísica de la clasificación de Lucia. Las muestras de la clase 1 presentan una porosidad mediana de 3,1% con percentiles 25 y 75 de 1,55 y 4,85%. Las muestras de la clase 2 tienen una mediana de 1,3% y unos percentiles de 0,65 y 3,65% respectivamente. En el caso de las muestras de la clase 3 el valor mediano de la muestra estadística es de 2,25 con un primer y tercer cuartil de 1,03 y 5,3 %, respectivamente.

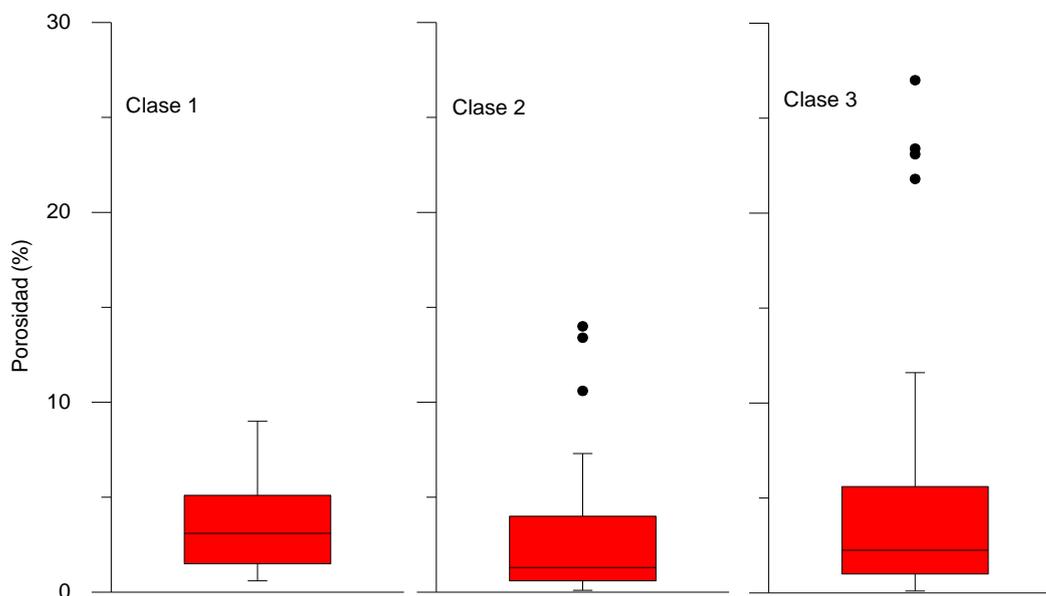


Figura 20. Diagramas de caja-bigote de la porosidad de la totalidad de las muestras agrupadas según la clasificación de Lucia.

Los resultados conseguidos en lo que a la porosidad se refiere son coherentes con los de otros trabajos anteriores en los que se presentan valores medios de porosidad interconectada de rocas carbonáticas de la Cordillera Bética. Así, Pulido-Bosch et al. (2004), consiguen porosidades medias del 3,2 % en 68 muestras de calizas y del 3 % en 30 muestras de dolomías del sector central de la Cordillera Bética. Así mismo, Martos-Rosillo et al. (2013) determinan una porosidad mediana, en 73 muestras de calizas Subbéticas de la Sierra de Estepa (sector central de la Cordillera), del 2,5% con unos percentiles 25 y 75 de 1,44 y 4,16%, respectivamente.

5 CONCLUSIONES

-Se ha establecido una metodología para la modelización geológica 3D de acuíferos profundos. Los aspectos metodológicos novedosos residen en la integración completa de toda la información (geología, cortes estructurales, sondeos, geofísicas diversas) en un modelo 3D con métodos específicos y software especializado (Geomodeller, gOcad), con todas las ventajas (y dificultades) que ello conlleva. Las profundidades mayores de los modelos vienen controladas por sismica de reflexión. Desafortunadamente, la sismica disponible en la Provincia de Alicante presenta los inconvenientes de su falta de densidad y calidad, así como la ausencia de sondeos que faciliten su interpretación, por lo que ésta presenta incertidumbres notables.

-Se han obtenido modelos 3D en 6 conjuntos de estudio; Carrascal-Ferrer (119 km²), Mediodía (280 km²), Solana (360 km²), Cabo Roig – Campo de Cartagena (170 km²), Orcheta (212 km²), Serral-Salinas (266 km²), fundamentalmente de volúmenes carbonatados de edad Cretácica. Estos modelos suponen notables mejoras del conocimiento geológico de las zonas estudiadas. Concretamente, de los mismos se pueden derivar con facilidad: mapas de isobatas y superficies georeferenciadas de techo y muro de formaciones geológicas acuíferas exportables a modelos de flujo y transporte de aguas subterráneas, reservas totales y curvas de explotación del acuífero desde cualquier sondeo que se considere y un buen número de implicaciones relativas a los modelos conceptuales de funcionamiento de los acuíferos estudiados y a las relaciones laterales con otros acuíferos de la región.

-Se han estudiado en el microscopio óptico 131 láminas delgadas. 95 corresponden a calizas y el resto dolomías y calizas parcialmente dolomitizadas. Buena parte de las muestras conservan su textura deposicional, lo que ha permitido la identificación de las microfacies según los esquemas propuestos por Folk y Dunham. En general se trata de calizas y calizas bioclásticas del Cretácico, Oligoceno y Aquitaniense, donde predominan los Mudstone/Packstone y las Clases Petrofísicas 2 y 3 de la clasificación de Lucia. Otras muestras, por el contrario, presentan una dolomitización parcial o generalizada, que ha borrado toda huella de fauna y que da lugar a formaciones azoicas. En el primer caso, cuando acontecen dolomitizaciones parciales, se encuentran las muestras de los paquetes calizos del Cretácico Superior, mientras que las dolomitizaciones generalizadas son frecuentes en las dolomías brechoides del Jurásico o en los tramos dolomíticos del Cretácico Superior. Se trata de Dolograinstones/Dolopackstone con Clase Petrofísica 1-2. Las microfracturas, aunque frecuentemente presentes en una mínima proporción con respecto a la porosidad interpartícula, aparecen parcial o totalmente selladas con precipitados tardíos, y por tanto no inciden decisivamente sobre la porosidad total de la roca, salvo excepciones.

La porosidad interpartícula, en algunos casos, está presente como vacuolas en la matriz, con formas irregulares y de carácter accesorio pudiendo indicar una porosidad local secundaria formada en una etapa tardía de disolución. En otros caso, por el contrario, aparecen de forma generalizada y las porosidades abiertas medidas en laboratorio así lo corroboran, dando valores anómalamente altos y que no corresponden a ninguna causa local ni puntual.

-La porosidad medida en laboratorio se ha determinado en 134 muestras. La mediana y los percentiles 25 y 75 de la muestra estadística son de 2,3, 0,8 y 4,5%, respectivamente. Las dolomías ensayadas presentan una porosidad mediana de 3,8%,

frente al 1,75% de las calizas. Los valores que resultan son coherentes con la escasa información disponible al respecto, en materiales carbonatados de la Cordillera Bética.

Entre los resultados que se consiguen del estudio petrofísico realizado cabe destacar dos aspectos. El primero, se relaciona con la buena capacidad de almacenamiento de los tramos dolomitizados del Cretácico Superior (trilogía dolomítica), con respecto al resto de niveles acuíferos. No obstante, y pese al escaso número de muestras analizado, también debe ser destacada la capacidad de almacenamiento de las dolomías jurásicas. En segundo lugar, debe ser subrayado que la mayoría de las dolomías estudiadas se pertenece a la clase 1 de la clasificación de Lucia (de permeabilidad superior a las de otras clases, para los mismos valores de porosidad). De lo anterior, se deduce que estas rocas van a presentar altos valores de permeabilidad intrínseca y por tanto una mayor facilidad de transmisión de flujo desde la matriz de la roca a las fracturas interceptadas por los sondeos de explotación.

-Por tanto, la elaboración metodológica ha supuesto una nueva construcción de los modelos de subsuelo los acuíferos estudiados, en particular por lo que afecta al cretácico superior, que puede considerarse el objetivo hidrogeológico más general de la provincia de Alicante. Los nuevos datos geológicos integrados en el modelo geológico de tales acuíferos, además de proporcionar unos valores aproximados de reservas acuíferas totales, permiten a los gestores y planificadores del agua disponer de un mejor conocimiento de la estructura de cada acuífero. Los modelos 3D generados indican posibles conexión laterales con otros acuíferos, sirven para construir futuros modelos matemáticos de flujo y transporte, con los que evaluar las reservas potencialmente explotables, además de sugerir los sectores más favorables para la captación de reservas de agua en situaciones de emergencia. Las incertidumbres y calidades de la modelación 3D son variables, aunque en general, puede estimarse en media-alta en casi todos los casos estudiados.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Informes del proyecto: DESARROLLOS METODOLÓGICOS EN GEOLOGÍA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS PROFUNDOS DE LA PROVINCIA DE ALICANTE (HIDROPROAL):

Marín Lechado, C., Martos Rosillo, Fernández Leyva, C., S., Pedrera Parias, A., García Lobón, J.L., Galindo Zaldívar, J. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE CARRASCAL-FERRER Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. (nº Informe SID por asignar, 130 pag).

Rey Moral, C., García Lobón, J.L., Marín Lechado, C., Reguera García, M.I., Jiménez Sanz, A. 2013. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE MEDIODÍA Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64104, 61 pag.). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp

Marín Lechado, C., Martos Rosillo, S., García Lobón, J.L., Ruiz Constán, A., Ibarra Torre, P.I., Rey Moral, C, Fernández Leyva, C. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE SOLANA-ONTENIENTE-VOLCADORES Y EVALUACIÓN DE LAS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. (nº Informe SID por asignar, 116 pag.).

Pérez Ortiz, I., García Lobón, J.L., Marín Lechado, C., Rey Moral, C., Martín León, J. 2013. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG Y CARTOGRAFÍA DE SUBSUELO DEL BASAMENTO TRIÁSICO DEL ENTORNO CABO ROIG-CAMPO DE CARTAGENA. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64105, 67 pag.). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp

García Lobón, J.L., Reguera García, M.I., Rey Moral, C., Pérez Ortiz, I., Martín León, J. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LOS ANTICLINALES DE ORCHETA (Hoja 847, Villajoyosa; Alicante). Fondo Documental del IGME. (nº Informe SID por asignar, 65 pag.).

Marín Lechado, C., Martos Rosillo, S., García Lobón, J.L, Fernández Leyva, C. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO SERRAL-SALINAS Y EVALUACIÓN DE LAS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. (nº Informe SID por asignar, 116 pag.).

2. Bibliografía referenciada en los Informes del proyecto HIDROPROAL

- 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 CO₂ 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.
- Banks, C.J. and Warburton, J. 1991. Mid-crustal detachment in the Betic system of southeast Spain. *Tectonophysics* 191, 275–289.
- 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.
- Calcagno, P., Courrioux, G., Guillen, A., Chilès, J.-P., 2008. Geological modeling from field data and geological knowledge. Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the earth and planetary interiors*, 171 147–157.
- Chiles, J. P., Aug, C., Guillen, A., and Lees, T., 2004. Modelling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D from Structural Data: The Potential-Field Method. Workshop Proceedings: Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, p. 313-320. Perth, WA, 22-24 November 2004 (<http://www.minmet.uq.edu.au/~bryan/>).
- 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 abastecimientos públicos, para la información continua a los municipios. 121 pp.
- DPA. 2010a. Mapa hidrogeológico de la Provincia de Alicante. 1ª Edición. Escala 1/150.000. Diputación Provincial de Alicante, Alicante, 40 pp.
- DPA. 2010b. Adaptación del modelo de flujo numérico de la simulación del flujo del embalse subterráneo Solana al sistema de información hidrogeológica de la Diputación de Alicante. Determinación de las reservas útiles dinámicas y garantía de suministro.
- DPA. 2010c. 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. Acuífero Serral-Salinas.
- DPA-IGME. 1989. Estudio Hidrogeológico de la subunidad Mediodía (Alicante). Informe nº 31933. 210 pp. http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/Sid.htm
- 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.
- 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. 2007a. Murillo Diaz, J.M., Romero Crespo, P., Elorza Tenreiro, F.J., Hornero Diaz, J., Garcia Arostegui, J.L., Rodriguez Estrella, T. Actualización de la geometría del acuífero de Cabo Roig. Caracterización litoestratigráfica de los sondeos realizados en la zona sur. (Informe SID nº 63434). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- DPA-IGME. 2007b. Murillo Diaz, J.M., Romero Crespo, P., Elorza Tenreiro, F.J., Hornero Diaz, J., Garcia Arostegui, J.L., Rodriguez Estrella, T. Modelo de flujo subterráneo con densidad variable para simular la intrusión marina en el acuífero de Cabo Roig. (Informe SID nº 63433). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- DPA-IGME. 2007c. 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. 2009. Ballesteros Navarro, B.J., Rodríguez Hernández, L., Fernández Mejuto, M., Domínguez Sánchez, J.A., Marín Carrillo, I., Padilla Benítez, A., Castillo Pérez, E. Determinación de las reservas útiles de los acuíferos Pinar de Camús, Mediodía, Orba y Beniarbeig. 223 pp.
- DPA-IGME, in prep., 2013. Atlas hidrogeológico de la Provincia de Alicante.
- 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 CO₂ sequestration: assessing the potential of the Devonian Carbonate Nisku formation of Central Alberta. . Oil & Gas Science and Technology, 66.
- Farrán, M. 2007. IMAGE2SEGY: Una aplicación informática para la conversión de imágenes de perfiles sísmicos a fichero en formato SEG-Y. <http://www.icm.csic.es/geo/gma/graf2segy.html>
- 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 CO₂ en España”. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64055). Madrid. 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.
- Guillen, A., Calcagno, P., Courrioux, G., Joly, A., Ledru, P., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge, Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 171, 158–169.
- 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. 1972. Mapa geológico nacional. Hoja MAGNA nº 935; Torreveja. http://intranet.igme.es/intranet/infor_geocientifica/Ingeoes/cartografia/magna50.asp?hoja=935&bis=
- IGME. 1980. Mapa geológico nacional. Hoja MAGNA nº 847- Villajoyosa. http://intranet.igme.es/intranet/infor_geocientifica/Ingeoes/cartografia/magna50.asp?hoja=935&bis=
- IGME. 1986. Proyecto para el establecimiento de norma para la explotación de los acuíferos en la zona de Gandía-Denia-Javea y Cabecera del Vinalopo (1984-1985). Instituto Geológico y Minero de España Madrid.
- IGME. 1988. Las aguas subterráneas en la Comunidad Valenciana. Uso, calidad y perspectivas de utilización.
- IGME. 1989. Aragón Rueda, R. and Rodriguez Estrella, T. Geometría de los acuíferos del Campo de Cartagena. Murcia. Informe del centro de documentación del IGME. (Informe SID nº 33181). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/GeoBuscador/images/clear.gif
- IGME. (1990). Aragón Rueda, R., Sánchez Medrano, R., Rodriguez Estrella, T., Mora Cuenca, V. Estudio de la intrusión marina en acuíferos costeros de Murcia y alicante (zonas de estudio: águilas-Cala Reona; Cope-Cala Blanca; Campo de Cartagena; Cabo Roig; Torreveja; San Juan-Campello; Villajoyosa; Benidorm-Altea). Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 33186). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- IGME. 1994a. Hornero Diaz, J., Aragón Rueda, R., Rodriguez Estrella, T., Sánchez, R., Martinez, L., Mora, V. Estudio hidrogeológico del Campo de Cartagena (2ª fase). (Informe SID nº 33195). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- IGME. 1994b. Aragón Rueda, R. and Rodriguez Estrella, T. Las aguas subterráneas del Campo de Cartagena (Murcia). (Informe SID nº 33197). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- IGME. 1999. Prospección geoelectrica en Onteniente (Alicante). Integración de información sísmica y gravimétrica. Informe IGME.
- IGME. 2008. Mapa geológico de España 822 (Benisa), escala 1:50.000. <http://intranet.igme.es/>

intranet/infor_geocientifica/Ingeoes/cartografia/magna50.asp?hoja=822&bis=

- IGME. 2010. "Plan de Almacenamiento geológico de CO2 del IGME – Plan ALGECO2", Volumen V - Geología del Subsuelo. Fondo Documental del IGME, (Informe SID nº 64052). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- IGME. 2010. "Plan de Almacenamiento geológico de CO2 del IGME – Plan ALGECO2", Volumen IV-1 Cadenas Béticas y Cuenca del Guadalquivir - Geología. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64051). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- IGME-DPA. 1982. Las aguas subterráneas de la provincia de Alicante. Carrell, J. (2010). X-SectionXacto. <http://resources.arcgis.com/es/gallery/file//geoprocessing/details?entryID=C83C3388-1422-2418-7F10-B4D3DF5F1EE6>
- IGME-DPA. 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.
- IGME-DPA. 2003a. Aplicación de un modelo matemático para simular los recursos hídricos en el acuífero Solana (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Instituto Geológico y Minero de España-Diputación Provincial de Alicante.
- IGME-DPA. 2003b. Determinación de las reservas útiles en los acuíferos de abastecimiento público en Alicante: Acuíferos Solana, Maigmó, Sella, Beniardá-Polop y Solana de la Llosa. Informe IGME h2.020.03
- IGME-DPA. 2006. Estudio del funcionamiento hidrogeológico y simulación numérica del flujo subterráneo en los acuíferos carbonatados de Solana y Jumilla-Villena. (Alicante y Murcia). 117 pp.
- IGME-DPA. 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
- IGME-ENAGAS. 1995. Viabilidad de almacenamientos de gas. Hojas 72-73. Elche-Alicante (1:200.000). Resultados del análisis de la información geológica, hidrogeológica, minera y geofísica. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 25089). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- IGME, IPF, CGS e IBS. 2013. Proyecto **INNSONDA**: Desarrollo de nuevas tecnologías

de investigación del subsuelo mediante perforación de sondeos profundos y su aplicación a la prospección de almacenes de CO₂ y recursos geotérmicos de media y alta entalpía.

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.

Lanaja, J.M. 1987. Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España.

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.

Martínez Abad, J.L. and Querol Muller, R. 1990. Documentos sobre la geología del subsuelo de España- Vol II- Béticas-Granada_guadalix/Baza-Murcia/Almería-Alboran (Informe SID nº 29037).

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.

Martínez del Olmo, W. 2008. Posibles almacenamientos geológicos de CO₂ en España. En “El futuro del carbón en la política energética española”, 225-246. Fundación para estudios de la energía.

- Ministerio de Industria, Servicio Técnico Hidrocarburos. 1968. Informe final sondeo Benejuzar-1. Código Archivo Técnico Hidrocarburos nº 852.
- Ministerio de Industria, Servicio Técnico Hidrocarburos. 1968. Informe final sondeo San Miguel de Salinas-1. Código Archivo Técnico Hidrocarburos nº 50475.
- Ministerio Industria, Servicio Hidrocarburos. 1970. Log final sondeo La Mata-1. Código Archivo Técnico Hidrocarburos nº 1153.
- Ministerio de Industria, Servicio Técnico Hidrocarburos. 1970. Informe final sondeo San Miguel de Salinas-2. Código Archivo Técnico Hidrocarburos nº 50484.
- Murillo Diaz, J.M., Lopez Geta, J.A., Rodríguez Hernández, L. 2010. Desarrollo sostenible, uso conjunto y gestión integral de recursos hídricos: estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante. ISBN. 978-84-96979-40-6.
- Nelson, R.A. 2001. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. 2nd ed Editorial, Houston. 322 pp.
- Pedraza, A., Marín-Lechado, C., Galindo-Zaldívar, J., García-Lobón, J.L. 2013. Control of preexisting faults and near-surface diapirs on geometry and kinematics of fold-and-thrust belts (Internal Prebetic, Eastern Betic Cordillera). *Journal of Geodynamics*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2013.09.007>
- 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 modeling. *Journal of Hydrology*, 301: 287-295.
- Roca, E., Sans, M., Koyi, H. 2006. Polyphase deformation of diapiric areas in models and in the eastern Prebetics (Spain). *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 90, 115–136.
- Rodríguez-Estrella, T. 1977. Síntesis geológica del Prebético de la Provincia de Alicante. *Tectónica, Bol. Geol. Minero*, v. 88, pp. 273-299.
- Rodríguez Estrella, T. and Lillo Carpio, M. 1992. Geomorfología del Mar Menor y

sectores litorales contiguos (Murcia-Alicante). II Reun. Nac. de Geomorf. Editado por López Bermúdez, Conesa y Romero en Estudios de Geomorfología de España. Soc. Esp. de Geomorf. pp. 749-787. Murcia.

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.

SIGECO. Geological Information, System, Geophysical database [on line], (2012). IGME. Editor: J. Navas. Available in: <http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htm>.

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.

U.S. Salinity laboratory. Norma para clasificación aguas en base a salinidad (Conductividad eléctrica) (1954).

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.