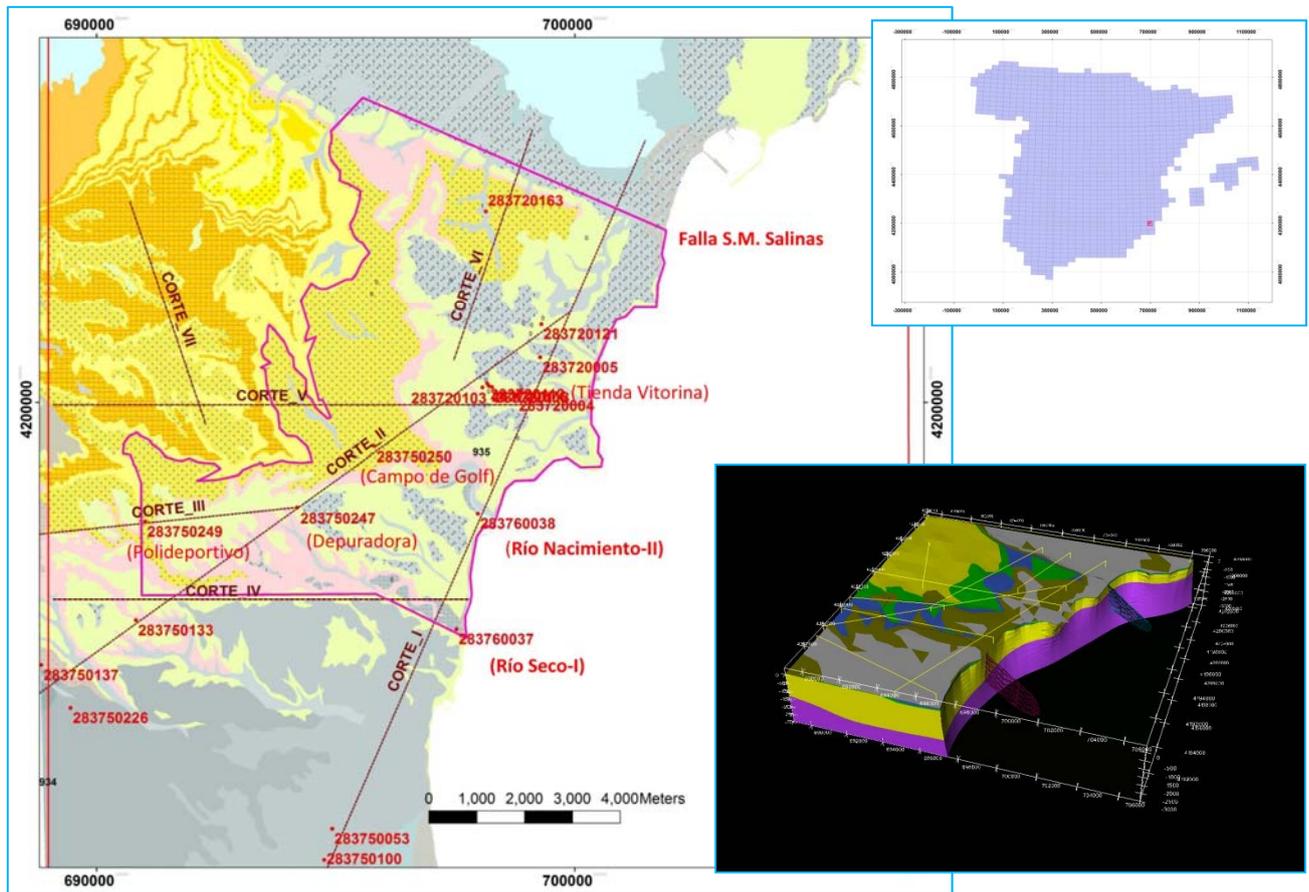


DESARROLLOS METODOLÓGICOS EN GEOLOGÍA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS PROFUNDOS DE LA PROVINCIA DE ALICANTE (HIDROPROAL)

MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG Y CARTOGRAFÍA DE SUBSUELO DEL BASAMENTO TRIÁSICO DEL ENTORNO CABO ROIG-CAMPO DE CARTAGENA



Noviembre de 2013

Israel Pérez Ortiz
José Luis García Lobón
Carlos Marín Lechado
Carmen Rey Moral
Juliana Martín León

ÍNDICE

0. RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Justificación del estudio y antecedentes.....	9
1.2 Localización.....	9
1.3 Objetivos.....	10
2. METODOLOGÍA DE LA MODELIZACION EN 3D. SOFTWARE UTILIZADO.....	12
3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA	14
3.1 Estratigrafía	14
3.2 Estructura geológica	16
3.3 Cortes y Sondeos Hidrogeológicos	17
3.4 Hidrogeología	20
4. SONDEOS DE PETRÓLEO Y LÍNEAS SÍSMICAS DEL ENTORNO CABO ROIG.....	23
4.1. Sondeos de petróleo.	23
4.2. Líneas sísmicas.....	25
5. CONSTRUCCIÓN Y CALIDAD DEL MODELO 3D. CARTOGRAFÍA DE BASAMENTO	28
5.1. Superficies de Techo y Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig	30
5.2. Cartografía de subsuelo del Techo del Triásico en el entorno de Cabo Roig (Torrevieja-Campo Cartagena). Posibilidades de almacenamiento geológico.....	34
6. ACTUALIZACIÓN DE RESERVAS HIDROGEOLÓGICAS	41
6.1. Datos petrofísicos	41
6.2. Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas	41
6.3. Curvas de explotación	43
7. CONCLUSIONES. IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS DEL MODELO GEOLÓGICO 3D.	44
8. REFERENCIAS	48
ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACION DIGITAL ENTREGADA.....	53
1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL	53
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE	54
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO CABO ROIG – MAR MENOR.....	57
4. LISTADO DE FICHEROS	59

ÍNDICE FIGURAS

<i>Figura 1. Hoja MAGNA nº 935 Torrevieja (Alicante). Localización y límites estructurales del acuífero de Cabo Roig (en rojo). La geología representada corresponde a materiales cuaternarios en azul oscuro y gris; amarillos claros para el Plioceno (acuífero); amarillos tramados para el Mioceno Superior (IGME, 1972).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Esquema de la metodología utilizada para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de Cabo Roig. En cada uno de los pasos se detalla el software utilizado. Explicación en texto.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. Columna sintética del área del acuífero de Cabo Roig. Se indican mediante barras las superficies del modelo 3D (techo Triás, muro y techo de P1). Se representan también los límites de unidades de estratigrafía sísmica inferiores, usadas en el proyecto ALGECO2 (unidades I a IV).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4. Esquema de situación de los cortes geológicos utilizados en la modelización 3D del acuífero de Cabo Roig, sobre mapa geológico de la zona de estudio (GEODE). Se indican el límite del acuífero de Cabo Roig, la situación de sondeos y algunas referencias geográficas.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5. A color: cortes hidrogeológicos I y II del área de Cabo Roig computados por 3D Geomodeller; blanco y negro, mismos cortes según informe DPA-IGME, 2007^a.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6. Relieve en sombras de la zona del Acuífero Cabo Roig (MDT de 100*100m) En amarillo: trazas de los cortes usados en la confección del modelo 3D.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7. Evolución piezométrica, años 1996-2012. Piezómetro 2837-2-0096, ubicado en figura 8.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8. A la Izquierda: mapa de índice de salinidad según norma Riverside (US Salinity Laboratory, 1954). Rojo indica salinidad extrema (intrusión marina); azul claro, salinidad media (agua apta para uso agrícola y doméstico). Modificada del informe “Actualización de la geometría del acuífero de Cabo Roig y caracterización litoestratigráfica de los sondeos realizados en la zona sur del acuífero. (DPA-IGME, 2007a)”.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9. Localización de los sondeos de petróleo y secciones sísmicas usados para elaborar el mapa de Isobatas del techo Triásico en el área de Cabo Roig. Se engruesan las tres secciones, S-82-51, S-84-66S, y S-86-90 que cruzan Cabo Roig y aparecen interpretadas en el apartado 4.2.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 10. Correlación entre los sondeos profundos de exploración de hidrocarburos en la zona Torrevieja-Mar Menor. (Fuente: Informe ALGECO2, Volumen V Geofísica, IGME 2010, según informes finales de los sondeos. Ministerio de industria, Códigos Archivo Técnico hidrocarburos: San Miguel de Salinas-1 ATH 50475; San Miguel de Salinas-2, ATH 50484; Benezuzar-1 ATH 852; y columna sintética de Rojas-1 en “Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España, pag 52” (J.M. Lanaja.1987).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11. Sección S-82-51, subparalela a la costa (figura 9), con horizontes de estratigrafía sísmica interpretados y calados en S. Miguel de Salinas-1 (en azul) 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.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12. Líneas S-84-66S (arriba, con sondeo de calado) y S-86-90 (abajo). Se indican techos de Unidades. Rojo: muro (independiente) del acuífero Plioceno en modelo 3D Geomodeller.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 13. Modelo geológico 3D (Geomodeller) de Cabo Roig (mismos 7 cortes que en figura 4).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14. Muro del acuífero del Plioceno Inferior de Cabo Roig (explicación en texto).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15. Mapa isobatas del Techo (izquierda) y Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig (perímetro en rosa). En rojo: límites del modelo 3D (retícula cada 2 km).....</i>	<i>31</i>

<i>Figura 16. Zona de estudio (recuadrada en rojo: Torrevieja-Campo Cartagena). Mapa geológico simplificado (según Martínez del Olmo, 2008), sondeos y líneas sísmicas.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17. Mapa isobatas Techo Triásico. Se indican la líneas sísmicas usadas en su interpretación. La extensión corresponde al recuadro rojo de la figura 16. Explicación en texto.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 18. Isobatas y estructuras de basamento Triásico sobre mapa geológico 1:50.000 de la zona de estudio (Geode). La extensión corresponde al recuadro rojo de la figura 16. Explicación en texto. Las líneas 84-64, 84-66 y 84-68, aparecen en figs 19-22.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 19. Línea 84-64(34.8Km.), caracterizando la geometría de la Cuenca del Campo de Cartagena, justo al sur de Cabo Roig, entre la línea de costa y el antiforme de Torremendo.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 20: Línea S-84-66-N (14.6Km). Se observa estructura antiformal en las proximidades de Benejuzar-I. Se indica la posición propuesta para el sondeo geotérmico Insonda. IGME, IPF, CGS e IBS (2013).....</i>	<i>38</i>
<i>Figuras 21. Línea S-84-68. (22 Km) Se observa estructura antiformal en las proximidades de Rojas -I. La Mata-I corta Trias a 759m (Log final, Ministerio Industria 1970, Servicio Hidrocarburos, 1153).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22. Columnas sintéticas obtenidas de los sondeos exploratorios (datum base de los yesos messinienses). Correlación con las Formaciones definidas en superficie (Sierra de Carrascoy; según Martínez del Olmo, 2008).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 23. Curvas de reservas del acuífero Plioceno de Cabo Roig obtenidas a partir del modelo geológico 3D del acuífero.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24. Curvas de explotación del acuífero Cabo Roig desde un posible sondeo situado al este de Campo de Golf (coordenadas del sondeo X=697250; Y=4198800).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 25. Detalle del modelado del acuífero Cabo Roig en zona de la Falla de Río Seco.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26. Mapas de isobatas del Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig según el presente estudio y el de DPA-IGME 2007a (Remallado en 2013).....</i>	<i>47</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla I. Resumen de datos usados durante el proceso de modelación 3D del acuífero de Cabo Roig.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla II. Sondeos hidrogeológicos (18, DPA-IGME, 2007a) usados en la elaboración de cortes geológicos para la construcción del modelo 3D del acuífero de Cabo Roig. Se indican profundidad, coordenadas, corte en el que se emplean y litología de final del sondeo.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla III. Unidades Neógenas de estratigrafía sísmica del área de Cabo Roig. A/S: Almacén/ Sello.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla IV. Secciones sísmicas del área de Torrevieja-Cabo Roig (268,64 km).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla V. Superficies de Referencia modeladas en 3D Geomodeller.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla VI. Diferencias entre la cota de corte en sondeo y en mapa de isobatas del techo del acuífero Plioceno de Cabo Roig (15 sondeos). En rojo, las diferencia más significativas.....</i>	<i>32</i>

<i>Tabla VII. Diferencias entre la cota de corte en sondeo y en mapa de isobatas del muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig (17 sondeos).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla VIII. Diferencias entre la cota de corte en sondeo y en mapa de isobatas sísmico del Techo del Triásico en el entorno de Cabo Roig.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla IX: Resumen de estructuras de almacenamiento. Espesores netos estimados a partir de sondeos de petróleo. Porosidades según diagráfias del sondeo Benejuzar-1 (Plan ALGECO2, IGME, 2010). Por ejemplo, la capacidad de CO2 correspondiente a un factor de eficiencia del 20% (ratio de desplazamiento del agua de formación por CO2) y densidad del CO2 de 0.5 Tm/m3, sería de unos 120 millones de Tm en la estructura de basamento, y de 3 y 1,5 millones de Tm, respectivamente, en las de Benejuzar- Rojales y A. Hurchillo.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla X. Resumen de reservas del acuífero Cabo Roig. Reservas dadas por el modelo 3D del acuífero (gOcad) para porosidades del 1% y 3%, respectivamente, en todo el acuífero y en la zona explotable menos salinizada.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla XI. Ajustes polinómicos de las curvas de reservas del acuífero Cabo Roig (figura 25) para la zona explotable..</i>	<i>43</i>
<i>Tabla XII. Reservas explotables del acuífero Cabo Roig desde un hipotético sondeo situado al este de Campo de Golf.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla XIII. Reservas totales, aptas y salinizadas explotables, y explotables desde sondeo zona sur del acuífero.....</i>	<i>46</i>

RESUMEN

El acuífero de **Cabo-Roig** se ubica en la comarca del Bajo Segura. Pertenece al dominio hidrogeológico nº 28 Campo de Cartagena-Cabo Roig, dominio más meridional de la provincia de Alicante, limitando territorialmente con la Comunidad Autónoma de Murcia. El acuífero de Cabo Roig cuenta con una superficie, dentro del dominio continental, próxima a los 61 km²; de los cuales unos 18 km² son afloramientos permeables. El acuífero ocupa la zona costera comprendida entre la urbanización La Veleta y la rambla del río Seco, al noreste del acuífero del Campo de Cartagena. Está constituido por areniscas y calcarenitas del Plioceno inferior, con una potencia que varía entre 10 y 100 m, apoyadas sobre las margas verde-grises de edad Mioceno Superior (Messiniense), por discordancia erosiva y angular y selladas por las margas blancas del plioceno superior.

En este informe se presentan los **resultados del modelo geológico 3D** del acuífero Plioceno de **Cabo Roig** y de su sustrato, realizado con el código 3D Geomodeller. Este modelo se ha construido con los objetivos de conocer su volumen total de reservas y de establecer las relaciones geométricas entre las diferentes unidades geológicas diferenciadas. El modelo geológico 3D consta de cuatro unidades geológicas y tres fallas principales, cuya cartografía de Subsuelo se ha obtenido a partir de cortes geológicos, apoyados en la recopilación de 18 columnas de sondeos de investigación hidrogeológica y la información estructural derivada de la interpretación sísmica aplicada a los objetivos de este estudio. Todo ello ha contribuido a conseguir un nuevo avance en el conocimiento geológico e hidrogeológico del acuífero y de su sustrato mioceno y triásico. En la actualidad, 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.

Los nuevos datos geológicos integrados en el modelo geológico del acuífero de **Cabo Roig**, además de proporcionar unos valores aproximados de reservas totales de agua, permiten a las administraciones gestoras y planificadoras del agua disponer de un mejor conocimiento de la estructura del acuífero. Por otro lado, las capas de información georeferenciadas de techo y muro de las distintas unidades geológicas serán fundamentales para poder construir futuros modelos matemáticos de flujo y transporte, con los que evaluar las reservas potencialmente explotables, además de para conocer los sectores más favorables para la captación de reservas de agua en situaciones de emergencia.

Adicionalmente, la consideración de 6 sondeos de petróleo y la interpretación de datos geofísicos de exploración petrolera, entre los que cabe destacar varios perfiles de sísmica de reflexión de las campañas S-82; S-84 y SP-84; S-85 y S-86, ha permitido obtener la cartografía de subsuelo del basamento triásico del entorno Cabo Roig (desde Torrevieja al Campo de Cartagena), lo que proporciona el espesor sedimentario de la cuenca terciaria suprayacente y una superficie de referencia triásica que ayudará a la evaluación tanto de eventuales recursos geotérmicos del área, así como del uso de dicho sustrato triásico como reservorio de almacenamiento de sustancias y flujos de rechazo de diversos procesos industriales de tratamiento de efluentes.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del estudio y antecedentes

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

Dado que no es posible gestionar bien un recurso si no se sabe de cuanto se dispone, la DPA inició, años atrás, una línea de investigación encaminada a mejorar el conocimiento de la reservas de agua subterránea en la provincia de Alicante, realizando numerosos trabajos en diferentes acuíferos de la provincia. Todo este esfuerzo ha contribuido, sin duda, a que Alicante sea una de las provincias españolas en las que más se ha avanzado en este sentido.

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**”, dedicada a la evaluación, mediante metodologías de modelación geológica 3D, de reservas hídricas ante la previsión de fenómenos extremos, cuyos resultados parciales, en el Área de Cabo Roig, se presentan aquí.

Es conocida la reciente incorporación de los modelos geológicos 3D en la investigación hidrogeológica, que ha contribuido a conseguir un notable avance en el conocimiento de los acuíferos estudiados, encaminado a la mejora en la evaluación y la gestión de los recursos hídricos subterráneos (Gill et al. 2011, Robins et al. 2004, Ross et al. 2005, Wu et al. 2008). En relación con lo anterior, debe destacarse la mejora del conocimiento del subsuelo profundo de la provincia de Alicante, adquirido por el IGME, gracias a los proyectos de investigación realizados con motivo de la búsqueda y caracterización de estructuras geológicas para almacenamiento geológico de CO₂ (García Lobón, et al. 2011).

En esta Memoria se presenta una metodología para la evaluación de reservas y los resultados de su aplicación en el acuífero de Cabo Roig. Su selección ha intentado cubrir cierto espectro de posibilidades referentes a la disponibilidad de información para la elaboración de modelos geológicos 3D. Desde el punto de vista metodológico, el acuífero investigado en este caso representa a acuíferos costeros, cuyos recursos hídricos han sido objeto de una explotación intensiva, fundamentalmente para riego y abastecimiento. En el acuífero de Cabo Roig, los niveles piezométricos se sitúan a cotas por debajo del nivel del mar y la salinidad es extrema en una franja paralela a la costa de unos 2 km, con avance de la intrusión marina provocando abandono de captaciones por la salinización.

1.2 Localización

El acuífero de **Cabo Roig** se encuentra situado en el extremo meridional de la costa de la provincia de Alicante, al sur de las salinas de Torrevieja (figura 1). Se encuadra dentro de las Cordilleras Béticas, concretamente en la cuenca postectónica del Campo de Cartagena, perteneciente al bajo Segura. Con una extensión de unos 61 km² (~7x8.5 km), de los que un 30% son afloramientos permeables, el acuífero está delimitado como sigue:

- **Límite norte:** coincidente con la falla de San Miguel de Salinas
- **Límite este:** franja costera que une Punta Prima con el río Seco.
- **Límite oeste:** contacto entre las areniscas del Plioceno (en amarillo en Magna nº 935, figura 1) y las margas Andalucenses que afloran desde San Miguel de Salinas al NW hasta río Seco, al SW.
- **Límite sur:** falla del río Seco siguiendo el cauce del río Seco.

Se ha incluido el Acuífero de **Cabo Roig** en la actividad de “**Desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo para la caracterización de recursos hidrogeológicos profundos de Alicante**”, con su consiguiente modelación en 3D porque:

1) A diferencia del resto de los acuíferos estudiados en dicha actividad, se trata de un reservorio somero y de naturaleza no carbonática. La información hidrogeológica previa es abundante: la DPA ha realizado una serie de estudios hidrogeológicos en esta Subunidad, pe, consúltense *Actualización de la geometría del acuífero de Cabo Roig. Caracterización litoestratigráfica de los sondeos realizados en la zona sur*, y *Modelo de flujo subterráneo con densidad variable para simular la intrusión marina en el acuífero de Cabo Roig* (DPA-IGME 2007a, b, nºs SID 63434 y 63433, y sus referencias).

2) La sección estratigráfica del acuífero **Cabo Roig** contiene diversas formaciones permeables confinadas por materiales margosos. El acuífero principal es el de areniscas y calcarenitas pliocenas, pero existen calcarenitas menos someras de edad Messiniense medio, areniscas Tortonienses, complejo basal Mioceno y una última formación carbonatada profunda del triásico. Se dispone de una serie de líneas sísmicas petroleras de calidad media en la zona del acuífero pertenecientes a las campañas S-82; S-84 y SP-84; S-85 y S-86, que si bien son de dudosa utilidad para la cartografía de los acuíferos superiores pliocuaternarios (< 200 m), sí que pueden servir para cartografiar el techo de otros reservorios como los carbonatos del Trías.

1.3 Objetivos

Como se ha indicado más arriba, una de las actividades del convenio vigente entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Diputación Provincial de Alicante es el “Desarrollo metodológico para la evaluación de reservas hídricas ante la previsión de fenómenos extremos”. En este marco, dos son los objetivos fundamentales de este trabajo. El primero consiste en desarrollar metodologías para la modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas hídricas de acuíferos no carbonatados como el de **Cabo Roig**, y el segundo, determinar la profundidad y estructura de su basamento triásico, desde Torre Vieja al Campo de Cartagena.

Los objetivos mencionados implican el uso de metodologías de caracterización geológica y petrofísica de las áreas con información geofísica (sísmica de reflexión, principalmente) y sondeos someros y profundos. Precisamente la integración e interpretación de información geofísica previa (sísmica de reflexión), de datos estructurales y petrofísicos, de datos procedentes de sondeos mecánicos de investigación hidrogeológica y el posterior análisis 3D de toda esta información han permitido conseguir resultados relacionados. Entre éstos cabe citar:

i) la consecución de capas georeferenciadas de techo y muro de formaciones geológicas exportables a modelos de flujo y transporte de aguas subterráneas, ii) la mejora del conocimiento de los límites laterales del acuífero, y, iii) la posible utilización del modelo 3D y del mapa de isobatas del Trías como herramientas de soporte de decisiones para emplazar captaciones de agua subterránea, o relacionadas con aprovechamiento geotérmicos, o con otros usos industriales.

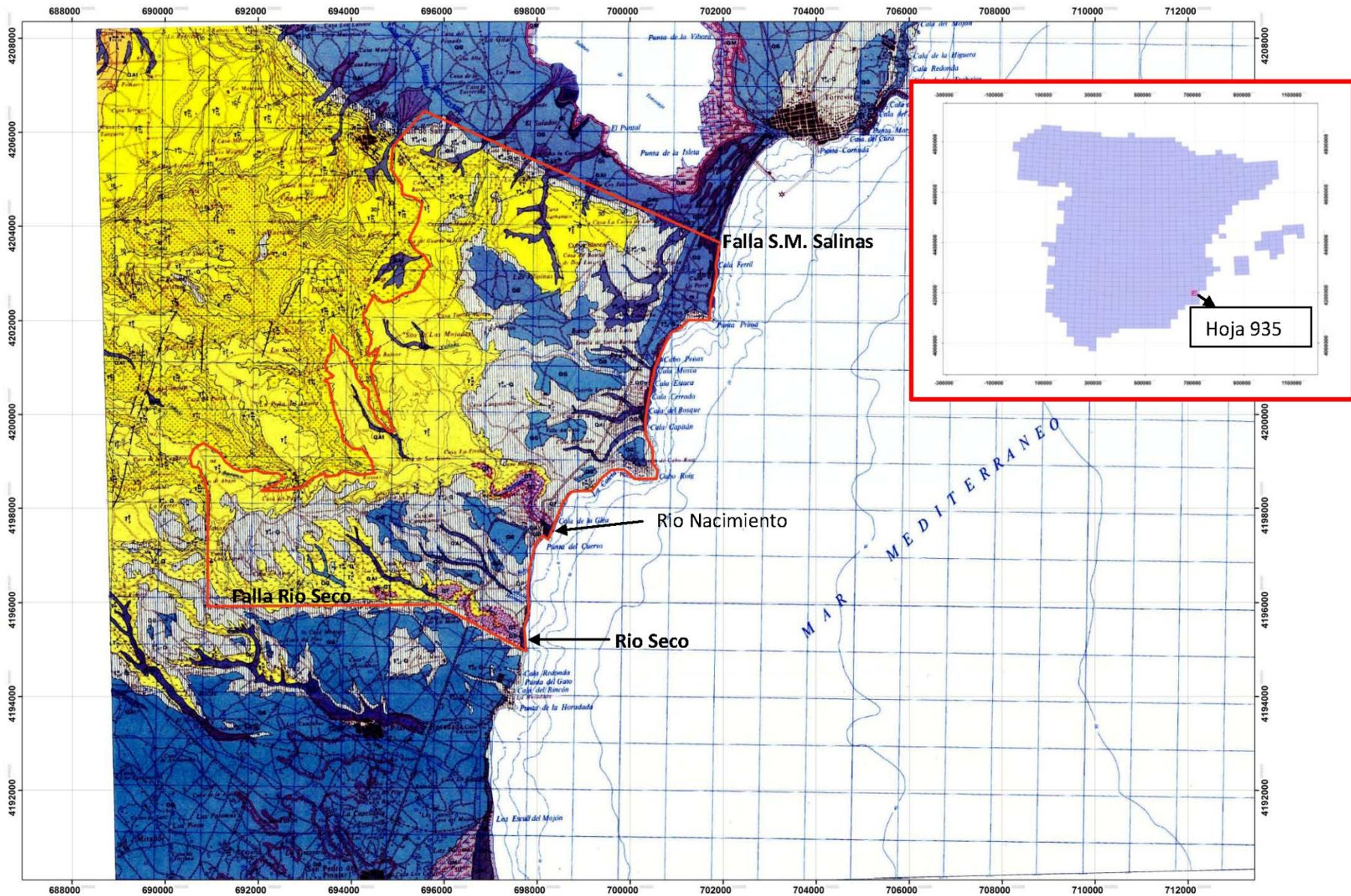


Figura 1. Hoja MAGNA n° 935 Torrevieja (Alicante). Localización y límites estructurales del acuífero de Cabo Roig (en rojo). La geología representada corresponde a materiales cuaternarios en azul oscuro y gris; amarillos claros para el Plioceno (acuífero); amarillos tramados para el Mioceno Superior (IGME, 1972).

2. METODOLOGÍA DE LA MODELIZACIÓN EN 3D. SOFTWARE UTILIZADO

Para alcanzar los objetivos mencionados en el apartado anterior, se plantean las siguientes actividades:

1. Recopilación y análisis de la información geológica, sondeos y geofísica existente.
2. Selección de Superficies de Referencia de objetivo hidrogeológico/geotérmico
3. Desarrollo metodológico para la Cartografía de subsuelo de Superficies de Referencia y generación de modelos geológicos 3D, integrando toda la información de geología de superficie y subsuelo disponible.

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

El análisis de datos geológicos de superficie (datos cartográficos y estructurales y columna estratigráfica sintética) y de subsuelo (18 sondeos hidrogeológicos someros, 6 sondeos petroleros y 17 líneas sísmicas) disponibles en la región, ha permitido seleccionar y reconstruir las siguientes superficies 3D del entorno del acuífero de **Cabo Roig**:

- Muro del Plioceno Superior (techo del acuífero del Plioceno Inferior)
- Muro del Plioceno (base del acuífero)
- Muro del Mioceno (techo Triásico)

El modelo incorpora 3 fallas normales principales no aflorantes, dos de las cuales definen estructuralmente los límites Norte y Sur del acuífero.

La metodología seguida durante el proceso de modelización se puede resumir en la figura 2:

- Los datos de partida (A) incluyen el Modelo Digital del Terreno (MDT), en este caso 100*100 m del Servicio Geográfico del Ejército (SGE), cartografía geológica (digitalizada de hoja MAGNA). Además se pueden incorporar los datos de geofísica disponibles (sondeos, sísmica de reflexión, etc.). La sísmica se encontraba parcialmente interpretada en los proyectos del “Plan de Selección y Caracterización de áreas y estructuras favorables para el Almacenamiento Geológico de CO2 en España” (Plan ALGECO2, García Lobón, et al. 2011). La conversión tiempo-profundidad (figura 2B) de las líneas sísmicas se requiere para determinar las profundidades de las superficies a modelar con sísmica (techo del Triásico).
- El trabajo de revisión cartográfica 3D se inicia con la corrección de los contactos y buzamientos a partir de la cartografía geológica digitalizada (figura 2A). Los cortes geológicos se construyen a partir de esos datos cartográficos y la información de sondeos (figura 2C).
- El uso del software de modelización geológica Geomodeller 3D (figura 2D) incorpora cortes compatibles como input básico al modelo, junto con sondeos y sísmica interpretada en términos de las superficies de referencia principales.

- Por último, calculado el modelo matemático 3D en Geomodeller (apartado 5), éste se transfiere a gOcad donde se afinan las superficies de referencia y se calcula el volumen total de roca y de volumen saturado del acuífero (figura 2E), teniendo en cuenta la porosidad y la superficie piezométrica.

El proceso permite incorporar nuevos datos (tanto de geología superficial como de subsuelo) constantemente, así como calcular el modelo cuantas veces se requiera en función de los datos introducidos, hasta obtener la solución final que cumpla nuestras expectativas.

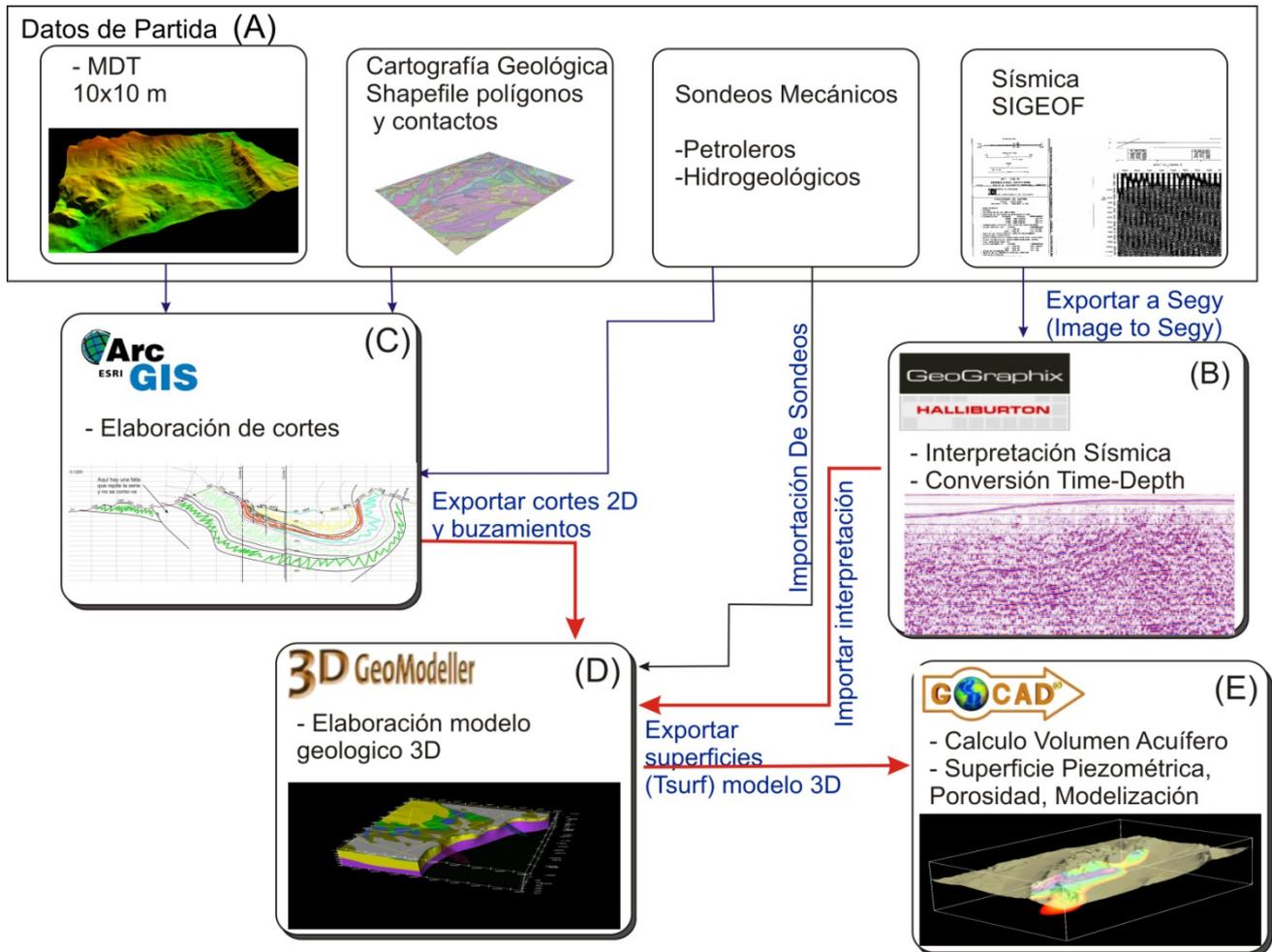


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de Cabo Roig. En cada uno de los pasos se detalla el software utilizado. Explicación en texto.

El software utilizado es el siguiente (ver figura 2):

- 3D Geomodeller. Elaboración del modelo geológico 3D.
- Geographix. Interpretación sísmica y conversión tiempo-profundidad.
- gOcad. Mejora de superficies de referencia. Cálculo del volumen de roca del acuífero. Modelación de reservas y curva de explotación.

Un resumen de los datos utilizados durante el proceso de modelización 3D se puede ver en la tabla I:

Tipo	Datos	Descripción	Fuente
Superficie	Cartografía geológica	Contactos y fallas. Hoja 935 (Torrevieja)	Cartografía MAGNA
	Datos estructurales	Buzamientos digitalizados	Datos estructurales del MAGNA
Subsuelo	Cortes geológicos	7 cortes	3 reinterpretados de informe DPA-IGME 2007a, y 4 elaborados para ajuste del modelo 3D.
	Sondeos	18 sondeos hidrogeológicos + 6 de petróleo	IGME, DPA.
	Líneas sísmicas	<ul style="list-style-type: none"> • Campaña S82, 1 línea sísmica • Campaña S84, 8 líneas sísmicas • Campaña S85, 6 líneas sísmicas. • Campaña S86, 2 líneas sísmicas 	Bases Datos IGME (Archivo Técnico Hidrocarburos)

Tabla I. Resumen de datos usados durante el proceso de modelación 3D del acuífero de Cabo Roig.

3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

3.1 Estratigrafía

Los materiales aflorantes en la zona de Cabo Roig corresponden a sedimentos post-orogénicos del Neógeno y Cuaternario constituidos por series de relleno detrítico con diversidad de litofacies y espesores variables condicionadas por una importante actividad neotectónica. El tramo acuífero principal está formado por niveles de areniscas y calcarenitas del Plioceno, cuya potencia oscila entre unos 20 y 90 m, bastante homogéneas litológicamente, que afloran fundamentalmente en el borde occidental del acuífero (figura 1). Por encima de las calcarenitas se sitúa estratigráficamente un nivel de margas blancas de la misma edad, de escasa extensión en la zona debido a que se encuentra erosionado. En la mayor parte del acuífero, sobre las calcarenitas hay depósitos de arenas y limos del Pliocuaternario y Cuaternario de permeabilidad moderada, que actúan como acuitardo (figura 3). Los niveles margosos del Mioceno superior (M3) actúan como impermeable de base, y límite occidental del acuífero. Las arenas y areniscas calcáreas del Messiniense M2 únicamente son atravesadas por algunos sondeos perforados en la zona sur del acuífero, entre el río Seco y el río Nacimiento, y se consideran pertenecientes al Campo de Cartagena.

En la figura 3 se representa una columna estratigráfica sintética del entorno del acuífero de **Cabo Roig**. En la columna se marcan los límites que se han usado como Superficies de Referencia para la construcción del modelo geológico 3D: Plioceno P1-P2, y Trías. La columna es la síntesis de unidades Magna del Mioceno Superior (Messinienses M1, M2, M3), Pliocenas (P1-P2), y Cuaternario, unidades usadas en investigación hidrogeológica (DPA-IGME 2007a, b), superpuesta a las unidades inferiores de estratigrafía sísmica interpretadas en el “Plan de Almacenamiento geológico de CO₂ del IGME – Plan ALGECO2”, Volumen V - Geología del Subsuelo – (informe SID nº 64052, IGME, 2010); se trata del Trías Alpujarride y unidades I a IV: I-II, del Mioceno Inferior, III-IV, del Tortoniense). En la estratigrafía sísmica es posible discernir dos unidades superiores, una Messiniense, Unidad V, y otra Pliocena, Unidad VI, (tabla III en apartado 4).

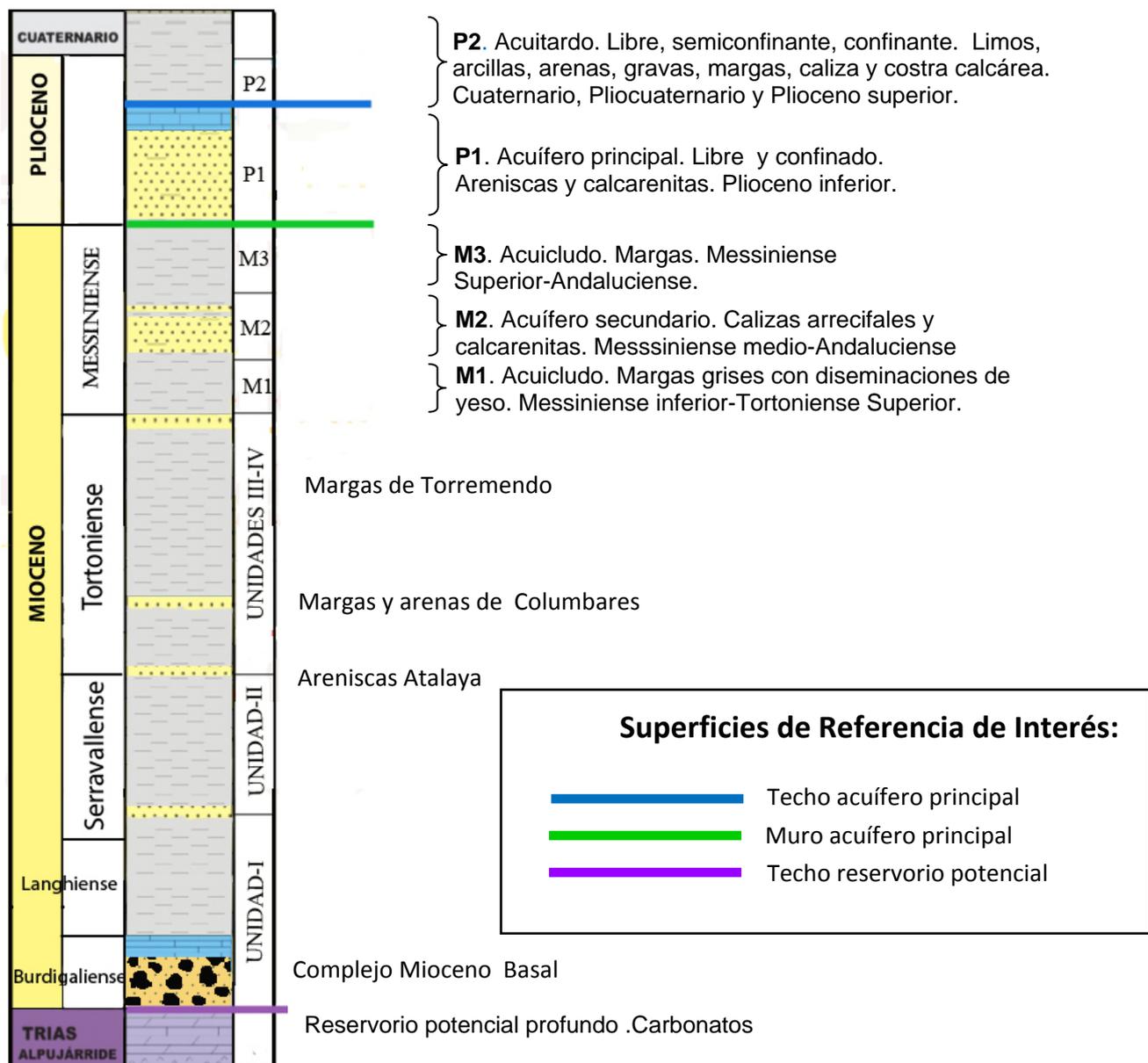


Figura 3. Columna sintética del área del acuífero de Cabo Roig. Se indican mediante barras las superficies del modelo 3D (techo Trías, muro y techo de P1). Se representan también los límites de unidades de estratigrafía sísmica inferiores, usadas en el proyecto ALGECO2 (unidades I a IV).

El **Mioceno Inferior** (Burdigaliense – Serravallense; Unidades I-II) está constituido por una secuencia arenosa con intercalación de paquetes de carbonatos y margas (desde el complejo basal Mioceno, con los Conglomerados de la Cadena-Cresta del Gallo, a la Fm. “Margas y Areniscas de la Atalaya”).

El **Tortoniense Inferior** (Unidad III) se deposita discordantemente sobre la Unidad II o sobre el sustrato Mesozoico. Queda caracterizada por el desarrollo de facies marinas proximales y distales. El tramo basal de la unidad está representado por una unidad de calizas arenosas, arenas calcáreas y conglomerados, sobre las que se deposita una serie de 500 a 1.000 m de margas y arcillas de origen marino profundo con numerosas intercalaciones arenosas correspondientes a un sistema progradante, que culmina con el depósito de facies someras equivalentes a la Fm. “Areniscas de Columbares”, perforada en los sondeos Murcia 4-1, La Marina-1, Rojales-1, San Miguel de Salinas-2, Benejuzar-1 y La Mata-1; apartado 4).

El **Tortonense Superior** (Unidad IV) se caracteriza en su base por una discordancia sobre la que se dispone la importante unidad de la Fr. “Margas de Torremendo-Los Cárceles”, consistente en margas y arcillas con pasadas de caliza e intercalaciones turbidíticas ocasionales de arenas, con una potencia de 200 a 800 m. Sobre estas facies aparece un intervalo de 40 m de calizas oolíticas de origen marino somero. Esta unidad está perforada en la mayoría de los sondeos con espesores variables debidos a fenómenos de subsidencia diferencial. Se considera correlacionable con el Gp. “Castellón Sandstone” del “offshore” mediterráneo.

El Mioceno culmina con una compleja serie litoestratigráfica **Messiniense** (M1, M2 y M3 ~ Unidad V), conformada por margas grises a verdes y fangos, con esporádicas intercalaciones de finas calcarenitas arenosas y yesos masivos, que dejan ver en su techo la presencia de limolitas rojas. Esta unidad V queda limitada a techo por la importante discordancia regional del Messiniense.

El **Plioceno** se apoya por intermedio de una discordancia erosiva y angular sobre los términos litoestratigráficos andalucenses. El **Nivel Inferior**, acuífero está formado por una alternancia de litarenitas, sublitenitas y calcarenitas intraclásticas arenosas con delgados niveles margosos. Su espesor, tremendamente variable, de 15-20 m a más de 100 m en el área de San Miguel de Salinas-Torre Vieja. El **Nivel Superior** está constituido por nivel poco potente de margas blancas bajo las arcillas rojas del Pliocuaternario, presenta hacia el techo un aspecto cada vez más arcilloso.

El Pliocuaternario contiene en resumen dos tramos bien característicos y que en conjunto llegan a alcanzar más de 20 m, el inferior a veces no visible, constituido por arcillitas y limolitas rojas y el superior, por una costra o caliche. Se apoya sobre cualquier término del Plioceno o del Andalucense.

Los depósitos **Cuaternarios**, extensos y variados, pueden ser divididos en dos grandes conjuntos con cronologías relativas bien delimitadas en lo referente sobre todo al más antiguo. El **Cuaternario antiguo** comprende dos conjuntos de génesis bien distintas, uno inferior marino formado por calcarenitas y calizas oolíticas y depósitos de Glacis que marca el tránsito al Pleistoceno y otro continental formado por cantos gruesos mal seleccionados y un nivel de limos negros muy arenosos con pocos cantos, de terraza fluvial. El **Cuaternario moderno** Comprende depósitos típicos del litoral mediterráneo constituido por playas, dunas móviles o fijadas por la vegetación. Otros depósitos que merecen comentarse son los depósitos de la actual red hidrográfica. En síntesis, dicho sistema de drenaje está rejuveneciendo intensamente los antiguos depósitos cuaternarios, observándose un encajamiento rápido sobre el glacis superior y la propia formación encostrada.

3.2 Estructura geológica

Cabo Roig se ubica en la cuenca postectónica del Campo de Cartagena, depresión interna de las Cordilleras Béticas ocupada por un potente relleno neógeno, predominantemente margoso de hasta unos 1.000 m de espesor, en el que hay intercalaciones de conglomerados y areniscas del Tortonense, calcarenitas del Messiniense y areniscas del Plioceno y donde los materiales más modernos corresponden al Cuaternario de limos, gravas, arcillas, conglomerados y caliches. Las formaciones terciarias de este relleno descansan, discordantes y en posición subhorizontal, sobre el sustrato bético estructurado en bloques, originado por un conjunto de fallas que condicionan el tipo de sedimentos y su espesor, dependiendo de que se depositen en una zona de surco o de umbral.

En Cabo Roig se detecta la presencia de fallas con dirección N 110° a 120° E, que desplazan y condicionan los depósitos calcareníticos pliocénicos de sur a norte hacia el mar. Entre estos accidentes se encuentran los límites del acuífero (figura 1): al norte, la falla de San Miguel de Salinas

que aísla el acuífero de Cabo Roig del de Torrevieja, que está más hundido; y al sur, la falla del río Seco, aproximadamente paralela al cauce del río Seco, con dirección oeste-este, la cual aísla el acuífero de Cabo Roig del acuífero de Campo de Cartagena, con un salto mínimo estimado de 30 m (IGME, 1990). Otra de las fallas más importantes es la del río Nacimiento; falla normal que discurre casi paralela al río Nacimiento y perpendicular a la costa (figura 4).

Cabe destacar las direcciones “aberrantes” de los pliegues de la zona de Cabo Roig (NW-SE y casi W-E), distintas de las que caracterizan a las Cordilleras Béticas (NE-SW); ello es debido a que las fallas de esas direcciones (en principio normales) condicionaron el depósito desde el Mioceno superior, de ahí que existan surcos y umbrales con esas direcciones y fallas ocultas; algunas de estas fallas actuaron con posterioridad como de desgarre.

La existencia en la zona de Cabo Roig de una cuenca de sedimentación postectónica, próxima al mar (que constituiría un pequeño “geosinclinal”), con direcciones aberrantes, no constituye un caso aislado, ni del pasado; pues se sabe que actualmente se está produciendo una subsidencia tanto en la Salina de Torrevieja como en el Mar Menor (ambas de dirección casi N-S), como lo demuestra la ocurrencia de epicentros sísmicos en sus fondos (Rodríguez Estrella, 1986).

3.3 Cortes y Sondeos Hidrogeológicos

Los sondeos hidrogeológicos disponibles relevantes para la construcción del modelo 3D de Cabo Roig se listan en la siguiente tabla:

Nº Registro	Nombre	Prof.	Cota	UTM X	UTM Y	Corte	Edad Fin	Zona
283750053	--	571	13.5	694930	4190988	Corte I	M. Sup.	C. Cartagena
283750100	--	220	12	694765	4190329	Corte I	P1	C. Cartagena
283750133	--	252	86	690827	4195387	Corte II	M3	C. Cartagena
283750137	--	269	117	688847	4194444	Corte II	M. Sup.	C. Cartagena
283750226	--	305	80	689460	4193538	Corte II	M. Sup.	C. Cartagena
283760037	Rio Seco I	200	6	697530	4195200	Corte I	P1	C. Roig - Sur
283760038	Rio Nacimiento II	515	2	697980	4197660	Corte I	M. Sup.	C. Roig - Sur
283750247	Depuradora	280	89	694201	4197787	Cortes II-III	M1	C. Roig - Sur
283750249	Polideportivo	325	97	691018	4197491	Corte III	M1	C. Roig - Sur
283750250	Campo de Golf	105	46	695797	4199085	Corte II	M1	C. Roig - Sur
283720004	--	95	25	698774	4200160	Corte I	P1	C.R. - Central
283720005	--	70	36	699281	4200956	Corte I	P1	C.R. - Central
283720076	--	90	50	698205	4200348	Corte II	P1	C.R. - Central
283720112	--	75	45	698176	4200398	Corte II	P1	C.R. - Central
283720113	--	60	45	698275	4200327	Corte II	P1	C.R. - Central
283720103	Tienda Vitorina	103	52	698075	4200318	Corte II	P1	C.R. - Central
283720121	--	110	27	699307	4201660	Corte II	M3	C.Roig - Norte
283720163	--	60	35	698145	4204060	CorteVI	P1	C.Roig - Norte

Tabla II. Sondeos hidrogeológicos (18, DPA-IGME, 2007a) usados en la elaboración de cortes geológicos para la construcción del modelo 3D del acuífero de Cabo Roig. Se indican profundidad, coordenadas, corte en el que se emplean y litología de final del sondeo.

Los sondeos presentan una distribución irregular (figura 4): 6 se agrupan en la zona central de Cabo Roig, 5 en el tercio sur (nombrados en la tabla II), y sólo 2 en el tercio norte; mientras que el resto, 5, pertenecen al Campo de Cartagena.

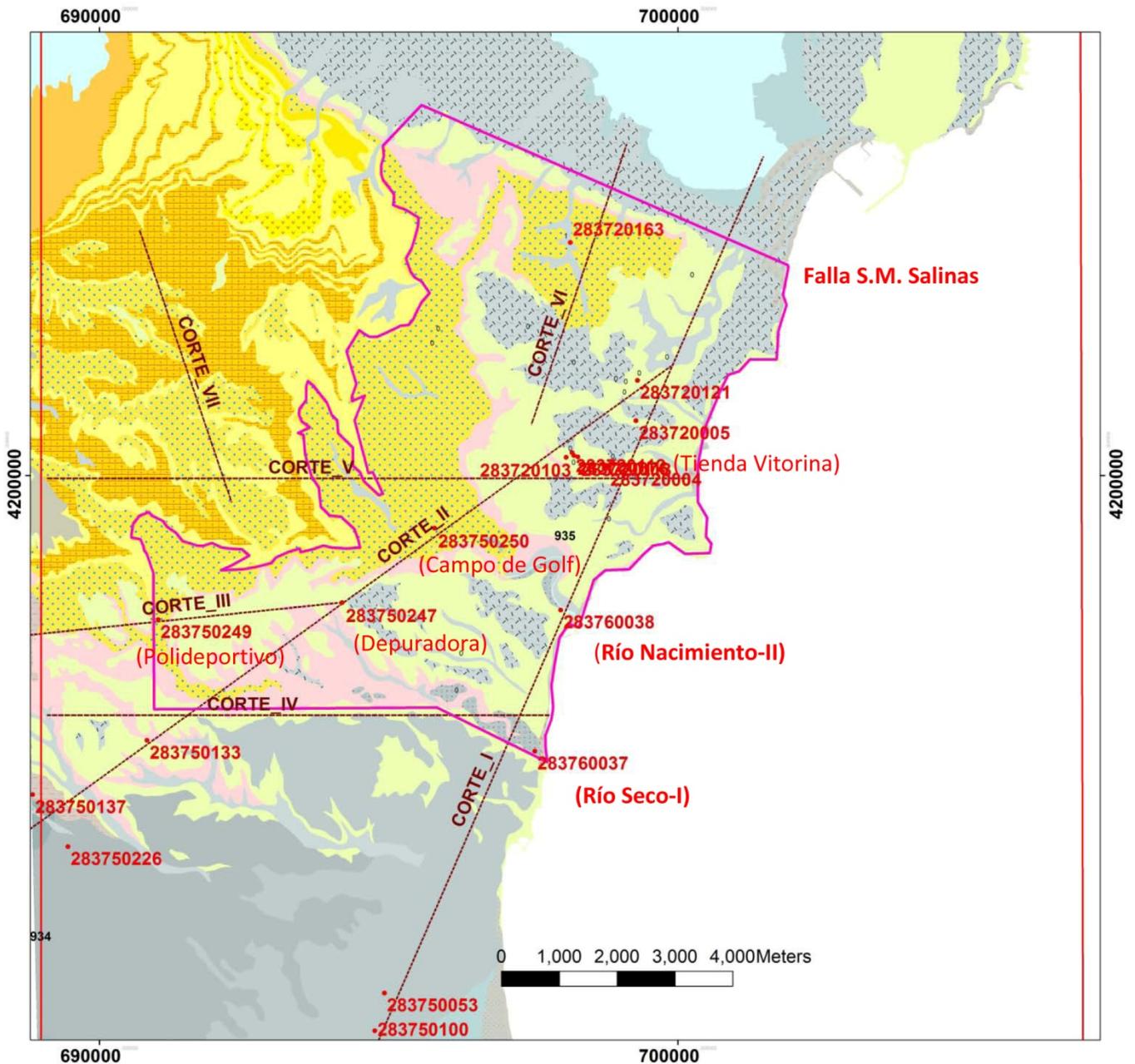


Figura 4. Esquema de situación de los cortes geológicos utilizados en la modelización 3D del acuífero de Cabo Roig, sobre mapa geológico de la zona de estudio (GEODE). Se indican el límite del acuífero de Cabo Roig, la situación de sondeos y algunas referencias geográficas.

A partir de los sondeos hidrogeológicos de la tabla II, y a la vista de los datos cartográficos y estructurales, se ha confeccionado la batería de cortes localizados en la figura 4, que son la base que usa Geomodeller para la modelización 3D del acuífero. De los 7 cortes, se representan dos en la figura 5. Estos dos cortes resultan de la reinterpretación de los dos cortes hidrogeológicos publicados en el informe *Actualización de la geometría del acuífero de Cabo Roig. Caracterización litoestratigráfica de los sondeos realizados en la zona sur*, DPA-IGME, 2007a. Las diferencias, que son pequeñas por lo que afecta al Plioceno, en los modelados por 3D Geomodeller residen en:

-Los sondeos usados para la construcción de los cortes son diferentes en algún caso. En los modelados por 3D Geomodeller sólo se usan los sondeos más próximos a la traza de los mismos,

dado la menor tolerancia del algoritmo de cálculo (del modelo 3D, apartado 5) respecto a la distancia permitida para proyectar un sondeo sobre un corte.

-No se han diferenciado los tramos Messinienses en los cortes de 3D Geomodeller, ni numerosas fallas en "teclas de piano" (por falta de datos; pe., M2 no es cortado por sondeos al N de la falla de Río Nacimiento).

-Se ha incluido el techo del Trías derivado de la interpretación sísmica (apartado 4).

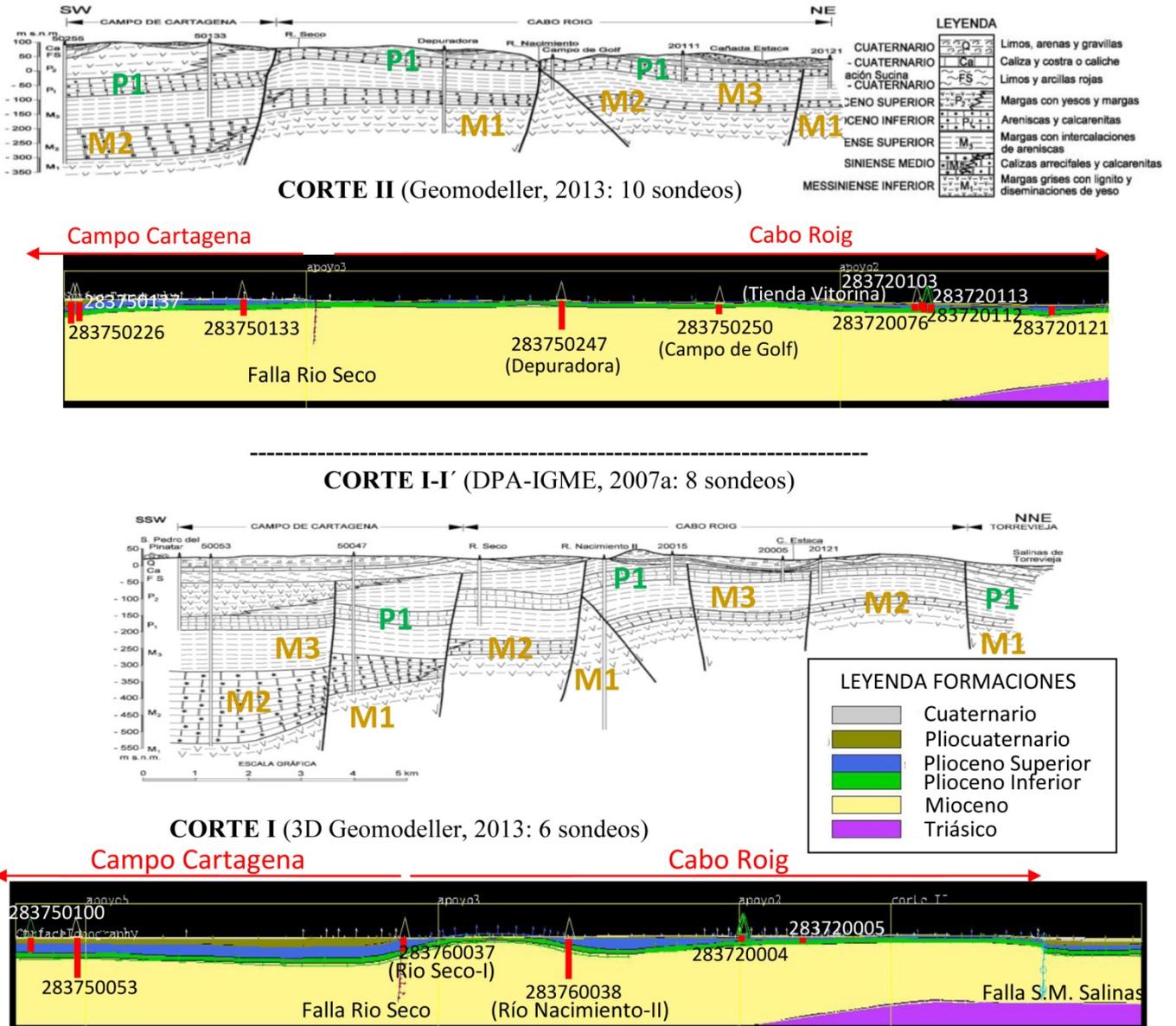


Figura 5. A color: cortes hidrogeológicos I y II del área de Cabo Roig computados por 3D Geomodeller; blanco y negro, mismos cortes según informe DPA-IGME, 2007^a.

Si se comparan las versiones los cortes de la figura 5, se aprecia que los sondeos usados varían ligeramente; pe, en el corte I-I' de 3D Geomodeller no se han tenido en cuenta los sondeos 121 y 50047, ni en el corte II el 50255 (estos dos últimos, no localizado en este estudio); no obstante las profundidades y espesores del Plioceno del modelo computado son compatibles con las de estos sondeos de los cortes previos. Los cortes V-VI-VII se realizaron nuevos como apoyo para poder calcular el modelo 3D Geomodeller, al faltar información en la zona Norte-Noroeste del acuífero. Al no contar apenas con sondeos en estas zonas, los cortes se construyeron en buena medida mediante proyección de los puntos que componen los horizontes de las superficies de las secciones, ya realizadas, en los cortes I y II. Como rasgos generales, en los cortes se observa la profundización del acuífero P1 hacia la línea de costa, así como el desarrollo de dos depocentros, al Sur de la Falla Río Seco (con un salto pequeño en los cortes de 3D Geomodeller) y otro según el Río Nacimiento.

3.4 Hidrogeología

La zona de Cabo Roig es predominantemente llana, con suave pendiente hacia el mar (figura 6). Cerca del límite N, en el área de Torrevieja, destaca la existencia de dos lagunas saladas (La Mata al norte y Torrevieja al sur), consideradas como espacios protegidos; ambas lagunas, conectadas entre sí y con el mar, adicionalmente, reciben aguas salinas del diapiro de Pinoso. Desde el punto de vista climático, el sector está dominado por un clima mediterráneo semiárido, según la clasificación de Rivas-Martínez, y mediterráneo subtropical según la clasificación de Papadakis. Las precipitaciones son irregulares, con medias anuales para el periodo 1955-1995 comprendidas entre los 231 mm de la estación “Laguna de la Mata” y 330 mm de la estación de “San Miguel de Salinas-Grupo-Escolar”. Los meses más secos son julio y agosto y el más lluvioso octubre. La temperatura media anual es de 17,8° C con mínimas de unos 11 °C entre diciembre y febrero y máximas sobre los 26 °C en julio y agosto. Este clima es favorable para el desarrollo de los sectores agrícola y turístico, pilares económicos de la zona, cuyas demandas de agua se incrementan fuertemente en épocas estivales.

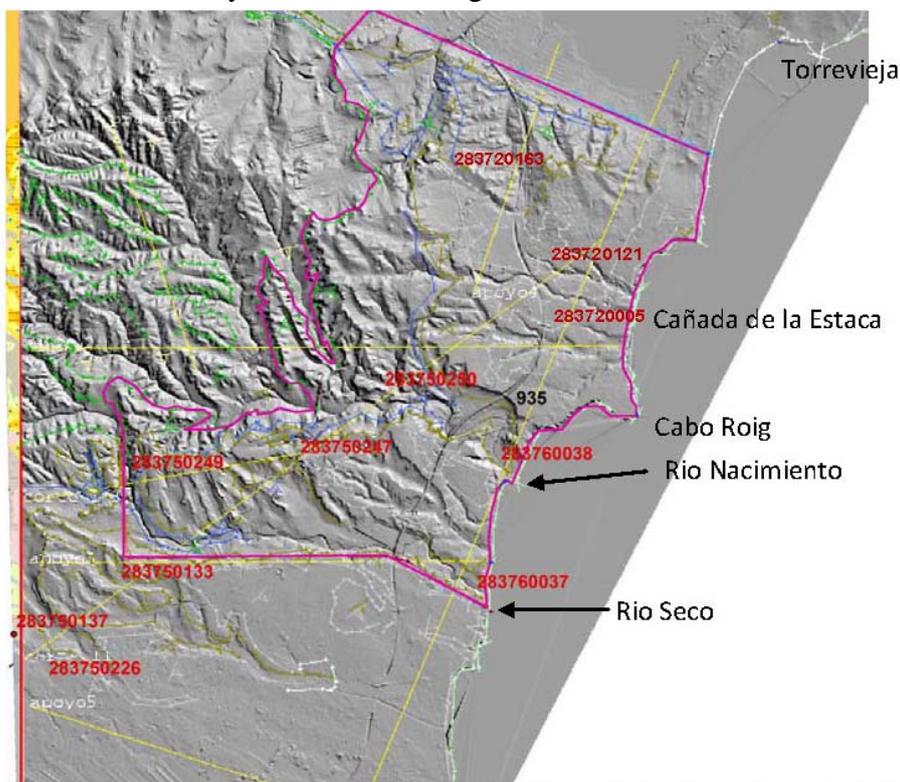


Figura 6. Relieve en sombras de la zona del Acuífero Cabo Roig (MDT de 100*100m) En amarillo: trazas de los cortes usados en la confección del modelo 3D.

La red de drenaje consta, de N a S, de (figura 6):

- Cañada de la Estaca
- Río Nacimiento.
- Barranco rubio
- Cañada Hermosa-Cañada de Matamoros.
- Río Seco.

El acuífero de Cabo Roig, (U.H. 07.31 “Campo de Cartagena”), tiene una superficie de 61 km² según los límites considerados en los numerosos trabajos de ITGE (1989, 1990, 1994a y 1994b) e IGME-DPA (1996), de los que unos 18 km² son afloramientos permeables. Por el norte, según los estudios citados del IGME, el límite se hace coincidir con la falla de San Miguel, que pasa por esta localidad y Cala Ferril. Esta falla hunde el bloque norte, desconectando los afloramientos permeables de calcarenitas pliocenas situados al sur al ponerlos en contacto con materiales más recientes de comportamiento impermeable (margas pliocenas suprayacentes y términos pliocuaternarios y cuaternarios). Por el oeste, el límite del acuífero viene dado por los afloramientos del impermeable de base. Por el sur, el límite coincide una falla de dirección aproximada oeste-este, cuya traza discurre aproximadamente paralela al cauce del río Seco hasta el mar; esta falla, con un salto mínimo estimado de 30 m, aísla el Plioceno de Cabo Roig del Plioceno del Campo de Cartagena, que se encuentra más hundido. La potencia del acuífero plioceno de Cabo Roig varía entre unos 20 y 90 m con una media de 70 m. Tales variaciones responden a fracturas y estructuras de plegamiento que han condicionado la sedimentación (ITGE, 1989). Los menores espesores se observan en el sector occidental del acuífero (15-20 m), y los mayores en el oriental (casi 100 m).

EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA DOMINIO HIDROGEOLÓGICO Nº 28. CAMPO DE CARTAGENA - CABO ROIG
- Acuífero Cabo Roig -

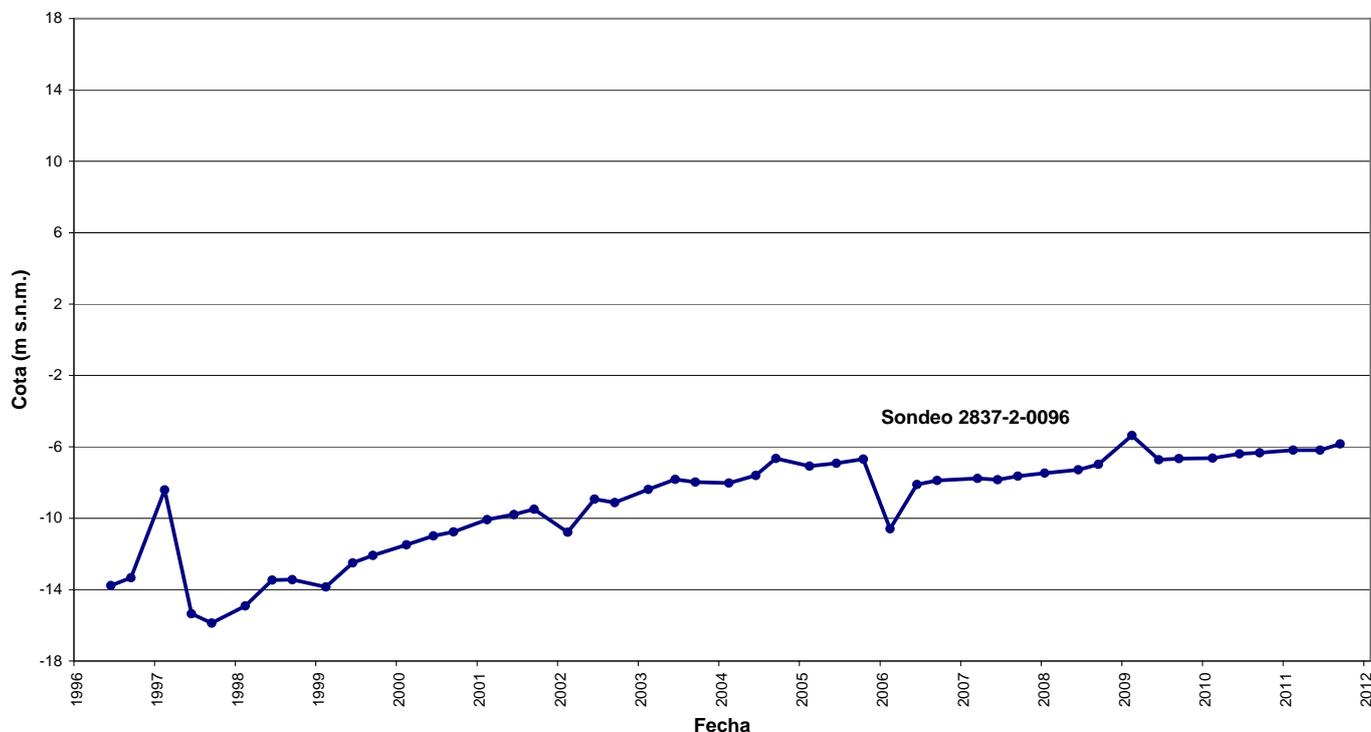


Figura 7. Evolución piezométrica, años 1996-2012. Piezómetro 2837-2-0096, ubicado en figura 8.

El balance hídrico medio reciente del acuífero se indica a continuación y pone de manifiesto un consumo medio de reservas de 0,6 hm³/año, que provocan intrusión marina:

Entradas (hm³/año)

-Infiltración de lluvia	1,80
-Cauces y retornos	0,60
-Intrusión marina	0,60
Total entradas	3,00

Salidas (hm³/año)

-Bombeos urbanos y agrícolas	3,00
Total salidas	3,00

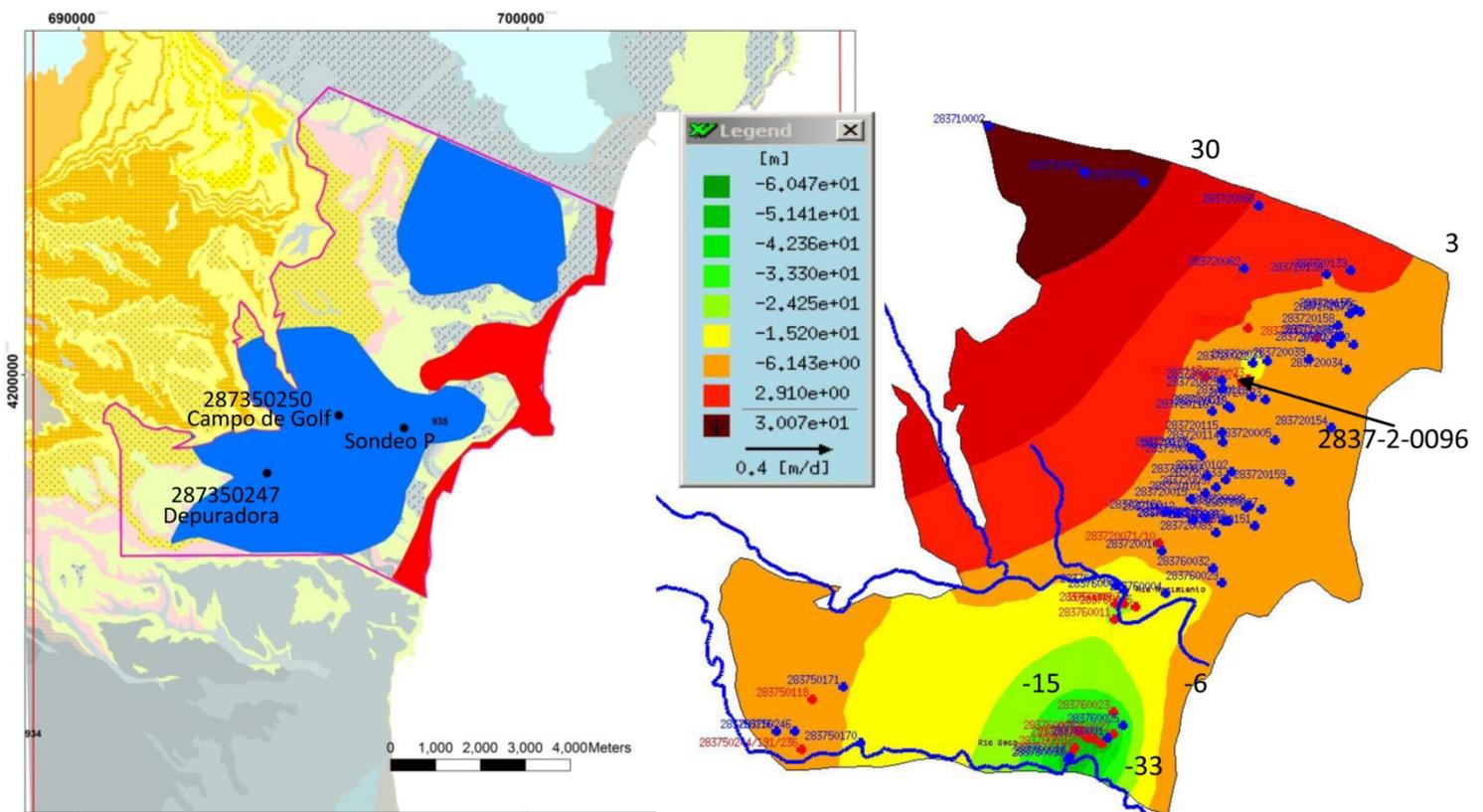


Figura 8. A la Izquierda: mapa de índice de salinidad según norma Riverside (US Salinity Laboratory, 1954). Rojo indica salinidad extrema (intrusión marina); azul claro, salinidad media (agua apta para uso agrícola y doméstico). Modificada del informe “Actualización de la geometría del acuífero de Cabo Roig y caracterización litoestratigráfica de los sondeos realizados en la zona sur del acuífero. (DPA-IGME, 2007a)”.

A la derecha: mapa de Isopiezas; en Cabo Roig la piezometría está comprendida entre unos 30 y -60 m. Se indica la posición del piezómetro de la figura 7. Fuente: “Modelo de flujo subterráneo con densidad variable para simular la intrusión marina en el acuífero de Cabo Roig Alicante. (DPA-IGME, 2007b)”.

4. SONDEOS DE PETRÓLEO Y LÍNEAS SÍSMICAS DEL ENTORNO CABO ROIG

Los sondeos de petróleo y datos geofísicos (líneas sísmicas) disponibles para la cartografía de subsuelo del basamento triásico del entorno **Cabo Roig** son:

4.1. Sondeos de petróleo.

Existen 6: Benejuzar-1, La Mata-1, Rojasles-1, S. Miguel de Salinas-1 y S.M. de Salinas-2, estos dos últimos ubicados en el límite N de Cabo Roig (figura 9; La Marina-1, se ubica al N de Rojasles-1).

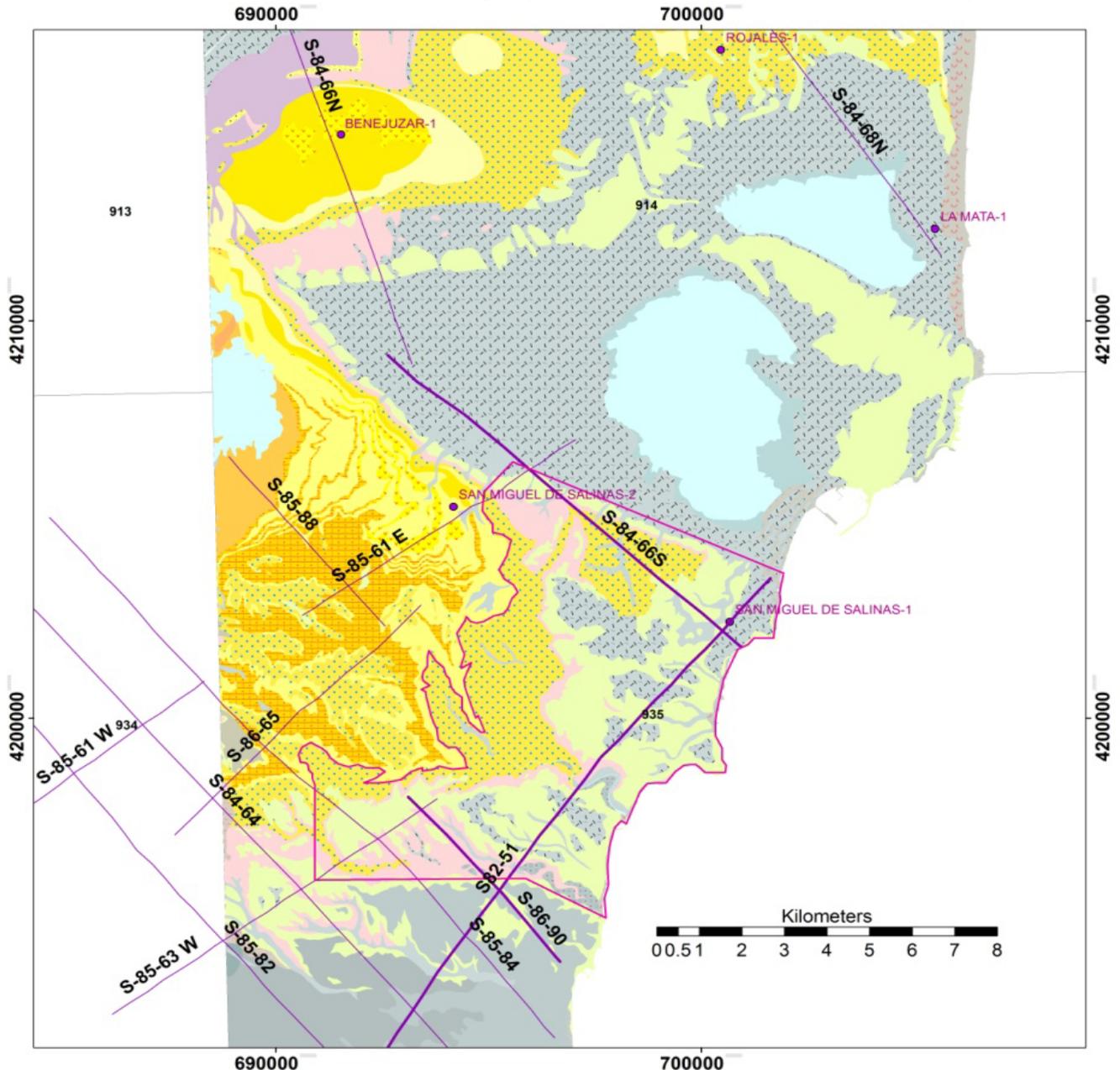


Figura 9. Localización de los sondeos de petróleo y secciones sísmicas usados para elaborar el mapa de Isobatas del techo Triásico en el área de Cabo Roig. Se engruesan las tres secciones, S-82-51, S-84-66S, y S-86-90 que cruzan Cabo Roig y aparecen interpretadas en el apartado 4.2.

La Figura 10 muestra la correlación de 4 de estos sondeos, de N a S, Rojasles-1, Benejuzar-1, y S. Miguel de Salinas-2 y 1, indicando las importantes variaciones registradas de espesor de Mioceno y Plioceno, con aumentos de los mismos hacia el N y hacia la línea de costa, desde S. Miguel de Salinas-2. El basamento se eleva hacia el anticlinal de S. Miguel de Salinas. En particular, obsérvese el gran espesor interpretado de Plioceno en el sondeo S. Miguel de Salinas-1 del orden de 400 m, sobre cuyas implicaciones se hacen diversos comentarios más abajo (apartados 4.2 y 5.2).

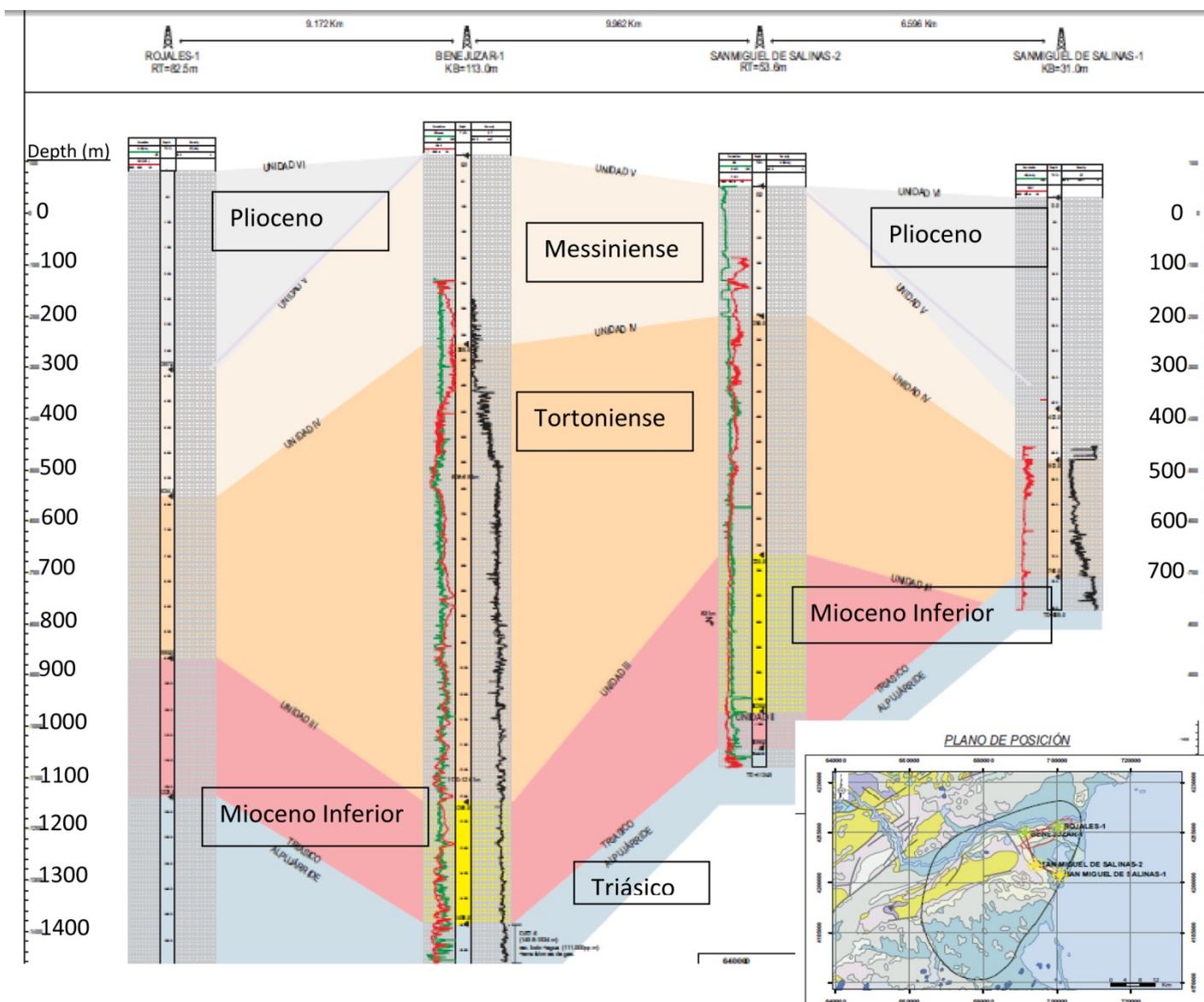


Figura 10. Correlación entre los sondeos profundos de exploración de hidrocarburos en la zona Torrevieja-Mar Menor. (Fuente: Informe ALGECO2, Volumen V Geofísica, IGME 2010, según informes finales de los sondeos. Ministerio de industria, Códigos Archivo Técnico hidrocarburos: San Miguel de Salinas-1 ATH 50475; San Miguel de Salinas-2, ATH 50484; Benejuzar-1 ATH 852; y columna sintética de Rojasles-1 en "Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España, pag 52" (J.M. Lanaja.1987).

La estratigrafía sísmica usada en el Plan ALGECO2, Volumen V - Geología del Subsuelo (IGME, 2010), distingue 6 unidades sobre el basamento triásico (tabla III):

UNIDAD	EDAD (aproximada)	LITOLOGÍA	Carácter A/S
Unidades I (Conglomerados de la Cadena-Cresta del Gallo) y II (Fm. Margas y Areniscas de Atalaya.)	M. Inferior (Burdigaliense-Serravalliense)	Conglomerados y areniscas de base, con intercalaciones de margas	A
Unidad III (Fm. Margas-Areniscas Columbares)	Tortonense Inferior	Calizas arenosas, arenas calcáreas y margas	A
Unidad IV (Fms. Margas de Torremendo-Los Cárceles)	Tortonense	Margas, limos y arcillas con intercalaciones turbidíticas	S
Unidad V (Fm. Venta de la Virgen)	Messiniense	Limolitas y margas	S
Unidad VI	Plioceno	Arenas calcáreas y margas	-

Tabla III. Unidades Neógenas de estratigrafía sísmica del área de Cabo Roig. A/S: Almacén/ Sello

4.2. Líneas sísmicas.

El área de Torrevieja-Cabo Roig-Campo de Cartagena cuenta con varias campañas de sísmica de reflexión petrolera, cuyas secciones sísmicas se encuentran en formato SEG-Y y en imagen digital. Las campañas y secciones correspondientes se muestran en la tabla IV:

NOMBRE	EXPEDIENTE	CAMPAÑA	LONGITUD (m)	SECCION	FECHA
S-82-51	18/82T	S-82	23123	SI	1982
S-84-58-MU	22/84T	S-84	31430	SI	1984
S-84-64-MU	22/84T	S-84	52450	SI	1984
S-84-66N-MU	22/84T	S-84	14734	SI	1984
S-84-66S-MU	22/84T	S-84	11275	SI	1984
S-84-68-MU	22/84T	S-84	21980	SI	1984
S-84-70N-MU	22/84T	S-84	9048	SI	1984
S-84-70S-MU	22/84T	S-84	13720	SI	1984
S-84-72-MU	22/84T	S-84	16364	SI	1984
S-85-061E	25/85T	S-85	7800	SI	1985
S-85-061W	25/85T	S-85	6764	SI	1985
S-85-063W	25/85T	S-85	9238	SI	1985
S-85-082	25/85T	S-85	17091	SI	1985
S-85-084	25/85T	S-85	17809	SI	1985
S-85-088	25/85T	S-85	5986	SI	1985
S-86-65	8/86T	S-86	4046	SI	1986
S-86-90	8/86T	S-86	5784	SI	1986

Tabla IV. Secciones sísmicas del área de Torrevieja-Cabo Roig (268,64 km).

En el conjunto de 17 líneas sísmicas disponibles en las proximidades de Cabo Roig existen 5 que cubren el área del acuífero, de las que tres son del mayor interés para su estudio: S-82-51, paralela a la costa (figuras 9, 11), y que se puede calar con el sondeo San Miguel de Salinas-1, y la S-84-66S al Norte, y S-86-90 al Sur, perpendiculares a ella (figuras 9, 12 y 13).

La línea S-82-51 es de pobre calidad, con escasa reflectividad coherente. Muestra un basamento fracturado y buzante al SE, hacia donde se desarrolla un importante depocentro de Mioceno Inferior en el Campo de Cartagena.

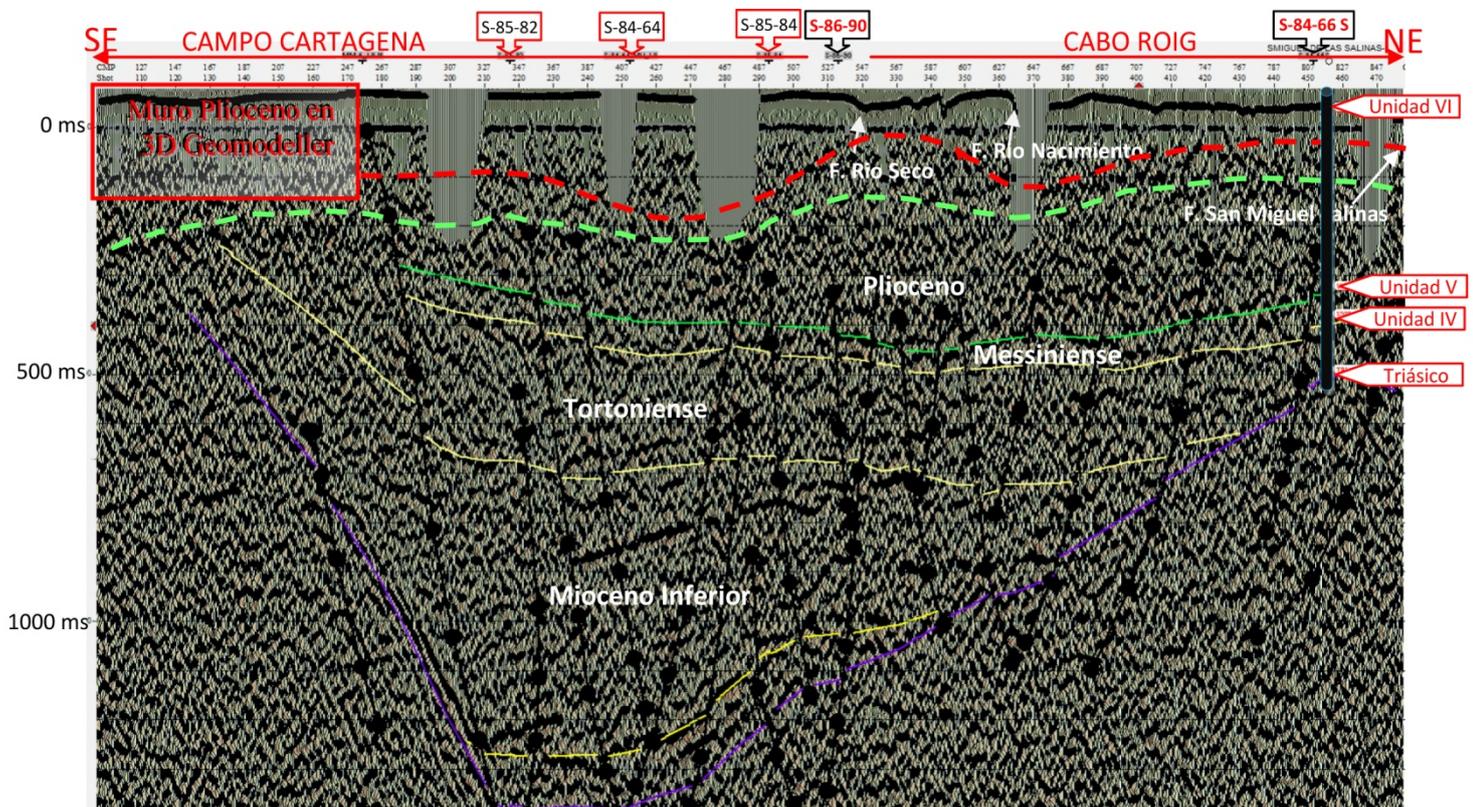


Figura 11. Sección S-82-51, subparalela a la costa (figura 9), con horizontes de estratigrafía sísmica interpretados y calados en S. Miguel de Salinas-1 (en azul) donde se indican techos de Unidades. Las fallas son de pequeño salto. Rojo discontinuo: muro del acuífero Plioceno en modelo 3D Geomodeller; verde discontinuo, interpretación alternativa sísmica del muro del Plioceno.

El calado de S-82-51 con el sondeo S. Miguel de Salinas-1 indica un espesor de las margas Messinienses (Unidad V) de sólo unos 60 ms tiempo doble (~ 80 m a 2,500m/s), entre unos 420 y 500 m de profundidad en el sondeo, mientras que el Plioceno tendría un espesor considerable, del orden de 400 m (figura 10). Este calado sísmico está basado en la interpretación geológica del sondeo San Miguel de Salinas1 (cfr. Informe final sondeo, código ATH 50475), que le atribuye profundidad de 51-412m al Plioceno.

En la figura 11 se indica el muro del Plioceno del modelo 3D Geomodeller obtenido a partir de cortes (apartado 5); existe claramente un problema de interpretación estratigráfica del espesor de Plioceno en el sondeo de calado (también en figura 12, arriba), que hace que los espesores de Plioceno interpretados en el sondeo S. Miguel de Salinas-1 y en la sección S-82-51 más que doblen los obtenidos en 3D Geomodeller de manera independiente, a partir de sondeos hidrogeológicos. De todas formas, esta unidad se sigue mal en la sección S-82-51, de modo que el límite Messiniense-Plioceno es de interpretación bastante dudosa en la misma (una interpretación alternativa es la línea a trazo verde, más concordante con el modelo 3D). La falla Río Seco podría tener un salto de unos 40 ms tiempo doble (~ 40 m, a 2000 m/s).

En la línea S-84-66S se observa que el alto estructural de basamento del sondeo S. Miguel de Salinas-1 delinea un ligero buzamiento hacia el interior (NW), hacia la cuenca de Torre Vieja. El espesor de Messiniense alcanza los 300 ms tiempo doble (~ 375 m). El salto de la F. San Miguel Salinas es de unos 80 ms ($0,04 \cdot 2500 = 100$ m). En la sección se indica el muro del Plioceno obtenido en 3D Geomodeller; la coincidencia es mucho mejor que en la sección anterior, en buena medida porque la sección discurre por áreas de plioceno aflorante, pero de nuevo se observa claramente un problema de interpretación estratigráfica del espesor de Plioceno en el sondeo de calado (figura 12).

En la línea S-86-90 el basamento aparece con ligero buzamiento hacia el mar. Si bien el espesor atribuido de Messiniense es sólo de unos 50-60 ms tiempo doble (~ 70-80 m), el muro del Plioceno obtenido en 3D Geomodeller sugeriría incluso espesores superiores a los de la sección S-84-66S. La Falla de Río Seco no se aprecia aquí, de modo que su pequeño salto se debe desarrollar hacia el mar.

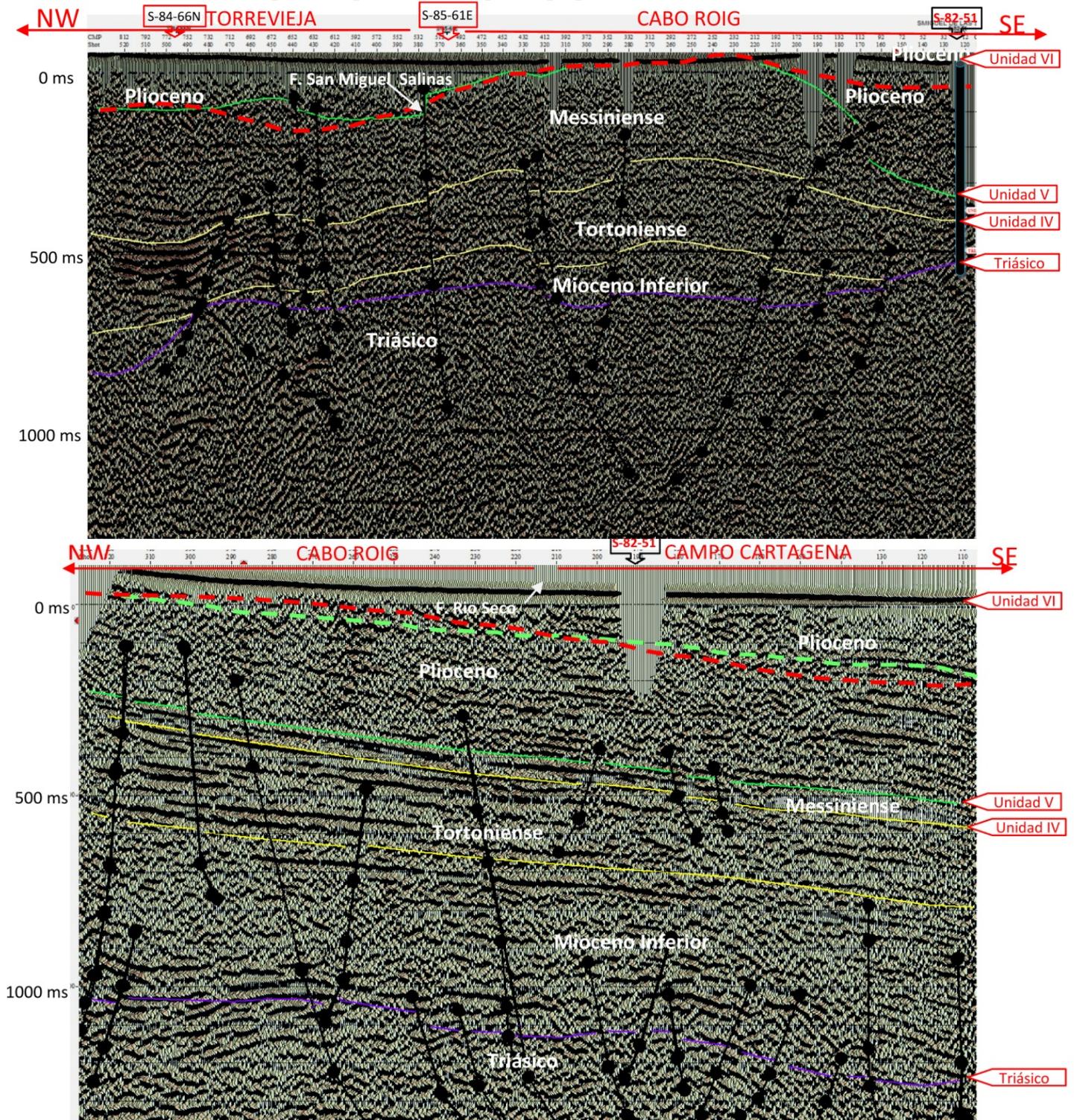


Figura 12. Líneas S-84-66S (arriba, con sondeo de calado) y S-86-90 (abajo). Se indican techos de Unidades. Rojo: muro (independiente) del acuífero Plioceno en modelo 3D Geomodeller.

Se podría resumir que la sísmica permite una interpretación fiable del basamento triásico y del Mioceno inferior, que es más dudosa en el M. Superior-Plioceno. La equivalencia de unidades de estratigrafía sísmica petrolera (la usada en el Plan ALGECO2) e hidrogeológica (DPA-IGME 2007a,b), es decir, Unidad V ~ Messiniense (~M1 a M3) y Unidad VI ~ Plioceno, es tentativa y no tiene efectos en las superficies de referencia del modelo hidrogeológico de este informe, en tanto en cuanto no se han usado eventuales interpretaciones de reflectores superiores que aparecen en las 3 líneas sísmicas que atraviesan el acuífero de Cabo Roig 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 sondeos hidrogeológicos, de los que se deriva la parte superficial de los cortes (figura 5), son incompatibles.

5. CONSTRUCCIÓN Y CALIDAD DEL MODELO 3D. CARTOGRAFÍA DE BASAMENTO

La realización de un modelo geológico 3D de Cabo Roig tiene como objetivo la caracterización georeferenciada en 3D de su geometría. El software Geomodeller3D integra toda la información disponible de superficie y subsuelo y permite generar un modelo geológico que represente una aproximación lógica y satisfactoria del acuífero. 3D Geomodeller permite la construcción de modelos geológicos complejos en 3D (fallas, pliegues, estratos invertidos, intrusiones, etc.) de carácter matemático (geoestadístico), considerando 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 de campo potencial, los buzamientos son gradientes de ese campo. El algoritmo de interpolación de superficies geológicas 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, etc).

Ya se ha indicado en el apartado 2 de metodología que 3D Geomodeller requiere cortes compatibles como input básico al modelo. El proceso de generación de cortes 3D (figura 5) y el posterior cálculo de las superficies equipotenciales que se unirán en profundidad para generar el modelo completo en 3D, requiere la definición coherente tanto del espesor de cada capa (unidad estratigráfica), de las intersecciones de los cortes, así como la dirección y buzamiento de todas las fallas implicadas. Si no hay coherencia, el modelo de superficies equipotenciales no se podrá calcular correctamente (cortes incompatibles y modelo no computable). Este proceso implica la corrección de cortes y mejora de datos que individualmente parecían correctos pero que no resultaron coherentes en el modelo final. Por ello se aplicaron las correcciones oportunas (buzamientos de las fallas en profundidad, salto de las fallas, etc.) a los datos de entrada para llegar al modelo final. En la figura 13 se muestra el modelo 3D proyectado en los 7 cortes usados para el cálculo matemático de superficies 3D.

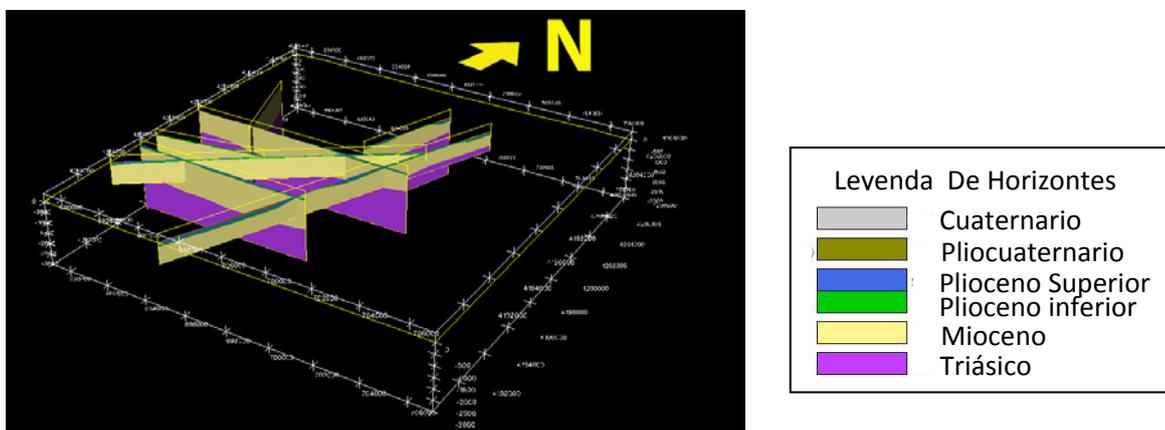


Figura 13. Modelo geológico 3D (Geomodeller) de Cabo Roig (mismos 7 cortes que en figura 4).

En la reconstrucción de las superficies estratigráficas el Plioceno resulta de 7 cortes hidrogeológicos (figura 4), mientras que el Triásico se incorpora a los cortes y al modelo a partir de su interpretación sísmica, como se describe más abajo (tabla V):

Unidades modeladas	Cortes (fuente)	Número de sondeos que perforan la unidad	Horizontes sísmicos interpretados
Muro Plioceno Superior	7 (cartografía/sondeos hidrogeológicos)	15	No
Muro Plioceno Inferior	7 (cartografía/sondeos hidrogeológicos)	17	No
Techo Triásico	7 (sísmica/sondeos petróleo)	6	Sí

Tabla V. Superficies de Referencia modeladas en 3D Geomodeller.

El muro del acuífero principal de Cabo Roig obtenida en 3D Geomodeller aparece en la figura 14.

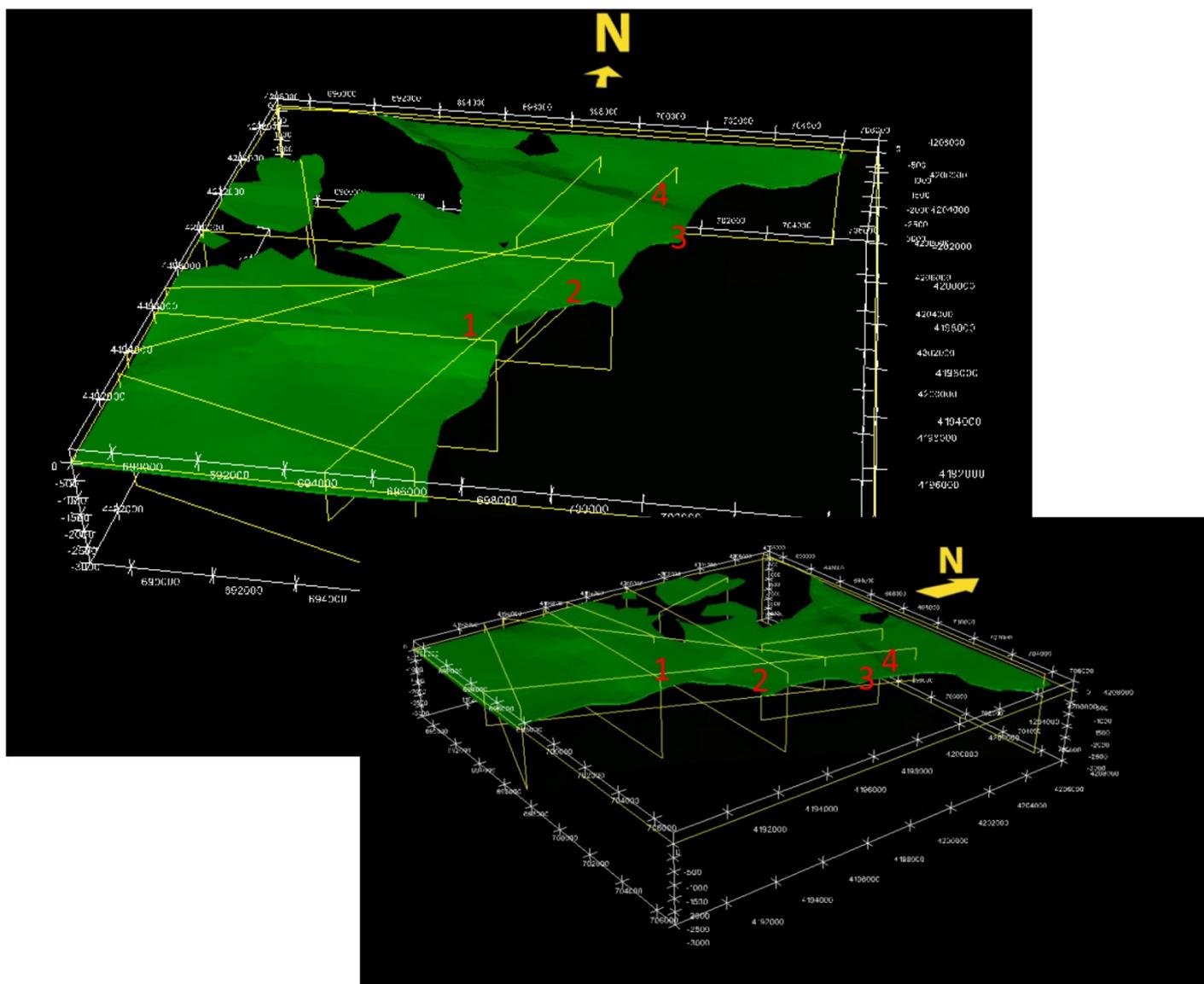


Figura 14. Muro del acuífero del Plioceno Inferior de Cabo Roig (explicación en texto).

5.1. Superficies de Techo y Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig

En la figura 14 los límites del modelo son $x= 689000$ a 707000 , $y= 4190000$ a 4208000 . Se observa que el muro del acuífero desciende suavemente de Sur a Norte y de Oeste hacia la costa, desde unos $+200$ msnm en el vértice SW hasta -200 msnm en el extremo NE), desplegando los mismos rasgos que caracterizan la geomorfología de Cabo Roig, a saber:

1. Falla de Río Seco
2. Depresión del Río Nacimiento
3. Depresión de la Cañada de la Estaca
4. Falla de San Miguel de Salinas

Estos mismos rasgos se representan en los dos mapas de isobatas, de techo y muro, del acuífero de la figura 15.

Respecto al techo, los límites N y S del acuífero se sitúan aproximadamente a cota 0 msnm el primero, y entre unos 40 y -80 msnm el segundo, el límite Oeste entre 100 y 150 msnm, y el Este bajo el nivel de mar en la línea de costa (0 a -100 msnm) debido a los 2 depocentros citados.

En los límites del acuífero, el muro discurre:

- A -100 msnm el límite Norte, es decir, implicando un salto de la falla de S. Miguel de Salinas de unos 100 m.
- Entre unos 0 y -140 en el Sur, es decir, con un salto la falla de Río Seco de unos 40-60 m.
- Entre unos 60 y 120 msnm al Oeste.
- Entre unos -60 y -200 msnm en la línea de costa.

Por tanto, el acuífero principal de Cabo Roig, entre sus dos límites-promontorio de Norte y Sur, desciende desde sus afloramientos del Oeste (elevados hasta a unos 150 msnm) hacia la línea de costa, línea donde techo y muro se encuentra bajo el nivel mar, profundizando el muro a unos -200 msnm.

Por otro lado, los espesores van aumentando paulatinamente hacia el mar, desde unos 30 al Oeste a unos 100 m en el límite de la parte continental del acuífero.

Al sur; las isobatas muestran el depocentro del Plioceno del Campo de Cartagena, hacia donde al acuífero podría tener continuidad, dado el mínimo salto de la falla de Río Seco hacia el interior.

Indicar por último que existe una extensa zona casi paralela a la costa donde el muro impermeable del acuífero se encuentra por debajo del nivel del mar, situándose la isohipsa de cota cero a una distancia de unos 3 km de la costa, que es el área más salinizada del acuífero (figura 8). No obstante, obsérvese que la intrusión parece afectar más a la depresión de la Cañada de la Estaca, justamente en las proximidades de donde se concentran la mayor parte de los puntos de extracción, que a la depresión del Río Nacimiento donde el muro alcanza cotas más bajas.

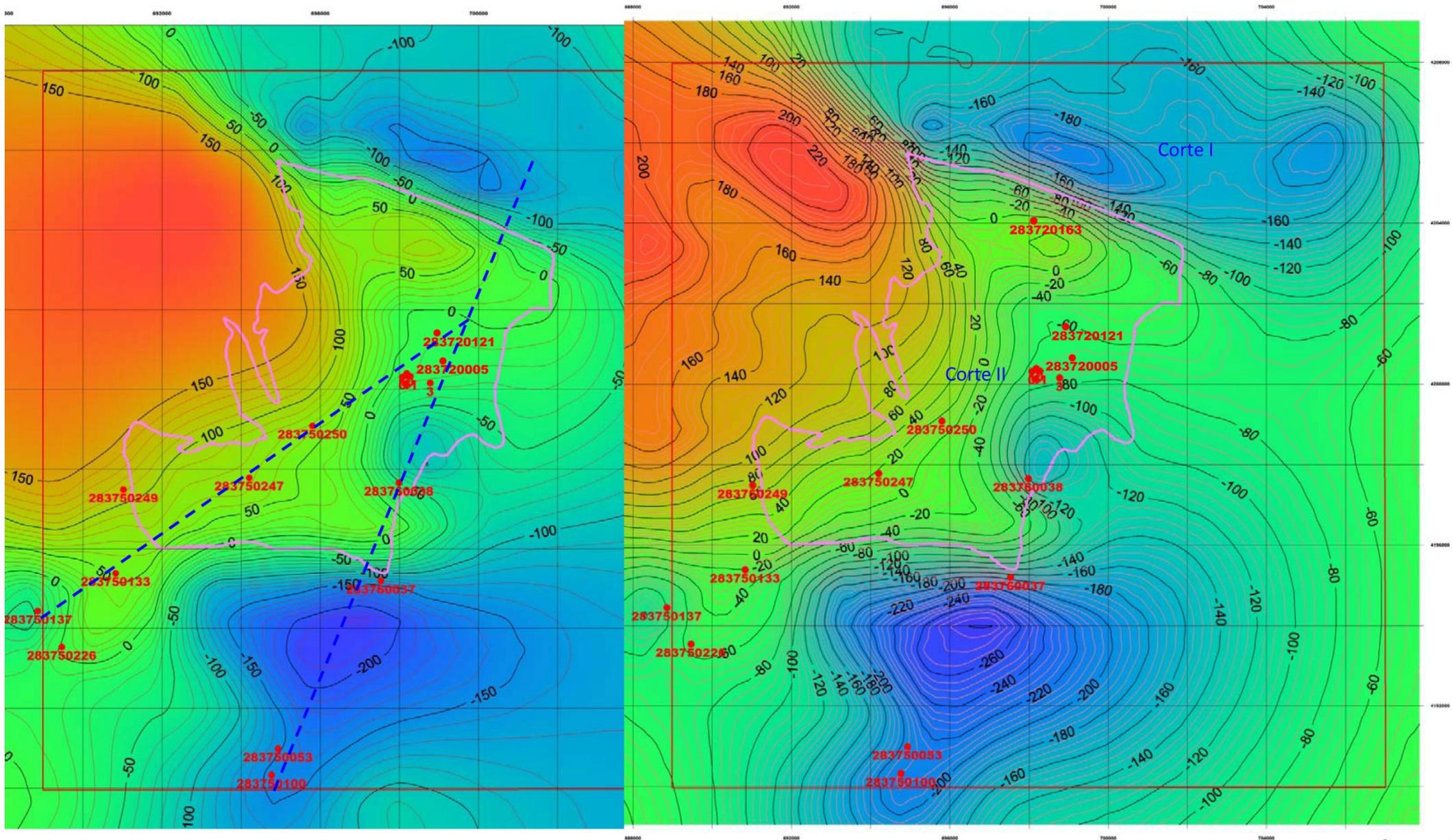


Figura 15. Mapa isobatas del Techo (izquierda) y Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig (perímetro en rosa). En rojo: límites del modelo 3D (retícula cada 2 km).

Las tablas VI y VII muestran las diferencias de cota de techo y muro del acuífero (msnm) entre los sondeos y la lectura de los mapas de la figura 14 en los puntos correspondientes.

Sondeo (Num_Reg)	Datos sondeo				Profundidad en Mapa Isobatas	Diferencia (m)
	Profund.	Cota	Corte_sondeo	Prof. Niv.Mar		
283750053	571	17	178	-161	-148	-13
283750100	220	20	180	-160	-162	2
283750133	252	100	100	0	39	-39
283750137	269	80	146	-66	-65	1
283750226	305	80	100	-20	0	-20
283760037	200	6	90	-84	-125	41
283760038	515	2	40	-38	-65	27
283750247	280.45	89	26	63	73	-10
283720004	95	25	32	-7	-20	13
283720076	90	50	45	5	-10	15
283720112	75	45	40	5	-8	13
283720113	60	45	40	5	-12	17
283720103	103	52	30	22	-9	31
283720005	70	27	30	-3	-8	5
283720121	110	36	30	6	-15	21

Tabla VI. Diferencias entre la cota de corte en sondeo y en mapa de isobatas del techo del acuífero Plioceno de Cabo Roig (15 sondeos). En rojo, las diferencia más significativas.

En la tabla VI las diferencias menores que 20 m son en general aceptables dadas las características del algoritmo de interpolación de 3D Geomodeller. El promedio, en valor absoluto es de 15 m. Existen 4 sondeos donde las diferencias son de cierta importancia, con significado geológico:

-Los sondeos 133 y 226 definen un promontorio de techo del acuífero al SW del mismo, ya en el Campo de Cartagena. Este “promontorio”, ligeramente exagerado en el proceso de modelación por 3D Geomodeller (la superficie modelada discurre entre 20-40 m por encima de los sondeos), es sospechoso porque interrumpe la falla de Río Seco y su depocentro al Sur. Sin embargo, obsérvese que en estos sondeos el muro está relativamente bien ajustado (tabla VII).

-Los sondeos 37 y 38 flanquean el promontorio Sur del acuífero, relacionado con la falla de Río Seco. Este “promontorio”, como el anterior, ha sido ligeramente exagerado por Geomodeller, al deprimir la superficie modelada en los flancos del mismo.

Estas diferencias, entre unos 20 y 40 m, se deben a dos hechos: el primero es que Geomodeller tiene en cuenta datos estructurales de buzamiento y geometría de cortes, lo que tiende a disminuir el peso de datos puntuales como los de los sondeos, y la segunda es que no ajusta superficies de forma aislada, una a una, sino todas a la vez teniendo en cuenta todo un volumen de datos geológicos.

Por lo que respecta al caso del muro (tabla VII), igual que en el caso anterior, las diferencias menores que 20 m son en general aceptables dada la metodología del algoritmo de interpolación de 3D Geomodeller. El promedio, en valor absoluto es de 20 m. Existen 3 sondeos (4, 112, 113) donde las diferencias son de cierta importancia, pero sin significado geológico, por inconsistencias de profundidades dentro del agrupamiento de sondeos de la parte central. En efecto (tabla II), existen 6 sondeos en la parte central del acuífero que cortan el muro: 283720004, 283720076, 283720112,

283720113, 283720103, y 283720121 ubicados a pocos cientos de m unos de otros, figura (15), con variaciones de cota de muro de alta frecuencia (muro en sondeos entre -15 y -64 m) que el programa tiende a ignorar (muro modelado entre -60 y -73 m).

Sondeo (Num_Reg)	Datos sondeo (metros)				Profundidad en Mapa Isobatas	Diferencia (m)
	Profund.	Cota	Corte_sondeo	Prof. Niv.Mar		
283750053	571	17	218	-201	-204	3
283750100	220	20	215	-195	-211	16
283750133	252	149	154	-5	-22	17
283750137	269	100	163	-63	-77	14
283750226	305	80	140	-60	-60	0
283760037	200	6	190	-184	-169	-15
283760038	515	2	174	-172	-145	-27
283750247	280	89	59	30	16	14
283750249	325	97	23	74	70	4
283750250	105	46	46.5	-0.5	12	-12.5
283720004	95	25	61	-36	-73	37
283720076	90	50	90	-40	-67	27
283720112	75	45	75	-30	-66	36
283720113	60	45	60	-15	-67	52
283720103	103	52	99	-47	-65	18
283720121	110	36	110	-64	-60	-4
283720163	60	35	60	-25	5	-30

Tabla VII. Diferencias entre la cota de corte en sondeo y en mapa de isobatas del muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig (17 sondeos).

Por tanto, a partir de la información de sondeos, puede concluirse unos márgenes de incertidumbre de unos 20 m en las superficies modeladas de techo y muro, aceptables dentro de márgenes de variación desde +150 a -50m la primera y entre +100 y -200 m la segunda. Localmente, pueden existir errores de unos 40 m. Obsérvese que el muro está relativamente mejor ajustado que el techo.

5.2. Cartografía de subsuelo del Techo del Triásico en el entorno de Cabo Roig (Torrevieja-Campo Cartagena). Posibilidades de almacenamiento geológico.

El Modelo geológico 3D (Geomodeller) de Cabo Roig, que aparece proyectado en los 7 cortes usados en su construcción en la figura 13, contiene, además de las dos de techo y muro del acuífero del Plioceno, una tercera superficie de referencia: el Techo del Triásico, obtenido por interpretación de un conjunto de líneas sísmicas, entre las que se encuentran las 17 de la tabla IV, que corresponden al entorno de Cabo Roig (de hecho, sólo 6 líneas entre esas 17 “tocan” el acuífero, de las que son relevantes las 3 interpretadas en las figuras 11 y 12).

En efecto, además de completar el modelo 3D del acuífero Plioceno, incorporando el espesor de Mioceno y profundidad del Basamento Alpujarride, se pretendía cartografiar el **Techo del Triásico en el entorno de Cabo Roig** para obtener información relativa a:

- 1) La explotación de eventuales recursos geotérmicos del área, dado que es conocido el anormalmente alto gradiente geotérmico de la región (en los sondeos San Miguel de Salinas1-2 está comprendido entre los 4 y 5°/100 m); así como,
- 2) La utilización de dicho substrato triásico, o niveles superiores, como reservorio de almacenamiento de sustancias de rechazo de diversos procesos industriales (CO₂, salmueras u otras).

Puesto que tanto estos recursos geotérmicos como almacenes pueden prolongarse extensamente en el subsuelo, se ha usado toda la cobertura sísmica pública disponible en el entorno de Cabo Roig, extendiendo el estudio hacia la Cuenca de Torrevieja al Norte (donde se ubican sondeos de petróleo) y el campo de Cartagena al Sur en una veintena de km alrededor del acuífero de Cabo Roig (figura 16).

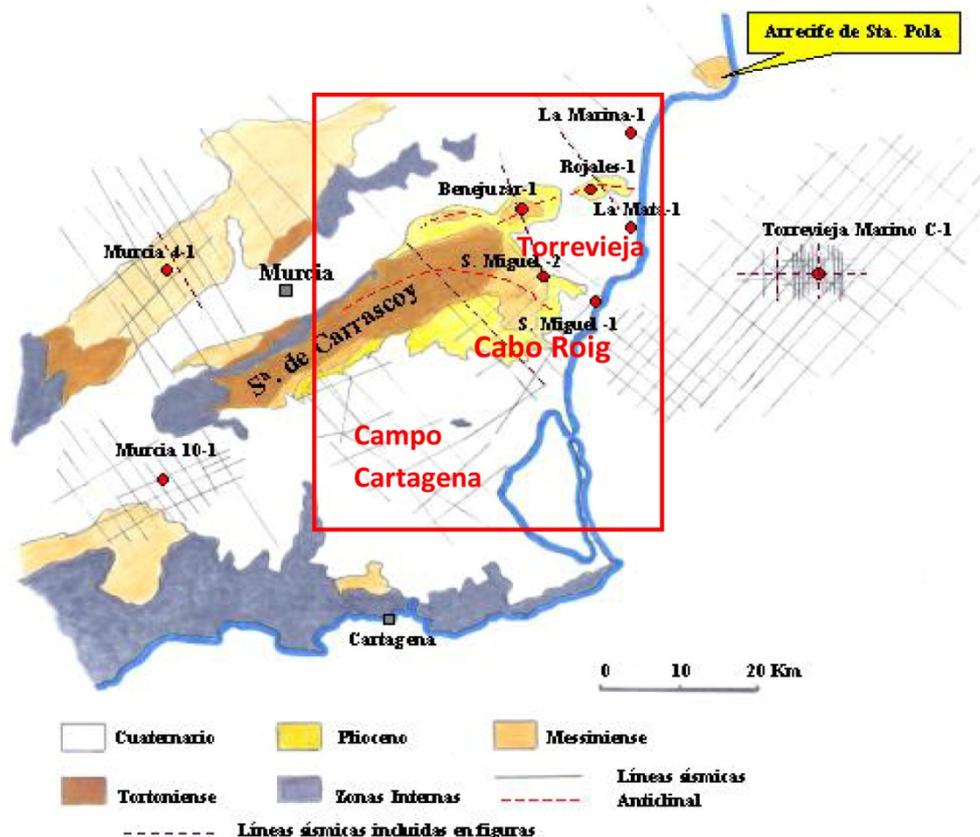


Figura 16. Zona de estudio (recuadrada en rojo: Torrevieja-Campo Cartagena). Mapa geológico simplificado (según Martínez del Olmo, 2008), sondeos y líneas sísmicas.

La región estudiada en este apartado (recuadrada en rojo en figura 16) y sus cuencas sedimentarias ha sido de objeto de una deformación estructural en la que pueden diferenciarse dos importantes fases: una de edad Miocena de carácter extensivo (creación de cuencas limitadas por fallas) y otra, de tipo compresivo, activa durante el Mioceno superior y Cuaternario. El reducido tamaño de las cuencas con bordes activos durante la sedimentación y la compresión tardía caracterizan que el relleno sedimentario sufra notables cambios de facies desde los márgenes a la cuenca. Es así como se reconocen buenas rocas almacén, arenosas o carbonatadas, en los bordes activos que hoy constituyen los afloramientos más conocidos (Sierras de Carrascoy, Hurchillo, Puerto de la Cadena, Colinas intermedias, arrecife de Santa Pola, etc) y mediocres almacenes conglomeráticos o arenosos en los sondeos exploratorios que se realizaron en posiciones alejadas de los afloramientos.

Por otro lado, la deformación observada en superficie debe proporcionar una aceptable imagen de la estructuración profunda, ya se trate de Antiformas con relieve positivo, o sinformas que constituyen el grueso de las cuencas y corresponden a superficies topográficas planas donde sólo la sismica proporciona información. Precisamente, la consideración de 18 líneas sísmicas del Campo de Cartagena entre la Sierra de Carrasco y el Mar Menor, interpretadas junto con las 17 de la tabla IV más próximas a la zona de Cabo Roig, han dado lugar al *Mapa isobatas Techo Triásico* de la figura 17, obtenido como brevemente se describe a continuación.

La interpretación en cada uno de los 35 perfiles sísmicos del área de la figura 16 con el software adecuado del reflector correspondiente al techo del triás (reconocible en los perfiles de mejor calidad por las intersecciones de los sondeos de petróleo) produce, por interpolación, un mapa isócronas en tiempo doble de dicho horizonte de interés. Para el calado de profundidades y consiguiente transformación de isócronas a isobatas se usaron los 6 sondeos de petróleo disponibles en el área que cortan el basamento triásico (tabla VIII y figura 17). Se trata de un ajuste de pares Tiempo horizontes sísmicos-Profundidad de corte sondeo, que no requiere sismograma sintético**.

Las discrepancias obtenidas entre las profundidades de las isobatas sísmicas y los cortes de los sondeos de petróleo se dan en la tabla VIII. El promedio de las diferencias, en valor absoluto, es de 33 m, más que aceptable para una superficie ubicada entre unos -700 y -1800 msnm.

Sondeos	TD	Elevación	Corte Trias-Sondeo	Prof. Ref.Nivel Mar	Prof. Isobatas Trias	Diferencia(m)
Benejuzar-1	1648	113	1499	-1386	-1344	-42
La Marina-1	1610	74.5	925	-851	-853	2
La Mata-1	829	11.6	759	-747	-734	-13
Rojales-1	1562	82.5	1221	-1139	-1136	-3
S.M.Salinas-1	805	31	740	-709	-686	-23
S.M.Salinas-2	1134.5	53.6	1096	-1042	-969	-73

Tabla VIII. Diferencias entre la cota de corte en sondeo y en mapa de isobatas sísmico del Techo del Triásico en el entorno de Cabo Roig.

**Se puede realizar un calado de toda la sección estratigráfica, mediante construcción de un sismograma sintético desde el sondeo Benejuzar-1, que es el único que cuenta con las testificaciones geofísicas precisas para ello, una vez corregidas las desviaciones existentes entre las velocidades de las formaciones registradas en el sondeo y las velocidades utilizadas en el procesado de los perfiles Sísmicos. Una vez caladas las diferentes superficies de las unidades de estratigrafía sísmica (apartado 3.1), se puede realizar una interpretación continua o arrastre de dichas unidades a lo largo de todo el área de trabajo1.

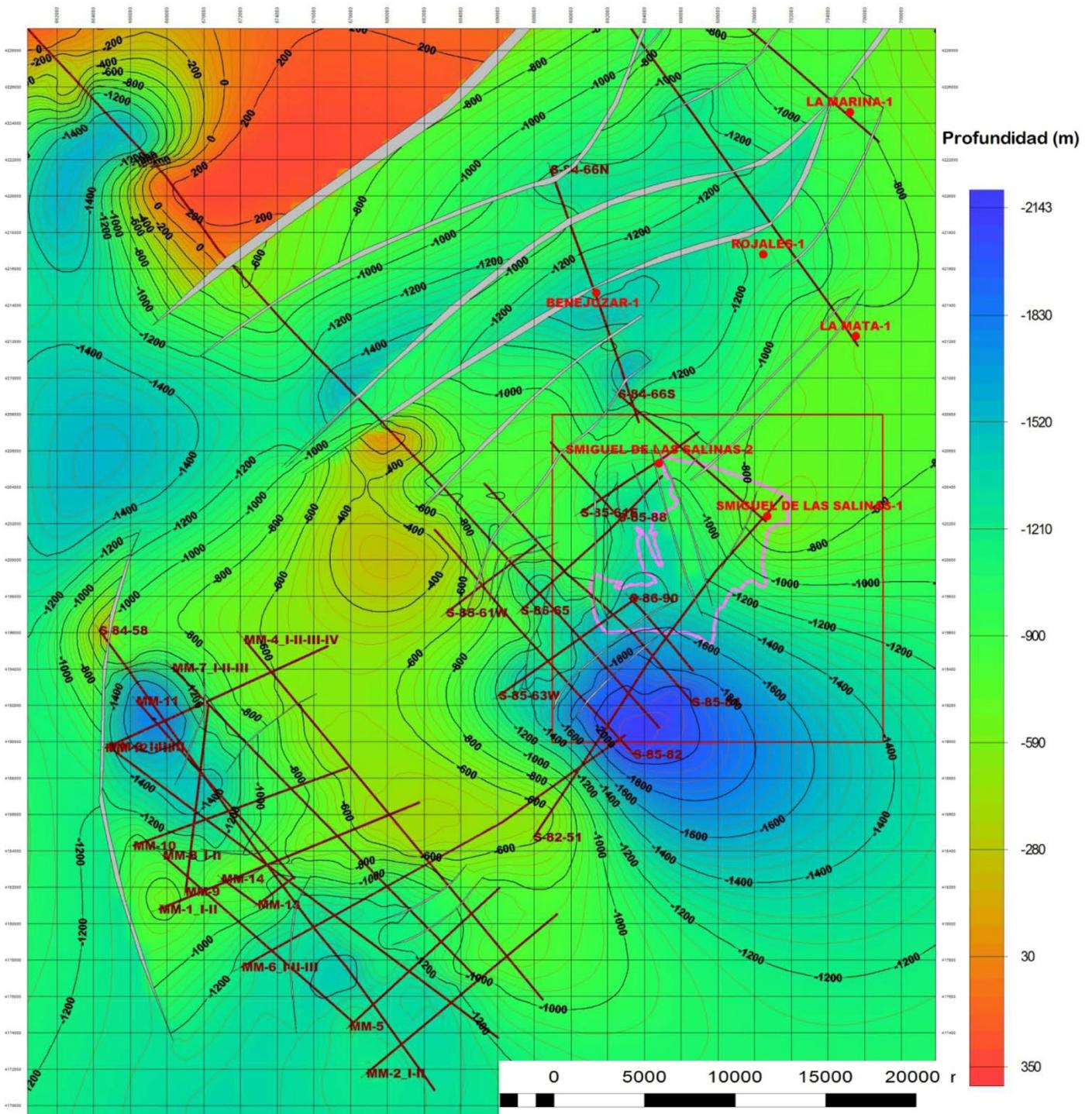


Figura 17. Mapa isobatas Techo Triásico. Se indican la líneas sísmicas usadas en su interpretación. La extensión corresponde al recuadro rojo de la figura 16. Explicación en texto.

En cuanto a interpretación de resultados, en la figura 17 se observa un basamento muy estructurado con alto grado de deformación, afectado por numerosos pliegues y fallas, siendo más importantes en cuanto a salto y extensión las inversas SO-NE. El basamento Alpujarride desciende desde sus afloramientos del NO en la hoja 913 (figura 18) hacia la vertiente NO de la S. del Hurchillo, donde se ubica a -1000 msnm, y desde el alto de S. de Carrascoy hacia el mar, donde alcanza los -2200 msnm. Los espesores miocenos llegan a alcanzar más de los 1600 m en varios depocentros, lo que justificó en su momento la exploración sísmica y sondeo para la búsqueda de hidrocarburos.

En la figura 18 se presenta la interpretación de la figura 17 en conjunción con la cartografía de superficie. Entre las estructuras positivas, la más importante corresponde al antiforme de

Torremendo, donde el basamento se eleva hasta unos -200 msnm, flanqueado al NO por cabalgamientos con saltos de hasta varios centenares de m. Hacia la costa existe otra elevación importante de basamento, siguiendo aproximadamente las líneas sísmicas MM-01 y MM-06, hasta unos -500 msnm (figuras 17-18). Por tanto entre el antiforme de Torremendo y el alto del Campo de Cartagena se delinea una interesante elevación del basamento triásico que si tomamos como referencia la isobota -800 tendría unas dimensiones de unos 25 x 10 km. La delineación es grosera porque no hay cobertura sísmica precisamente según el eje N-S de la estructura elevada, que debe estar sellada por margas superiores del Mioceno (Margas de la Atalaya y de Torremendo, tabla III).

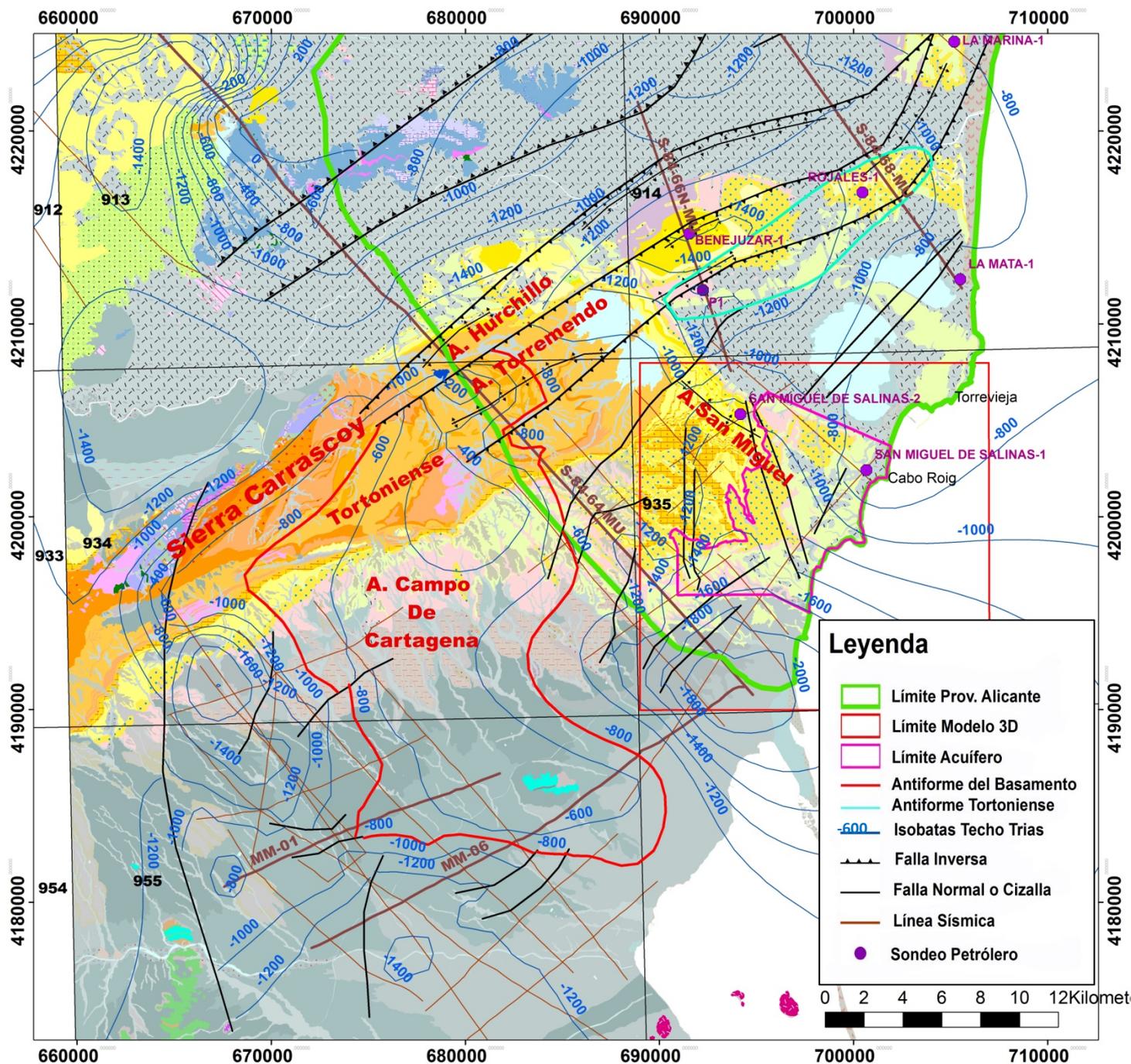


Figura 18. Isobatas y estructuras de basamento Triásico sobre mapa geológico 1:50.000 de la zona de estudio (Geode). La extensión corresponde al recuadro rojo de la figura 16. Explicación en texto. Las líneas 84-64, 84-66 y 84-68, aparecen en figs 19-22

La disposición del basamento en la única línea sísmica disponible que atraviesa la S. de Carrascoy por la zona del antiforame de Torremendo aparece en la figura 19 (línea 84-64, etiquetada en figura 18). A lo largo de esta línea sísmica el basamento asciende desde unos -2200 msnm hasta unos -400 msnm, siendo tapizado por las unidades basales del Mioceno, que lógicamente también deben ofrecer posibilidades de almacenamiento en relación con la elevación de basamento hacia la Sierra de Carrascoy.

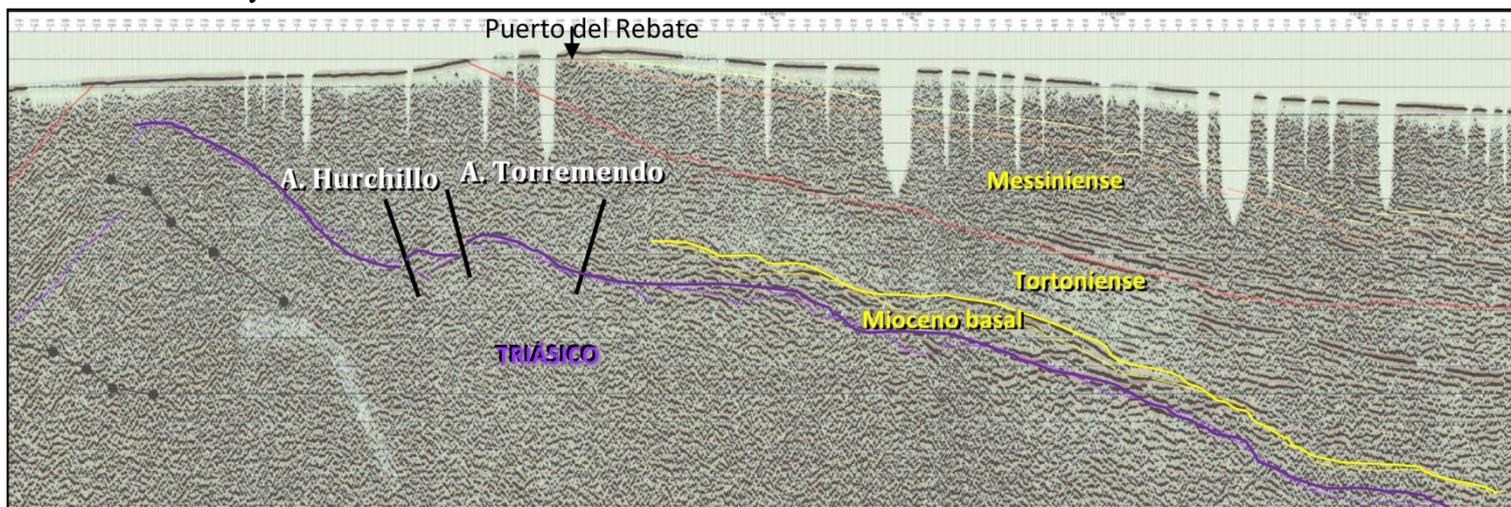


Figura 19. Línea 84-64(34.8 km.), caracterizando la geometría de la Cuenca del Campo de Cartagena, justo al sur de Cabo Roig, entre la línea de costa y el antiforame de Torremendo.

Al NE del antiforame de Torremendo, entre los cabalgamientos principales SO-NE, el basamento se deprime hacia el sondeo Benejuzar-1 (hasta unos -1400 msnm) y luego se eleva hacia Rojas-1 y el resto de sondeos de petróleo de la Cuenca de Torre Vieja (figura 18). Tanto en Benejuzar-1 como en Rojas-1 el basamento despliega relieves positivos y negativos según las líneas sísmicas SE-NO que pasan por sus proximidades (figuras 20 y 21). Estructuras de carácter antiformal se desarrollan por encima del Triásico, afectando al Mioceno basal y a las unidades III-IV (Tortoniense). Por tanto, otra posibilidades de almacenamiento en el Tortoniense arenoso (A. Columbares y equivalents.) aparecen entre los sondeos Benejuzar-1 y Rojas-1 (figuras 20 y 21).

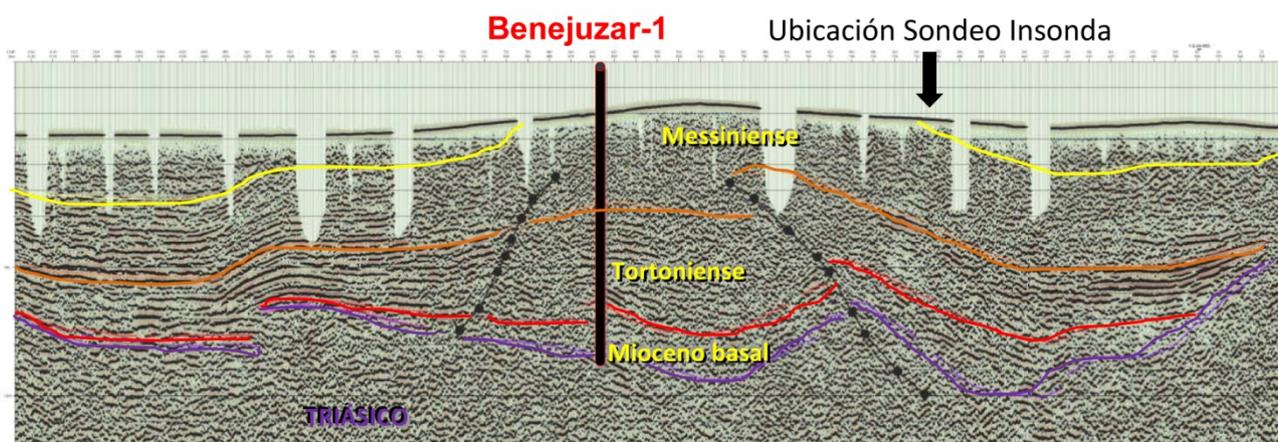
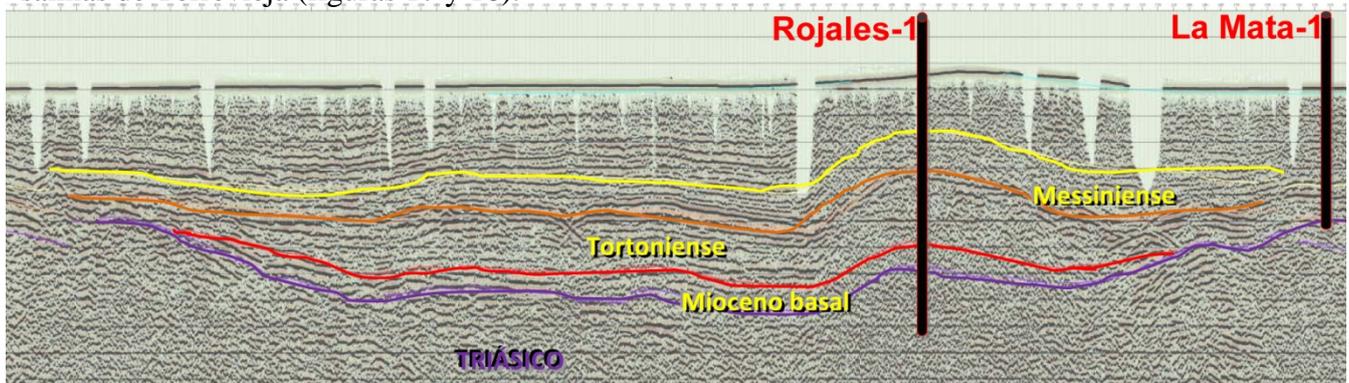


Figura 20: Línea S-84-66-N (14.6 km). Se observa estructura antiformal en las proximidades de Benejuzar-1. Se indica la posición propuesta para el sondeo geotérmico Insonda. IGME, IPF, CGS e IBS (2013).

Obsérvese como las líneas 84-66-N y 84-68 delinear un ascenso del basamento hacia la línea de costa, confirmada por los sondeos S.M.Salinas-1 y 2 (línea 84-66-S). Por tanto, los sondeos y líneas citados cartografían un ascenso relativo del basamento, con escalones según fallas normales bajo la salinas de Torrevieja (figuras 17 y 18).



Figuras 21. Línea S-84-68. (22 km) Se observa estructura antiformal en las proximidades de Rojales -1. La Mata-1 corta Trias a 759m (Log final, Ministerio Industria 1970, Servicio Hidrocarburos, 1153).

Del estudio estructural de subsuelo realizado en este apartado se deduce que la región estudiada alberga posibilidades para almacenamiento geológico (salmueras, fluidos de rechazo, CO₂, etc). En efecto, a la luz de los horizontes sedimentarios cortados por los sondeos y el control sísmico de tales horizontes, puede establecerse una columna litológica regional que, aunque sufre numerosos cambios de facies, muestra la presencia de tres almacenes regionales: el Trías carbonatado, el Complejo Basal Mioceno y las Areniscas del límite Columbares-Torremendo.

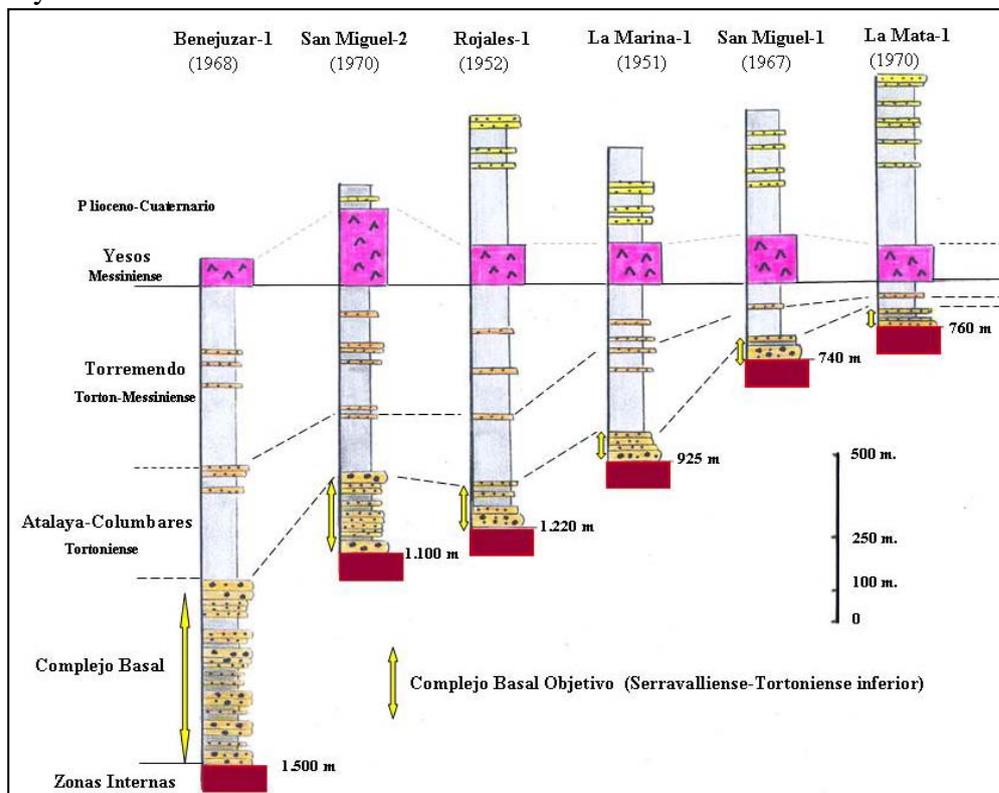


Figura 22. Columnas sintéticas obtenidas de los sondeos exploratorios (datum base de los yesos messinienses). Correlación con las Formaciones definidas en superficie (Sierra de Carrascoy; según Martínez del Olmo, 2008).

De estas columnas hay que destacar:

- La continua presencia, en pozos y afloramientos, de un Complejo Mioceno Basal que tapiza la discordancia entre el Mioceno y el substrato tipo Zonas Internas, formado por conglomerados con matriz arenosa, areniscas y arcillas: Formaciones conocidas como Conglomerados de la Cadena-Cresta del Gallo. Representa un almacén complejo, pero continuo, que puede alcanzar los 60-100 m de espesor.
- La existencia de delgados niveles arenosos pertenecientes a las Areniscas de Atalaya-Columbares, menos desarrollados cuanto más alejados del borde de cuenca que define la Sierra de Carrascoy.
- Las formaciones arcillosas y evaporíticas (margas de Torremendo del Tortoniense superior, y yesos de San Miguel, del Messiniense), que constituyen un sello fiable con espesor total del orden de los 600-900 m.

Las estructuras de almacenamiento cartografiadas en la figura 18 se resumen en la tabla IX:

Estructura	Sondeos de control	Cota de Cierre	Área (km2)	Espesor (neto)	Porosidad	Volumen poroso (km3)
Antiforma Basamento (Complejo bas.+Trías carbo.)	-	-800	300	200	2%	1,2
Benejuzar- Rojales-1 (CB+Areniscas Tortonienses)	Benejuzar- Rojales-1	-700	20	100	1.5%	0,03
A. Hurchillo (Complejo Basal+ Areniscas Tortonienses)	-	-800	10	100	1.5%	0,015

Tabla IX: Resumen de estructuras de almacenamiento. Espesores netos estimados a partir de sondeos de petróleo. Porosidades según diagráfias del sondeo Benejuzar-1 (Plan ALGECO2, IGME, 2010). Por ejemplo, la capacidad de CO₂ correspondiente a un factor de eficiencia del 20% (ratio de desplazamiento del agua de formación por CO₂) y densidad del CO₂ de 0.5 Tm/m³, sería de unos 120 millones de Tm en la estructura de basamento, y de 3 y 1,5 millones de Tm, respectivamente, en las de Benejuzar- Rojales y A. Hurchillo.

En resumen, las cuencas de Campo Cartagena-Torre vieja albergan posibilidades de trampas en acuíferos profundos para almacenamiento geológico (salmueras, fluidos de rechazo, secuestro de CO₂, etc), si bien se encuentran en un nivel de conocimiento aún incompleto, lo que significa que para una mejor estimación se necesitarán pequeños nuevos programas de trabajos, como:

- Reprocesar las líneas sísmicas que existen en el área.
- Adquirir nueva sísmica (no menos de 200 km de línea) para poder definir la profundidad, superficie cerrada, altura de cierre etc., de los objetivos planteados.
- Mejorar los datos de de petrofísica: espesor neto y porosidad de los almacenes objetivo desde nuevas diagráfias de pozo (dos pozos profundos).

Como conclusión de todo este capítulo de Cartografía de subsuelo y Posibilidades de almacenamiento geológico, cabe señalar el interés de la información petrolera del área de Campo Cartagena-Torre vieja que ha permitido:

- La cartografía del subsuelo en una amplia extensión de unos 40 x 40 km (figuras 17, 18).
- Aunque falta cobertura sísmica y control de sondeo, se ha delineado una posible estructura antiformal en silla de montar al basamento de gran extensión, centrada al SE de la Sierra Carrascoy.
- Otras elevaciones de basamento y Tortoniense son delineadas por sondeos y líneas sísmicas bajo la Cuenca de Torre vieja.

6. ACTUALIZACIÓN DE RESERVAS HIDROGEOLÓGICAS

6.1. Datos petrofísicos

Para la caracterización del sistema poroso de las formaciones permeables del acuífero Mar Menor no se ha realizado toma de muestras de afloramientos de campo, y por tanto, no se ha llevado a cabo ningún estudio petrofísico de determinación de la porosidad abierta, ni petrográfico específico. Ante esta falta de datos, los cálculos de reservas se han realizado para las dos porosidades siguientes:

- Porosidad del 1%
- Porosidad del 3%

El valor del 1% corresponde al obtenido en litologías calcareníticas del Tortoniense-Messiniense a partir de diagráfias geofísicas de los sondeos de petróleo de San Miguel de Salinas-1 y 2. Dado que este valor puede resultar bajo para litologías equivalentes del Plioceno, teniendo en cuenta valores obtenidos en otras zonas de estudio y bibliográficos, se ha tomado también una porosidad más alta para el cálculo de reservas. Como referencia, se determinó un rango de porosidades eficaces del 1-4%: en los ensayos bombeo en 3 de los sondeos realizados por la UPC en el estudio para el Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo Segura (SCRATS). Fuente: “Modelo de flujo subterráneo con densidad variable para simular la intrusión marina en el acuífero de Cabo Roig Alicante. (DPA-IGME, 2007b, pág. 8)”.

6.2. Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas

Una vez creadas las superficies que nos servirán como muro y techo del acuífero (figura 15 en apartado 5.1), es necesario realizar cálculos volumétricos para la estimación de las reservas del mismo. Con ayuda del software gOcad, se genera un *3D stratigraphic grid*. El *stratigraphic grid* es una malla 3D regular que puede ser deformada y cortada por fallas para ajustarla a un modelo estructural de las superficies de referencia. Para el cálculo del **volumen total de reservas** del acuífero, en el caso de Cabo Roig se ha ajustado una malla 3D regular al volumen limitado por la superficie piezométrica del mismo (mapa de Isopiezas de la figura 8) y el muro antes citado. Para el cálculo de la **curva de explotación**, desde un sondeo determinado, se requiere la determinación de los volúmenes saturados entre la superficie piezométrica y distintas cotas de subsuelo (el volumen del acuífero, representado por el *stratigraphic grid* puede cortarse desde la superficie piezométrica a diferentes cotas y así calcular el volumen de roca saturada). También es necesario conocer la porosidad abierta y el coeficiente de almacenamiento de las formaciones acuíferas.

Los valores de reservas de agua subterránea calculados se resumen en Tabla X y figura 23, en la que se ha representado la curva de reservas del acuífero de *Cabo Roig*. Por otro lado, en el caso de Cabo Roig, es necesario tener en cuenta el nivel de salinidad de las reservas. **Según la clasificación de Riverside** (US Salinity Laboratory; Norma clasificación aguas; 1954), que indica el índice de salinidad, el acuífero sólo tendría dos zonas explotables (en azul en figura 7). Las reservas correspondientes a estas zonas explotables se ven reducidas a una tercera parte (tabla IX).

El nivel piezométrico más alto se sitúa en el noroeste del acuífero, cerca de la localidad de San Miguel de Salinas (figura 8), con una altura de unos 30 m s.n.m. El punto de menor potencial está en el sureste en las proximidades del Río Seco, a unos 2 km de la costa, con una altura de unos -70 m s.n.m. Obsérvese que este gradiente NO-SE es consistente con la configuración del muro del acuífero entre unos 120 msnm al NO y unos -240 msnm al SO. Entre los niveles extremos, 30 a -70 msnm según el gradiente citado, se sitúan el resto de piezometrías intermedias, realizándose los cálculos de

reservas cada 20 metros por encima de la cota mínima y cada 40 m por debajo de la cota citada (tabla X y figura 23).

Cota (msnm)	Roca saturada (km ³)	V en hm ³ (porosidad 1%)		V en hm ³ (porosidad 3%)	
		Todo acuífero	Zona explotable	Todo acuífero	Zona explotable
30	2,20	22	7,2	66	21,60
10	1,80	18	6,2	54	18,60
-10	1,40	14	4,7	42	14,10
-30	1,10	11	3,4	33	10,20
-50	0,84	8	2,5	25	7,50
-70	0,62	6	2,0	18	6,00
-110	0,48	5	1,46	14	4,38
-150	0,38	4	1,12	11	3,35
-190	0,33	3	0,88	10	2,64
-230	0,30	3	0,69	9	2,07

Tabla X. Resumen de reservas del acuífero Cabo Roig. Reservas dadas por el modelo 3D del acuífero (gOcad) para porosidades del 1% y 3%, respectivamente, en todo el acuífero y en la zona explotable menos salinizada.

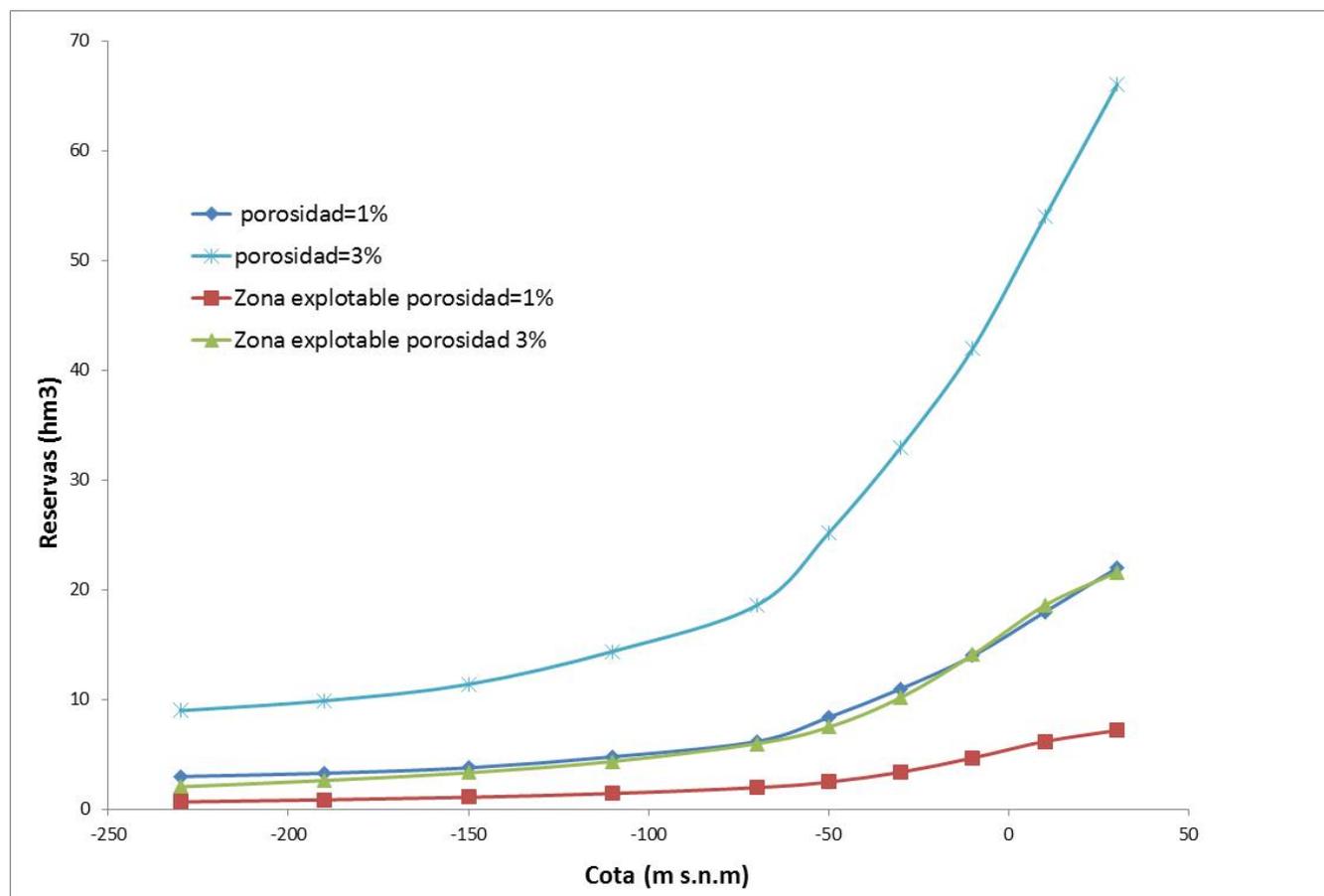


Figura 23. Curvas de reservas del acuífero Plioceno de Cabo Roig obtenidas a partir del modelo geológico 3D del acuífero.

6.3. Curvas de explotación

La curva de explotación del acuífero Plioceno de Cabo Roig se podría calcular tomando como referencia el sondeo Campo de Golf, ubicado en la zona explotable del sur del acuífero, igual que el sondeo Depuradora de la misma zona, pero donde el muro está a cota inferior (unos 0 msnm en Campo de Golf, frente a unos 15-20 msnm en el entorno Depuradora, según mapa isobatas).

Los niveles piezométricos en ambos sondeos serían de unos -10 m s.n.m. en el sondeo Depuradora, y unos 5m en Campo de Golf. Si a esta piezometría de referencia del año 2002 (figura 8) se le suma los 4-5 m de evolución positiva que parece haber tenido la piezometría del acuífero en los últimos 10 años (figura 6) los niveles piezométricos a considerar serían -5 m s.n.m. para el sondeo Depuradora y 10 m s.n.m. para el sondeo Campo de Golf. El volumen modelado de reservas explotables desde el sondeo Campo de Golf entre 10 y 0 msnm resulta ser de sólo 0.2 hm³ para una porosidad del 1% y de 0.6 hm³ para una porosidad del 3%, en la zona sur no salinizada del acuífero.

Obsérvese la inconsistencia entre el nivel piezométrico y el muro del acuífero en el entorno del sondeo Depuradora, ya que el primero se ubica unos 20 m más bajo que el segundo. Ello puede deberse a la pobre calidad de la piezometría en este área (donde está bastante extrapolada, figura 8), o bien a que el modelo del muro es incorrecto, por elevado, en esta zona. El alto relativo del muro del acuífero al Sur de Cabo Roig está condicionado por los dos sondeos citados conjuntamente con los 2 sondeos que cartografiaban las depresiones de muro adyacentes, y por la falla del Río Seco, cuyo salto (de unos 40-60 m) es bastante interpretativo en cortes y secciones sísmicas. En definitiva, incertidumbres de modelo de muro de 10-20 m como las citadas, darían lugar a grandes variaciones relativas de reservas tan exiguas como las calculadas, que hay que tomar por tanto con precaución.

Un eventual nuevo sondeo situado dentro de la zona de explotación sur con mejor aprovechamiento de reservas habría que situarlo al este del sondeo Campo de Golf (a unos 600 m), donde el nivel piezométrico se situaría a -5 m y la base del acuífero plioceno profundizaría hasta unos -50 m s.n.m. La curva de explotación de dicho sondeo se puede ver en la figura 23, entre -5 m y -45 m. La tabla XII muestra las reservas explotables de este nuevo sondeo (2 hm³ para una porosidad del 1% y 7 hm³ para una porosidad del 3%). Estas reservas están estimadas para las condiciones más favorables, es decir que la cuña salina procedente de la zona más salinizada de la franja costera oriental del acuífero no alcance las cotas modeladas de muro en ese sondeo.

Volumen en hm ³ (porosidad 1%)	Zona explotable: $Y = -8E-11x^5 - 4E-08x^4 - 6E-06x^3 + 5E-06x^2 + 0,0681x + 5,4005$
Volumen en hm ³ (porosidad 3%)	Zona explotable: $Y = -2E-10x^5 - 1E-07x^4 - 2E-05x^3 + 2E-05x^2 + 0,2044x + 16,202$

Tabla XI. Ajustes polinómicos de las curvas de reservas del acuífero Cabo Roig (figura 25) para la zona explotable.

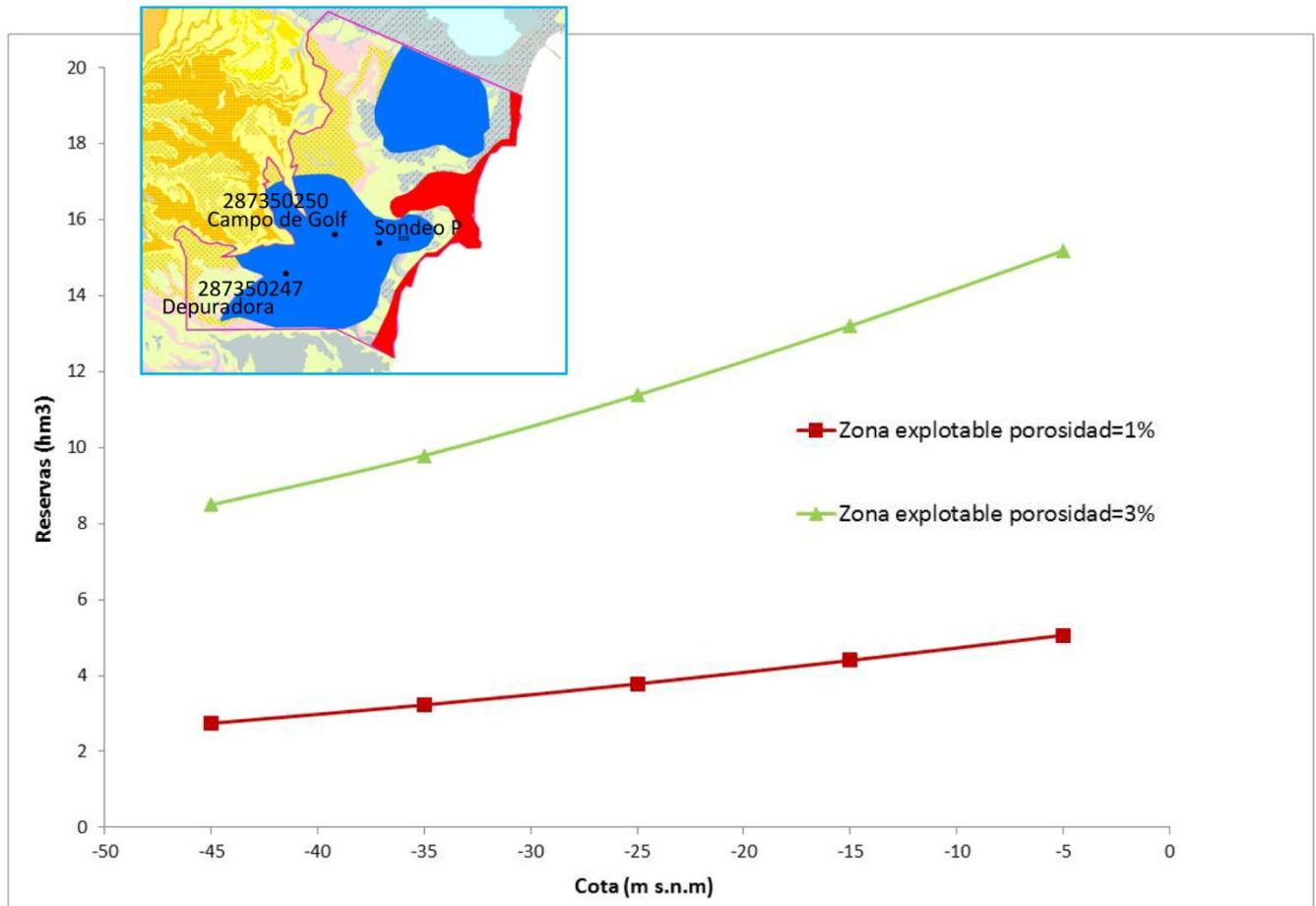


Figura 24. Curvas de explotación del acuífero Cabo Roig desde un posible sondeo situado al este de Campo de Golf (coordenadas del sondeo X=697250; Y=4198800).

	V en hm ³ (porosidad 1%)	V en hm ³ (porosidad 3%)
Reservas (Cota)	Zona no salinizada	Zona no salinizada
A. Reservas (-5 m)	5	15
B. Reservas (-45 m)	3	8
Reservas explotables (A-B)	2	7

Tabla XII. Reservas explotables del acuífero Cabo Roig desde un hipotético sondeo situado al este de Campo de Golf.

7. CONCLUSIONES. IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS DEL MODELO GEOLÓGICO 3D.

El principal objetivo la actividad “**Desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo para la caracterización de recursos hidrogeológicos profundos de Alicante**”, dedicada a la evaluación de reservas hídricas mediante modelación geológica 3D, es la mejora del conocimiento hidrogeológico del subsuelo alicantino.

Este informe presenta resultados parciales de dicha actividad en el Área de Cabo Roig. El Área de Cabo Roig fue seleccionada porque se consideró viable su modelación 3D dada la información hidrogeológica previa disponible (sondeos, cortes), y por el interés de su sección estratigráfica y

basamento carbonatado profundo del triásico, que cartografió una serie de líneas sísmicas petroleras de calidad aceptable y media docena de sondeos de petróleo. La metodología usada en la modelación geológica 3D se ha adecuado a los datos disponibles: nivel de exposición de estructuras geológicas y la cantidad y calidad de datos geofísicos y sondeos.

Consideraciones geométricas sobre el modelo geológico 3D:

El modelo geológico 3D del acuífero Plioceno de **Cabo-Roig** calculado en Geomodeller consta de 3 superficies de referencia, una Triásica y dos del Plioceno inferior, techo y muro del acuífero, más dos fallas principales.

Morfológicamente, 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 de Cartagena), 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.

Respecto al basamento triásico, regionalmente, Cabo Roig se ubica entre dos altos estructurales de dicho basamento, más o menos coincidentes con los antiformes de Torremendo y San Miguel de Salinas, entre los que se desarrolla un importante depocentro Mioceno, ya en el Campo de Cartagena.

Límites del acuífero:

Los Límites oeste y este del acuífero están bien establecidos sin controversia: el primero corresponde al contacto entre las areniscas del Plioceno y las margas que afloran desde San Miguel de Salinas al NW hasta río Seco, al SW; y el segundo a la franja costera que une Punta Prima hasta el río Seco.

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:

- Al norte, la Falla de S. Miguel de Salinas (Montentat, 1973), de dirección NE-SW, que tiene un carácter de desgarre dextral y de falla normal, con bloque septentrional hundido, en el que se sitúa la cuenca neógena de Torrevieja. Aunque el salto de esta falla es discutido (según Rodríguez Estrella y Lillo Carpio, 1992, el salto es de hasta 300 m, según sondeos; mientras que en el modelo 3D de este trabajo resulta ser de unos 100 m, aunque sin control de sondeos), 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, que tiene un carácter de desgarre dextral y de falla normal, con bloque meridional hundido, en el que se sitúa la cuenca neógena del Campo de Cartagena, propiamente dicha. Según Rodríguez Estrella y Lillo Carpio (1992.- Geomorfología del Mar Menor y sectores litorales contiguos Murcia-Alicante pp. 749-787) el salto registrado por sondeos es superior a los 100 m; mientras que en el modelo 3D de este trabajo resulta ser de unos 40 m, aunque con un control de sondeos y sísmico escaso. La falla es de muy poca entidad en el modelo 3D calculado en Geomodeller (figura 25), y no aísla el acuífero de Cabo Roig que se prolonga hacia el Campo de Cartagena.

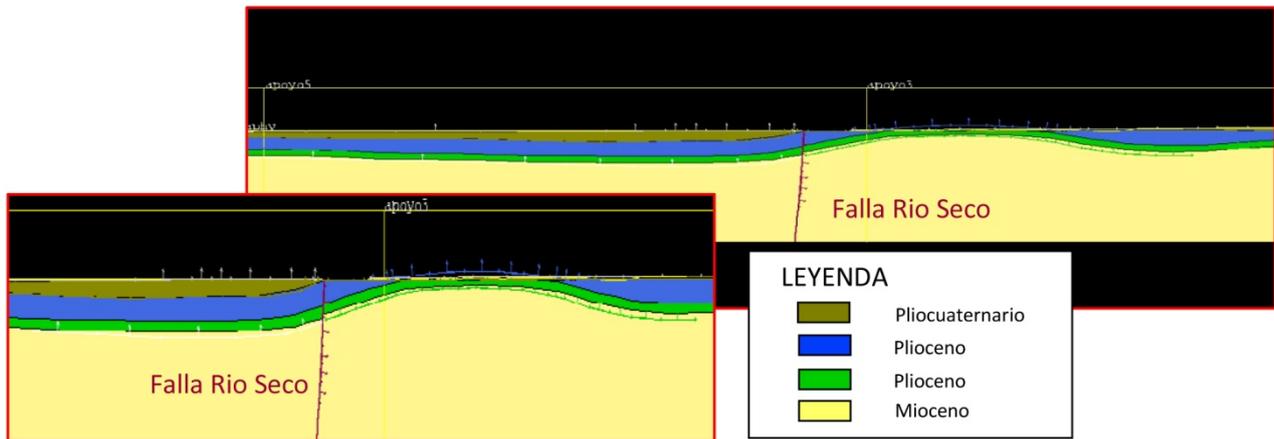


Figura 25. Detalle del modelado del acuífero Cabo Roig en zona de la Falla de Río Seco

Cálculo de reservas e incertidumbres de las mismas

El acuífero Plioceno de **Cabo-Roig** calculado en 3D Geomodeller 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 procedentes de diagráfias geofísicas de los sondeos de petróleo de Benejuzar-1 y San Miguel de Salinas-1 y 2, las reservas totales de agua en el acuífero quedarían comprendidas entre **22 y 66 hm³**, respectivamente, para las porosidades mencionadas. Las reservas correspondientes a zonas explotables del acuífero, no salinizadas teniendo en cuenta el índice de Riverside, se ven reducidas a una tercera parte de las anteriores (Tabla XIII).

PROYECTO HIDROPROAL 2012-2013 (Reservas según modelo3D Geomodeller)		
	Porosidad 0.5%	Porosidad 3%
Reservas totales (hm ³)	22	66
Reservas aptas (hm ³)	7,2	21,6
Reservas salinizadas (hm ³)	2,8	8,4
Reservas explotables desde Campo de Golf (hm ³)	0,2	0,6
Reservas explotables desde sondeo zona sur (hm ³)	2	7

Tabla XIII. Reservas totales, aptas y salinizadas, explotables, y explotables desde sondeo zona sur del acuífero

En conclusión el nivel reservas del acuífero Plioceno de Cabo-Roig es bastante modesto, y con un grado de incertidumbre elevado, en lo que respecta a reservas explotables, dada la proximidad de niveles piezométricos y muro del acuífero y la imprecisión de los mismos.

A diferencia de otros casos de este proyecto, no se dispone de información relativa a reservas con estudios previos, que permitan hacer comparaciones entre diferente estimación de reservas según interpretaciones alternativas de la geometría del acuífero. Tampoco existen estimaciones de reservas basadas en modelos de flujo, que permitieran dar indicaciones de la geometría o porosidad del acuífero (recuérdese que no hay resultados de porosidades en laboratorio por no haberse tomado muestras en **Cabo-Roig**). Sí se pueden realizar comparaciones de superficies reconstruidas, como se describe a continuación.

Calidad del modelo y alternativas

El modelo geológico 3D del acuífero Plioceno de Cabo Roig derivado en este trabajo parte de datos estructurales de buzamiento, 7 cortes y 18 sondeos hidrogeológicos. En la cartografía, las estructuras geológicas son laxas y en los cortes se han estimado espesores homogéneos y procurado evitar representaciones con abundantes fallas en “teclas de piano”, por lo que el modelo obtenido con Geomodeller presenta rugosidades moderadas sin acusadas elevaciones/profundizaciones locales de estructura. Obsérvese que en Geomodeller, para que se calcule el modelo, los cortes (en diversas direcciones) han de ser compatibles en cuanto a espesores, concordancia de fallas, y estructura en general, que no puede ser “antigeológica”. Esto no implica exactitud, pero sí consistencia.

Los sondeos son escasos (figura 4: un sondeo cada 4.5 km² en Cabo Roig (13 en 60 km²) es una densidad baja), y presentan una distribución irregular, pues 7 se agrupan en el borde costero de la zona central de Cabo Roig, y existen sólo 5 en el tercio sur. Para la zona Norte, y la Falla de S. Miguel de Salinas no se ha dispuesto de control de sondeos. La sísmica no permite una interpretación fiable del límite M. Superior-Plioceno. En sísmica, el salto de la F. San Miguel Salinas es de unos 80-100 m (~0,04 ms*2500m/s=100 m), y el de la de Río seco, de unos 40 m.

Se desprende de las consideraciones anteriores la dificultad de evaluar la calidad del modelo. A partir de la información de sondeos, puede concluirse unos márgenes de incertidumbre de unos 20 m en las superficies modeladas de techo y muro del acuífero Plioceno, aceptables dentro de márgenes de variación de las mismas desde unos 150 a -200 msnm. Pero puede haber errores locales más importantes, de unos 40 m, con significado geológico.

En cuanto a comparaciones con estudios previos, se ha construido un modelo geológico desde un enfoque y metodología diferente que presenta aspectos discrepantes del correspondiente a estudios anteriores (figura 26): en el modelo de muro del acuífero de este trabajo los límites N y S del mismo aparecen mejor delineados, y el límite W aparece más elevado (30-40 m), lo que da lugar a un gradiente W-E superior (y a menores reservas, que si éstas se calcularan con el muro de DPA-IGME 2007a).

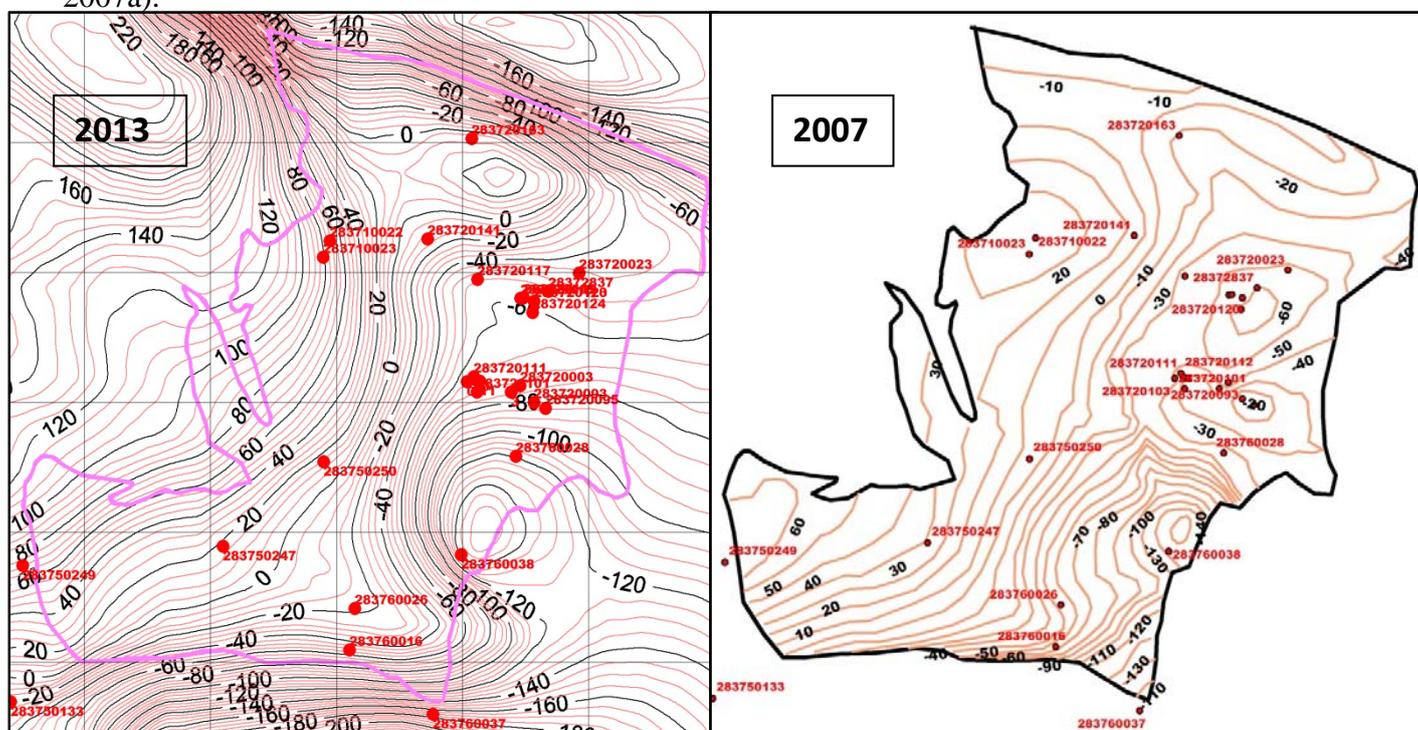


Figura 26. Mapas de isobatas del Muro del acuífero Plioceno de Cabo Roig según el presente estudio y el de DPA-IGME 2007a (Remallado en 2013).

Incertidumbres y carencias en el modelo:

- Incorrecta interpretación de edades y espesores algunos de los sondeos hidrogeológicos, especialmente en relación con los promontorios del Sur del modelo. Falta de control de sondeos en el tercio Norte del acuífero.

- Existencia de fallas no tenidas en cuenta (pe, Rodríguez Estrella y Lillo Carpio, 1992) a efectos del propósito del modelo y no definición en el mismo del Messiniense. La definición de los límites del Messiniense requeriría una revisión de la estratigrafía sísmica y calado más superficial de los sondeos de petróleo con los hidrogeológicos (incompatibles en su interpretación actual). Una definición sísmica del Messiniense compatible con la interpretación hidrogeológica del área de Cabo Roig, supondría una información adicional de interés sobre todo en la mitad sur del acuífero, a efectos de caracterizar tanto la base del Plioceno como la geometría de una superficie adicional para trabajos posteriores, que sería la base del Messiniense. Ello requeriría una revisión geológica, estratigráfica y petrofísica, con un importante trabajo de campo y de laboratorio que iría mucho más allá de lo contemplado en este estudio.

Geometría del Basamento Triásico para usos alternativos

-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.

-Existen posibilidades de almacenamiento geológico en varias trampas en acuíferos profundos. Por ejemplo, podría estimarse la capacidad de almacenamiento de CO₂ en unos 120 millones de Tm en la estructura antiformal de basamento del Campo de Cartagena, y de 3 y 1,5 millones de Tm, respectivamente, en las de Benejuzar-Rojales y A. Hurchillo, prolongación de la anterior. Todas ellas se encuentran en un nivel de conocimiento aún incompleto, requiriendo de programas de investigación con sísmica de reflexión y sondeos (no menos de 200 km de línea y dos pozos profundos), para poder definir la geometría de los cierres de las estructuras (por seguridad y fugas), y las características petrofísicas de los almacenes objetivo, aspectos ambos sobre los que existen notables incertidumbres.

8. REFERENCIAS

*Ahr, W. M., (2008): *Geology of carbonate reservoirs : the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks* Editorial, John Wiley & Sons, Inc. , Hoboken, New Jersey. 277 p.

*DPA, (2010). Mapa hidrogeológico de la Provincia de Alicante. 1ª Edición. Escala 1/150.000. Diputación Provincial de Alicante, Alicante, 40 p.

*DPA-IGME, in prep., 2013.

*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 (2007 b). 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

*Gill, B., Cherry, D., Adelana, M., Cheng, X. y 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.

*IGME, (1972) Mapa geológico nacional. Hoja MAGNA nº 935; Torrevieja. http://intranet.igme.es/intranet/infor_geocientifica/Ingeoes/cartografia/magna50.asp?hoja=935&bis=

*IGME. (1989). Aragon Rueda, R.; Rodriguez Estrella, T.. Geometría de los acuíferos del Campo de Cartagena. Murcia. Informe del centro de documentación del IGME (informe SID nº33181). 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; Torrevieja; 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.; Aragon Rueda, R.; Rodriguez Estrella, T.; Sanchez, 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). Aragon Rueda, R.; Rodriguez Estrella, T. Las aguas subterráneas del Campo de Cartagena (Murcia). R. Aragón Rueda; T. Rodriguez Estrella. (Informe SID nº 33197). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp

*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. (2011). García Lobón, J. L., Reguera García, M. I.; Martín León, J.; Rey Moral, C.; Berrezueta Alvarado, E. R.; Pérez Ortiz, I. 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/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.

*Lanaja, J.M., (1987): Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España.

*Lucia, F. J., (1995) Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. Am Assoc Petrol Geol Bull 79: 1275–1300.

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

*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.

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

* Robins, N. S., Rutter, H. K., Dumbleton, S. y Peach, D. W., (2004): The role of 3D visualisations as an analytical tool preparatory to numerical modeling. Journal of Hydrology, 301: 287-295.

*Rodríguez Estrella, T. y 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.

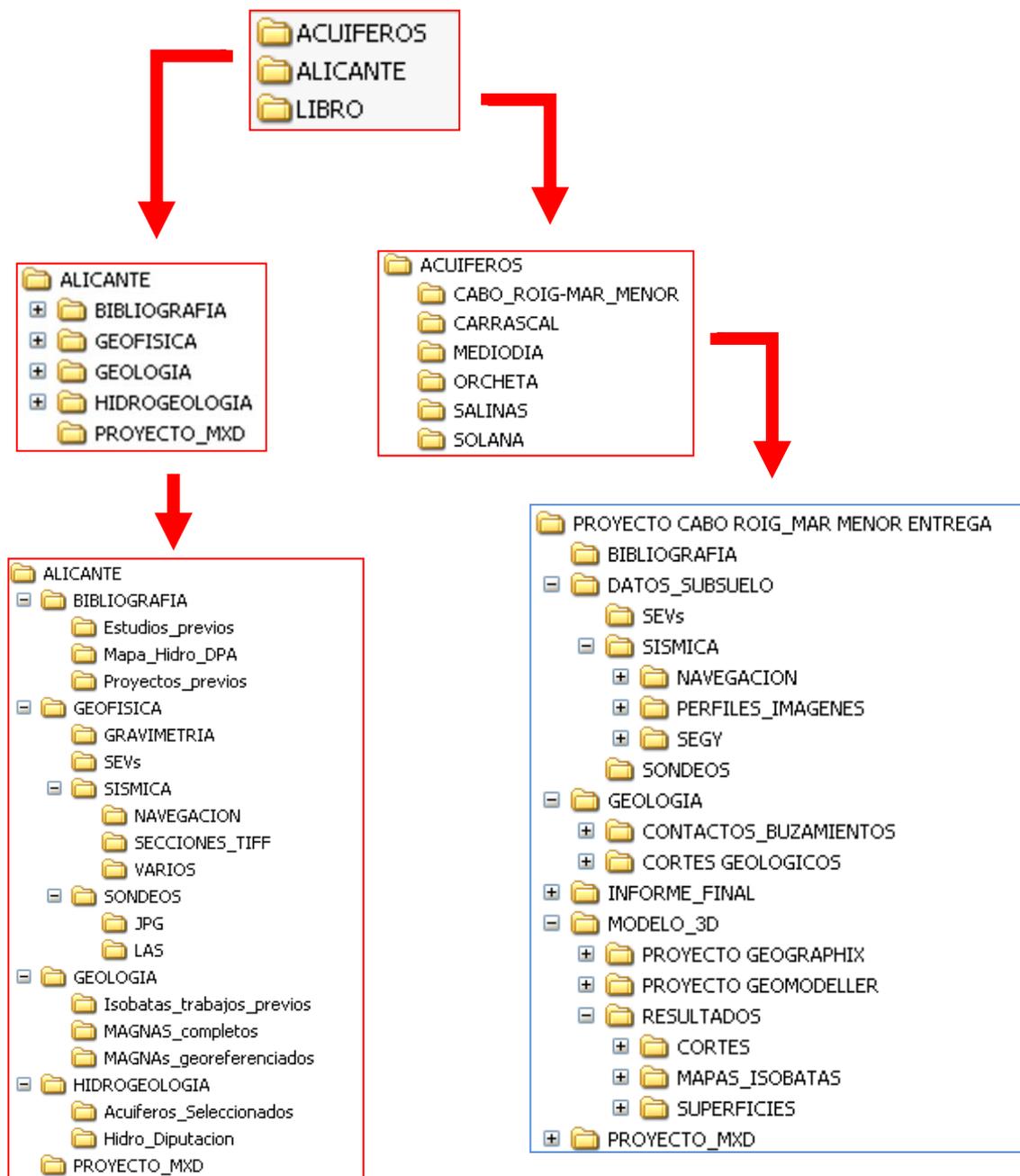
*Ross, M., Parent, M. y Lefebvre, R., (2005): 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. Hydrogeology Journal, 13: 690-707.

* Wu, Q., Xu, H. y Zhon, W., (2008): Development of a 3D GIS and its applications to karst areas Environmental Geology, 54: 1037-1045.

ANEXOS

ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACION DIGITAL ENTREGADA.

1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL



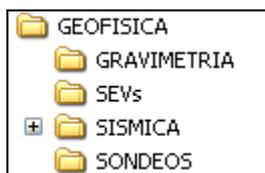
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE

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



GEOFISICA

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



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

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

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



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

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

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

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

GEOLOGIA

Esta carpeta contiene la información geológica recopilada para el proyecto.

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

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

 **Isobatas_trabajos_previos:** Contiene los archivos de vectorización de isobatas de áreas de Alicante de trabajos previos al proyecto HIDROPROAL.

HIDROGEOLOGIA

Esta carpeta contiene la información hidrogeológica recopilada para el proyecto.

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

 **Acuíferos_seleccionados:** Contiene la capa de acuíferos preseleccionados para trabajar en formato Shape.

BIBLIOGRAFIA

Esta carpeta contiene memorias e informes recopilados para el proyecto.

 **Mapa_Hidro_DPA:** Memoria por capítulos del mapa hidrogeológico de la diputación de Alicante en formato PDF.

 **Proyectos_previos:** Memoria del Proyecto Murcia 2008, realizada por Gessal y diversos estudios realizados por ENAGAS en la provincia de Alicante y limítrofes. Selección de documentos en formato PDF provenientes del Plan del CO₂ llevado a cabo por el IGME (plan ALGECO2).

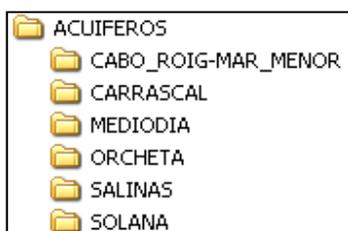
 **Estudios_previos:** En ella se encuentran documentos PDF sobre los diversos acuíferos descritos en la provincia de Alicante. Además hay un archivo .doc que resume las zonas que comprenden dichos estudios y las figuras que hay en cada uno de los informes.

PROYECTO_MXD

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

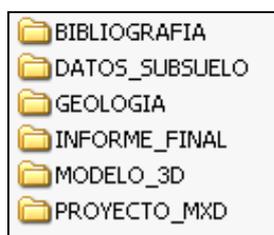
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO CABO ROIG – MAR MENOR

La información digital del acuífero CABO ROIG – MAR MENOR se encuentra dentro del directorio ACUIFEROS.



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

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



BIBLIOGRAFIA

Informes recopilados sobre el acuífero Cabo Roig – Mar Menor en estudio.

GEOLOGIA

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

 **CORTES_GEOLOGICOS** Cortes empleados en la modelización en formatos JPG.

 **CONTACTOS_Y_BUZAMIENTOS** Contactos y buzamientos introducidos en el modelo 3D (.data, .csv y .xlsx).

PROYECTO_MXD

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

DATOS_SUBSUELO

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

SISMICA

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

 **SEGY** Esta carpeta contiene archivos segy.

 **PERFILES_IMAGENES** Las imágenes TIFF de las secciones sísmicas.

 **SEVs** Los archivos relacionados con los SEVs (archivos de datos brutos e interpretaciones, así como archivos Excel).

 **SONDEOS** Información sobre los sondeos de la zona (hojas Excel con los sondeos, PDF con las columnas, etc.).

MODELO_3D

 **PROYECTO_GEOMODELLER** Proyecto del modelo 3D en GeoModeller del acuífero Cabo Roig – Mar Menor.

 **PROYECTO_GEOGRAPHIX** Proyecto Geographix del acuífero Cabo Roig – Mar Menor.

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

 **MAPAS_ISOBATAS** Mapas de isobatas de las superficies modeladas en formato JPG. Las isobatas en formato digital se encuentran en:

-El directorio **PROYECTO MXD** (ArcGis)

-El directorio **SUPERFICIES** (xyz)

 **CORTES** Cortes geológicos calculados del modelo 3D (3D Geomodeller) en formato JPG. Los cortes digitales se encuentran en el modelo 3D (3D Geomodeller o gOcad).

 **SUPERFICIES** Superficies (isobatas) modeladas en formato .DAT (xyz).

INFORME_FINAL

Informe final del modelo 3D del acuífero Cabo Roig – Mar Menor.

4. LISTADO DE FICHEROS

El listado de los archivos entregados se encuentra en el Excel *Listado_archivos_CABOROIG.xlsx* dentro del directorio **INFORME_FINAL**.