

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Minería, Obra Civil y Medio Ambiente

**ESTUDIO DE LAS FORMACIONES FAVORABLES  
PARA ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub>  
EN UN SECTOR DEL BORDE MERIDIONAL  
DE LAS BÉTICAS ORIENTALES**

TESIS DOCTORAL

2012

*Mónica Reyes Urquiza*



Instituto Geológico  
y Minero de España





UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Minería, Obra Civil y Medio Ambiente

**ESTUDIO DE LAS FORMACIONES FAVORABLES PARA ALMACENAMIENTO  
DE CO<sub>2</sub> EN UN SECTOR DEL BORDE MERIDIONAL DE LAS BÉTICAS  
ORIENTALES**

**VºBº de los directores**

**Fdo.: Jorge Loredo Pérez**

Catedrático de Universidad  
Dpto. de Explotación y Prospección de Minas  
Universidad de Oviedo

**Fdo.: Miguel Ángel Zapatero Rodríguez**

Coordinador del Grupo de Recursos Energéticos  
Dpto. de Recursos Geológicos  
Instituto Geológico y Minero de España

Memoria que presenta Mónica Reyes Urquiza  
para optar al grado de Doctora en Geología.

Fdo.: Mónica Reyes Urquiza

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**2012**



## RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: Estudio de las formaciones favorables para almacenamiento de CO <sub>2</sub> en un sector del borde meridional de las Béticas orientales.	Inglés: Study of favorable formations for CO <sub>2</sub> storage in an area the southern edge of the eastern Betic
2.- Autor	
Nombre: Mónica Reyes Urquiza	
Programa de Doctorado: Minería, Obra Civil y Medio Ambiente y Dirección de Proyectos	
Órgano responsable: Universidad de Oviedo	

### RESUMEN (en español)

El trabajo realizado en esta investigación tiene por objetivo la caracterización de las formaciones favorables para almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en un sector del borde meridional de las Béticas Orientales. Para este fin se realiza una completa revisión de la bibliografía geológica existente de la zona de estudio, entre la que destaca la información suministrada por las campañas de exploración petrolífera realizadas en la zona, esta es recopilada del archivo del IGME (Instituto Geológico y Minero de España) y el Archivo Técnico de Hidrocarburos del Ministerio de Economía.

También, se aporta información con la realización de recorridos de campo, cortes geológicos, levantamiento de columnas litoestratigráficas y recogida de muestras en afloramiento.

Se presta especial atención a la tectónica de la zona y se aportan recomendaciones y datos basados en la bibliografía existente incluyendo observaciones realizadas en los recorridos de campo.

Para aprovechar al máximo los datos obtenidos de los 7 sondeos profundos y las 14 líneas sísmicas estudiadas en la zona, se utilizan varios software específicos como son: Neuralog, WellCAD y GeoGraphix. Con el manejo de este tipo de programas podemos caracterizar con mayor precisión los parámetros geofísicos, características hidrogeológicas y



geotécnicas, así como la disposición de las formaciones o tramos favorables.

El trabajo realizado con los sondeos profundos ha consistido en la digitalización de las diagramas existentes con el software Neuralog, una vez tratadas, se puede trabajar con ellas con el programa WellCAD, con el que se obtienen los parámetros necesarios para caracterizar las formaciones, entre ellos: porosidad, densidad, salinidad, espesor, arcillosidad y resistividad.

Los sondeos profundos nos sirven para realizar el calado de las líneas sísmicas estudiadas, las cuales han sido reinterpretadas y nos aportan información sobre la disposición, profundidad y continuidad de los tramos o formaciones consideradas de interés para albergar CO<sub>2</sub>. A partir de dicha información se realizan los mapas de isobatas del basamento de la cuenca y del techo de las formaciones con más posibilidades para almacenar CO<sub>2</sub>.

A partir de un sondeo mecánico con recuperación de testigo continuo (denominado Bacarot) realizado en la zona de estudio, en el año 2010 por el IGME, para investigación de almacenes de CO<sub>2</sub>, se han obtenido numerosos datos para la caracterización de las litologías que constituyen uno de los pares almacén/sello considerados en principio favorables para almacenar CO<sub>2</sub>. Además de contar con los registros obtenidos durante la testificación geofísica y ensayos Lugeon para estimar la permeabilidad, se realizan diferentes ensayos de laboratorio a las muestras obtenidas del sondeo, entre ellos: porosidad total, densidad real, velocidad de propagación, calcimetrías, porosidad por inyección de Hg y difracción de rayos X.

Se realiza la descripción de la geometría del basamento de la cuenca y la disposición de los tramos y formaciones de interés existentes en la zona de estudio para albergar CO<sub>2</sub>, y se elabora el modelo geológico estático de la zona. Se seleccionan los pares almacén/sello más favorables y se describen sus principales características. Las formaciones más interesantes



estudiadas son la denominada como Formación Pujálvarez y Formación Columbares, constituidas por tramos de areniscas y conglomerados, y el equivalente lateral de las Calcarenitas de las Ventanas en el sector norte de la zona de estudio. El correspondiente sello a las formaciones antes citadas lo constituyen las Margas de Torremendo, las cuales alcanzan hasta más de 500 m de espesor. El Complejo Basal, conglomerados y areniscas, perforados en el sector sur por los sondeos profundos podría considerarse parte de la formación almacén, así como las calizas y dolomías triásicas, el basamento de la cuenca, aunque estas últimas posiblemente no se presenten en la zona de estudio con la porosidad y permeabilidad requerida.

Como resultado final se identifica en el mapa geológico de la zona las áreas con más posibilidades para albergar en un futuro un almacén de CO<sub>2</sub>.

### RESUMEN (en Inglés)

The work described in this investigation was aimed to characterize the formations favorable for a geological storage of CO<sub>2</sub> in a sector of the middle Eastern Betics (southern Spain). To this end, we carried out a complete review of the geological literature on the area of study, especially the information provided by oil exploration campaigns carried out in the zone; this information was retrieved from the archives of the IGME (Institute of Geology and Mining of Spain), and the Technical File of Hydrocarbons of the Ministry of Economy.

In addition, data were obtained from field work, geological sections, lithostratigraphic columns, and samples collected from outcrops.

Special emphasis was placed on the tectonics of the zone, and we present recommendations and data based on the existing bibliography, as well as observations



made in the field.

In order to take maximum advantage of the data obtained from the 7 deep drillings and the 14 seismic lines studied in the zone, three specific software programs were used: Neuralog, WellCAD and GeoGraphix. This type of program provides for a more precise characterization of the geophysical parameters, the hydrogeological and geotechnical features, and the position of the more favorable formations or sections.

The work carried out in the deep drillings involved digitalization of existing diagraphs using Neuralog software. Then the WellCAD program was applied to obtain the parameters needed to characterize the formations in terms of porosity, density, salinity, thickness, clay content and resistivity.

The deep cores allowed us to appraise the seismic lines studied, which were reinterpreted to provide information about the position, depth and continuity of the sections or formations held to be of interest for CO<sub>2</sub> storage. From this information we derived the isobath maps of the basement of the basin as well as the roof of the formation having greater possibilities of storing CO<sub>2</sub>.

Based on mechanical drilling for continuous sample retrieval, (known as Bacarot well) carried out in the area of study in 2010 by the IGME to investigate CO<sub>2</sub> storage, we obtained numerous data for the characterization of the lithologies constituting one of the storage/seal pairs with potential as a CO<sub>2</sub> storage. In addition to using the records from geophysical sampling and Lugeon tests for estimating permeability, we performed a series of laboratory assays on the samples obtained, including: total porosity, real density, propagation velocity, calcimetry, porosity determined by Hg injection and x-ray diffraction.

The description of the basin basement geometry and location of the sections and formations of interest as possible CO<sub>2</sub> storage were used to elaborate a static geological model of the area. The most favorable storage/seal pairs were selected, and their main



characteristics were determined. The most relevant ones for the purposes of this study were the Formations of Pujálvarez and Columbares, made up of sections of sandstone and conglomerates, and the lateral equivalent of the Calcarenites of the las Ventanas Formation in the northern sector of the study zone. The seal corresponding to the above formations is constituted by the Torremendo Marls, which reach over 500 m in thickness. The Basal Complex, of conglomerates and sandstones, perforated in the southern sector by the deep drills, could be considered part of the storage formation, as could the Triassic limestones and dolomites, the basin basement; however, within the zone of study, the latter might not have the porosity and permeability required to CO<sub>2</sub> storage.

As the final result, the geological map of the zone identifies the areas with greater possibilities for CO<sub>2</sub> storage in the future.

## ÍNDICE

Lista de figuras.....	i
Lista de tablas.....	v
Agradecimientos.....	vii
Resumen/Abstract.....	ix

### **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

1.1. Justificación.....	3
1.2. Planteamiento.....	5
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Antecedentes.....	6
1.5. Metodología.....	8
1.6. Localización geográfica del área de estudio.....	9
1.7. Contexto geológico.....	11
1.7.1. La Cordillera Bética.....	11
1.7.2. Cuencas Neógenas de la Cordillera Bética.....	13
1.7.3. Situación y evolución geológica de la zona.....	17
1.8. Almacenamiento en acuíferos salinos profundos. Parámetros esenciales que deben poseer los niveles almacén y sello.....	21

### **CAPÍTULO 2. ESTUDIO LITOESTRATIGRÁFICO**

2.1. Estudio litoestratigráfico de la Cuenca del Bajo Segura.....	35
2.1.1. Zonas Internas.....	35
2.1.2. Zonas Externas.....	38
2.1.3. Neógeno.....	44
2.1.4. Plioceno II-Cuaternario.....	60
2.2. Discontinuidades.....	62

### **CAPÍTULO 3. TECTÓNICA**

3.1. Antecedentes.....	71
3.2. Tectónica de la zona de estudio.....	74
3.2.1. Deformación continua.....	75
3.2.1.1. Zonas Internas.....	75
3.2.1.2. Zonas Externas.....	77
3.2.2. Deformación discontinua.....	77
3.3. Sismicidad .....	81
3.3.1. Problemática sísmica de la zona de estudio.....	82

### **CAPÍTULO 4. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE GEOFÍSICA Y SONDEOS PARA EL CONOCIMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO DE LA CUENCA**

4.1. Datos de la geofísica y sondeos de la zona.....	87
4.1.1. Información obtenida y metodología utilizada para la interpretación de los registros de pozo.....	91
4.1.2. Parámetros petrofísicos calculados en los sondeos profundos.....	93
4.1.3. Descripción y resultados de los sondeos profundos.....	101
4.1.3.1. Sondeo Benejúzar-1.....	101
4.1.3.2. Sondeo La Marina-1.....	111
4.1.3.3. Sondeo La Mata-1.....	115
4.1.3.4. Sondeo Rojales-1.....	118
4.1.3.5. Sondeo San Miguel de Salinas-1.....	120
4.1.3.6. Sondeo San Miguel de Salinas-2.....	124
4.1.3.7. Sondeo Torrevieja Marino C-1.....	130
4.2. Horizontes de interés en los sondeos profundos.....	132
4.3. Horizontes de interés en los perfiles sísmicos.....	136
4.4. Mapas de isocronas e isobatas de los horizontes de interés.....	148

## **CAPÍTULO 5. INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS DEL SONDEO BACAROT**

5.1. Sondeo Bacarot.....	157
5.2. Columna geológica y de litofacies del sondeo Bacarot.....	158
5.3. Testificación geofísica y ensayos hidráulicos.....	162
5.4. Ensayos de laboratorio.....	166
5.4.1. Densidad real y porosidad total.....	168
5.4.2. Porosimetría por inyección de Hg.....	171
5.4.3. Calcimetrías.....	180
5.4.4. Velocidad de propagación.....	182
5.4.5. Difracción de rayos-X.....	185
5.5. Comparativa de los resultados del sondeo SB.....	187

## **CAPÍTULO 6. INTEGRACIÓN DE LOS DATOS DE LA GEOLOGÍA DE SUPERFICIE CON LOS DATOS DE SUBSUELO**

6.1. Pares almacén/sello seleccionados en la zona de estudio.....	193
6.2. Descripción de las características de cada formación, unidad o tramo seleccionado.....	195
6.3. Geometría del basamento de la cuenca. Estructuras principales.....	198
6.4. Disposición de los tramos, formaciones y unidades de interés.....	204

## **CAPÍTULO 7. MODELO GEOLÓGICO ESTÁTICO Y ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO**

7.1. Modelo geológico estático.....	211
7.2. Estimación de la capacidad de almacenamiento.....	219

## **C < 5DH9F '+'; 9C@C; =75@GH5H=7'A C89@'5B 8'GHCF5; 9'75D57=HM 9GHA 5H=CB'**

7.1. Geological static model.....	229
7.2. Estimation of storage capacity.....	237

## **CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES/CONCLUSIONS**

Conclusiones/Conclusions.....247

**REFERENCIAS**.....253

### **ANEXOS**

**Anexo I.** Mapa geológico de la Cuenca del Bajo Segura.....271

**Anexo II.** Registros geofísicos de los sondeos: Benejúzar-1, La Mata-1,  
San Miguel de Salinas-1 y San Miguel de Salinas-2.....275

**Anexo III.** Datos de temperatura y profundidad de los sondeos profundos.....285

**Anexo IV.** Testificación geofísica del sondeo Bacarot.....289

**Anexo V.** Resultados de las calcimetrías realizadas a las muestras del sondeo Bacarot.....293

**Anexo VI.** Resultados de la velocidad de propagación de las muestras del sondeo Bacarot.....299

## Lista de figuras

Figura 1. Situación geográfica del área de estudio.....	10
Figura 2. Mapa geológico de la Cordillera Bética (modificado de Vera, 2004).....	11
Figura 3. Esquema geológico de los principales dominios de la Codillera Bética. Serie litológica de la Cuenca del Bajo Segura (modificado de Vera, 2004).....	15
Figura 4. A) Plano geológico simplificado del sector norte de la Cuenca del Bajo Segura. B) Organización estratigráfica de este sector (modificado de Corbí, 2010).....	19
Figura 5. A) Plano geológico simplificado del sector sur de la Cuenca del Bajo Segura. B) Organización estratigráfica de este sector (modificado de Corbí, 2010).....	20
Figura 6. Entrampamiento residual de CO <sub>2</sub> (modificado de Kaldi y Gibson-Poole, 2008).....	22
Figura 7. Contribución de cada mecanismo de entrampamiento a la seguridad del almacenamiento (modificado de CSLF, 2007).....	23
Figura 8. Posibles emplazamientos en los que el CO <sub>2</sub> puede quedar atrapado. A. Trampa por cambio de facies, acuífero salino. B. Trampa estratigráfica, estructural. C. Trampa por falla (CO2CRC, 2011).....	25
Figura 9. Variación de la densidad del CO <sub>2</sub> con la profundidad y distintos gradientes geotérmicos representativos de cuencas ‘frias` y ‘calientes` (Bachu, 2008).....	27
Figura 10. Diagrama de fases del CO <sub>2</sub> (Bachu <i>et al.</i> , 2000).....	28
Figura 11. Aumento de la densidad de CO <sub>2</sub> con la profundidad (Holloway, S. 2007).....	29
Figura 12. A) Discordancia Mioceno (Formación las Ventanas)-Cretácico. B) Discordancia Mioceno (Formación las Ventanas)-Triásico.....	46
Figura 13. Columna litológica, margen derecha del embalse del Vinalopó.....	47
Figura 14. Columna litológica de la Formación las Ventanas en la carretera CV-873.....	49
Figura 15. Columna litológica de la Formación las Ventanas en la carretera N-325.....	50
Figura 16. Esquema de la columna litológica de la Formación las Ventanas en el sondeo Bacarot.....	51
Figura 17. Afloramiento de la Formación Torremendo. Foto tomada en la localidad de Bacarot.....	52
Figura 18. Columna litológica de la base de las Margas de Torremendo en el sondeo Bacarot....	53
Figura 19. Columna litológica de la Formación la Virgen en la carretera N-325.....	55
Figura 20. Columna litológica de la Formación la Virgen en la margen derecha del embalse de Elche.....	56
Figura 21. Columna litológica de la Formación la Virgen. Al norte de Torrellano.....	57
Figura 22. Imagen del mapa neotectónico en la zona de estudio (IGME, 1998).....	73
Figura 23. Esquema estructural de la zona de estudio (modificado de Alfaro, 1995).....	74

Figura 24. Pliegue de microlitones.....	76
Figura 25. Vista de la Sierra de Orihuela (izquierda) y esquema de cizallamiento (derecha).....	77
Figura 26. Falla con relleno arcilloso.....	80
Figura 27. Esquema de la acción de las fallas como limitantes laterales en un posible almacén en areniscas.....	80
Figura 28. Fracturas rellenas de arcilla, al sur de San Isidro.....	81
Figura 29. Mapa geológico sintético de la zona de trabajo indicando la posición de los sondeos y líneas sísmicas.....	88
Figura 30. Esquema de la evolución litológica de la Cuenca del Bajo Segura en el sector sur.....	104
Figura 31. Columna litológica sintética del sondeo Benejúzar-1.....	106
Figura 32. Gráfico T <sup>a</sup> /Prof. del sondeo Benejúzar-1.....	109
Figura 33. Gráfico T <sup>a</sup> /Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo Benejúzar-1.....	110
Figura 34. Gráfico T <sup>a</sup> /Prof., caso de ecuación polinómica. Sondeo Benejúzar-1.....	110
Figura 35. Columna litológica sintética del sondeo La Marina-1.....	113
Figura 36. Gráfico T <sup>a</sup> /Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo La Marina-1.....	114
Figura 37. Columna litológica sintética del sondeo La Mata-1.....	116
Figura 38. Gráfico T <sup>a</sup> /Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo La Mata-1.....	117
Figura 39. Columna litológica sintética del sondeo Rojales-1.....	119
Figura 40. Columna litológica sintética del sondeo San Miguel de Salinas-1.....	122
Figura 41. Gráfico T <sup>a</sup> /Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo San Miguel de Salinas-1.....	124
Figura 42. Columna litológica sintética del sondeo San Miguel de Salinas-2.....	128
Figura 43. Gráfico T <sup>a</sup> /Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo San Miguel de Salinas-2.....	129
Figura 44. Columna litológica sintética del sondeo Torrevieja Marino C-1.....	131
Figura 45. Correlación de los sondeos profundos.....	135
Figura 46. Interpretación de las líneas sísmicas S-84-70-S (arriba) y S-84-68 (abajo).....	143
Figura 47. Interpretación de las líneas sísmicas S-84-66-N (arriba) y S-84-66-S (abajo).....	144
Figura 48. Interpretación de las líneas sísmicas S-85-61 (arriba) y S-82-51 (abajo).....	145
Figura 49. Interpretación de las líneas sísmicas 52_74_B-12 (arriba) y 52_74_B-16 (abajo).....	146
Figura 50. Interpretación de las líneas sísmicas 1_11_72 (arriba) y ALC-1 (abajo).....	147
Figura 51. Mapa de isocronas del techo del basamento.....	149
Figura 52. Mapa de isocronas de la discontinuidad fini-Tortonense.....	150
Figura 53. Mapa de isobatas del techo del basamento.....	152
Figura 54. Mapa de isobatas de la discontinuidad fini-Tortonense.....	153
Figura 55. Camión operando en el sondeo Bacarot.....	157
Figura 56. Columna de litofacies del sondeo Bacarot.....	160

Figura 57. Imagen de las muestras del sondeo SB pertenecientes a las Calcarenitas de las Ventanas. Muestras numeradas de la 92-149.....	161
Figura 58. Equipo de la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica del IGME.....	165
Figura 59. Imagen de las muestras tomadas en el sondeo SB.....	167
Figura 60. A) Curvas de intrusión-extrusión. B) Intrusión y distribución de tamaño de poros (Benavente, 2003).....	172
Figura 61. Relación entre la presión ejercida sobre el mercurio y el volumen intruido en la roca (Benavente, 2008).....	174
Figura 62. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB-45. Margas de Torremendo.....	175
Figura 63. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB-135. Calcarenitas de las Ventanas.....	176
Figura 64. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB-145. Calcarenitas de las Ventanas.....	177
Figura 65. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB- 149. Almacén Calcarenitas de las Ventanas.....	177
Figura 66. Comparativa de las curvas de distribución del volumen de poros.....	178
Figura 67. Laboratorio del Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Alicante.....	181
Figura 68. Osciloscopio digital y equipo usado para el cálculo de la velocidad de propagación del sonido.....	183
Figura 69. Comparativa de los resultados del sondeo Bacarot.....	189
Figura 70. Mapa geológico sintético y posición de los cortes y líneas sísmicas interpretadas.....	200
Figura 71. Corte geológico M-M' (modificado de Montenat, 1990).....	201
Figura 72. Corte geológico M2-M2' de la Cuenca del Bajo Segura modificado de Corbí, 2010.....	201
Figura 73. Mapa sintético de la zona de estudio y delimitación de la zona de interés.....	202
Figura 74. Esquema de la morfología del basamento Alpujárride.....	203
Figura 75. Esquema de distribución de los niveles de interés en la subcuenca Benejúzar-Rojales-La Marina.....	208
Figura 76. Modelo geológico estático del basamento en la Cuenca del Bajo Segura.....	213
Figura 77. Modelo geológico estático de la discontinuidad fini-Tortonense en la Cuenca del Bajo Segura.....	217
Figura 78. Concepto piramidal de la capacidad de almacenamiento según el esquema clásico de recursos-reservas (modificado de CSLF, 2005).....	219

Figura 79. Escalas de trabajo para las diferentes etapas de estudio de almacenes de CO <sub>2</sub> (modificado de CSLF, 2007).....	221
Figura 80. Cálculo del coeficiente de almacenamiento (rule of thumb) (Zapatero <i>et al.</i> , 2009)....	222
Figura 81. Modelo simple de estimación (Zapatero <i>et al.</i> , 2009).....	223

## Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros geológicos clave para la adecuación de lugares de almacenamiento (modificado de Chadwick <i>et al.</i> , 2008.....)	30
Tabla 2. Columna litoestratigráfica del Complejo Alpujarride.....	37
Tabla 3. Columna litoestratigráfica del substrato bético externo.....	43
Tabla 4. Columna litoestratigráfica del Neógeno.....	59
Tabla 5. Columna litoestratigráfica del Plioceno II-Cuaternario.....	62
Tabla 6. Síntesis de las unidades litoestratigráficas de la Cuenca del Bajo Segura.....	63
Tabla 7. Sondeos profundos localizados en el área de estudio de la Cuenca del Bajo Segura.....	88
Tabla 8. Nombre y año de realización de las líneas sísmicas onshore y offshore estudiadas.....	90
Tabla 9. Información de los registros disponibles en los sondeos profundos.....	91
Tabla 10. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo Benejúzar-1.....	107
Tabla 11. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo La Marina-1.....	114
Tabla 12. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo La Mata-1.....	117
Tabla 13. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo San Miguel de Salinas-1.....	123
Tabla 14. Parámetros obtenidos en el sondeo San Miguel de Salinas-2.....	129
Tabla 15. Resultados obtenidos del procesado de las diagramas del sondeo SB (IGME, 2010)...	162
Tabla 16. Clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad (González <i>et al.</i> ,2002).....	163
Tabla 17. Resultados de ensayos Lugeon en el sondeo SB (IGME, 2010).....	164
Tabla 18. Resultados de los ensayos hidráulicos de la UMH en el sondeo SB (IGME, 2010)....	165
Tabla 19. Valores de densidad real y porosidad total de las muestras del sondeo SB.....	170
Tabla 20. Muestras y resultados obtenidos mediante porosimetría con inyección de Hg.....	174
Tabla 21. Comparativa de los resultados de porosidad total y porosidad por inyección de Hg en las muestras del sondeo SB.....	175
Tabla 22. Valores medios de porcentaje de carbonatos en las muestras del sondeo SB.....	182
Tabla 23. Valores medios de la velocidad de propagación del sonido para los tramos del sondeo Bacarot.....	184
Tabla 24. Resultados de los análisis por difracción de rayos -X para las muestras del sondeo SB.....	186
Tabla 25. Valores del factor de almacenamiento en función de la profundidad y el volumen del acuífero (Zapatero <i>et al.</i> , 2009).....	224

## AGRADECIMIENTOS

Haber podido concluir esta tesis se debe en gran parte a la ayuda, apoyo, colaboración y ánimo recibido de muchas personas.

En primer lugar quiero mostrar en estas líneas mi agradecimiento a los directores:

Dr. D. Miguel Ángel Zapatero Rodríguez, gracias por darme la oportunidad, por la ayuda recibida y consejos, tanto en temas científicos como personales.

Dr. D. Jorge Loredó Pérez, muchas gracias por la colaboración recibida, su amabilidad y experiencia aportada a este trabajo.

Dr. D. José Torres Ruiz, de la Universidad de Granada, gracias por sus recomendaciones y buena disposición en todo momento.

A todo el equipo que conforma o ha permanecido en la Unidad del IGME en Granada, no puedo dejar de mencionarlos a cada uno empezando por J.C. Rubio (Jefe de la Unidad), C. Fernández, F. Fernández, R. García, A. González, L. M. Hueso, C. Jiménez, J. Jiménez, J. A. Luque, C. Marín, C. Martín, S. Martos, A. M. Matías, J. A. Navarro, R. Navarro, A. Pedrera, T. Peinado, D. Pulido, F. J. Roldán y J. Sánchez. De una manera u otra cada uno de vosotros me habéis ayudado en la elaboración de esta tesis, cualquier ayuda o consejo tiene mi mayor agradecimiento para todos vosotros. La gran calidad tanto científica como humana en la Unidad de Granada dudo mucho que la pueda volver a encontrar.

Al Departamento de Investigación en Recursos Geológicos del IGME, a Roberto Martínez e Isabel Suárez, gracias por vuestro apoyo y la oportunidad brindada.

Alicia Arenillas y Ruxandra Nita, gracias porque siempre me habéis ayudado en todo lo posible, las estancias en Madrid se hacen más agradables con compañeras como vosotras.

A David Candanedo y Miguel Luciani, por sus explicaciones y ayuda recibida durante sus estancias en el IGME.

Al Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Alicante, en especial a Jesús Soria, gracias por abrirme las puertas desde el primer día, por los innumerables consejos, explicaciones y por la contribución recibida para llevar a cabo esta tesis.

A David Benavente, del laboratorio de Petrología Aplicada de la Universidad de Alicante, gracias por los conocimientos aportados, los resultados obtenidos con el tratamiento de las muestras y por ofrecerme en todo momento la ayuda necesaria.

Enrique Hernández y Juan Klimowitz de la empresa GESSAL, y a todos los profesionales que la componen, en especial a Carmen, Gonzalo, Javier, Lucía, Magdalena y Serafín. Gracias por tratarme como a uno más del equipo y enseñarme por vuestra parte todo lo necesario para llevar a cabo esta investigación.

António Correia y Júlio Carneiro, de la Universidad de Évora (Portugal). La estancia en tierras lusitanas fue una gran experiencia y las aportaciones científicas muy provechosas para poder concluir la tesis.

Y por supuesto gracias a mi gran familia, a mi padre José Luis Reyes, por impulsarme en este reto, poder contar con su gran experiencia y recibir una ayuda constante por su parte. A mi madre, hermanos, cuñadas, mi pareja, amigos y a mis pequeños soles que son mis sobrinos. A mi abuela Pepa y a la Tata, gracias por vuestros consejos y cariño.

Esta investigación ha sido financiada por una beca-contrato de formación de personal investigador concedida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

## RESUMEN

El trabajo realizado en esta investigación tiene por objetivo la caracterización de las formaciones favorables para almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en un sector del borde meridional de las Béticas Orientales. Para este fin se realiza una completa revisión de la bibliografía geológica existente de la zona de estudio, entre la que destaca la información suministrada por las campañas de exploración petrolífera realizadas en la zona, esta es recopilada del archivo del IGME (Instituto Geológico y Minero de España) y el Archivo Técnico de Hidrocarburos del Ministerio de Economía.

También, se aporta información con la realización de recorridos de campo, cortes geológicos, levantamiento de columnas litoestratigráficas y recogida de muestras en afloramiento.

Se presta especial atención a la tectónica de la zona y se aportan recomendaciones y datos basados en la bibliografía existente incluyendo observaciones realizadas en los recorridos de campo.

Para aprovechar al máximo los datos obtenidos de los 7 sondeos profundos y las 14 líneas sísmicas estudiadas en la zona, se utilizan varios software específicos como son: Neuralog, WellCAD y GeoGraphix. Con el manejo de este tipo de programas podemos caracterizar con mayor precisión los parámetros geofísicos, características hidrogeológicas y geotécnicas, así como la disposición de las formaciones o tramos favorables.

El trabajo realizado con los sondeos profundos ha consistido en la digitalización de las diagrfías existentes con el software Neuralog, una vez tratadas, se puede trabajar con ellas con el programa WellCAD, con el que se obtienen los parámetros necesarios para caracterizar las formaciones, entre ellos: porosidad, densidad, salinidad, espesor, arcillosidad y resistividad.

Los sondeos profundos nos sirven para realizar el calado de las líneas sísmicas estudiadas, las cuales han sido reinterpretadas y nos aportan información sobre la disposición, profundidad y

continuidad de los tramos o formaciones consideradas de interés para albergar CO<sub>2</sub>. A partir de dicha información se realizan los mapas de isobatas del basamento de la cuenca y del techo de las formaciones con más posibilidades para almacenar CO<sub>2</sub>.

A partir de un sondeo mecánico con recuperación de testigo continuo (denominado Bacarot) realizado en la zona de estudio, en el año 2010 por el IGME, para investigación de almacenes de CO<sub>2</sub>, se han obtenido numerosos datos para la caracterización de las litologías que constituyen uno de los pares almacén/sello considerados en principio favorables para almacenar CO<sub>2</sub>. Además de contar con los registros obtenidos durante la testificación geofísica y ensayos Lugeon para estimar la permeabilidad, se realizan diferentes ensayos de laboratorio a las muestras obtenidas del sondeo, entre ellos: porosidad total, densidad real, velocidad de propagación, calcimetrías, porosidad por inyección de Hg y difracción de rayos X.

Se realiza la descripción de la geometría del basamento de la cuenca y la disposición de los tramos y formaciones de interés existentes en la zona de estudio para albergar CO<sub>2</sub>, y se elabora el modelo geológico estático de la zona. Se seleccionan los pares almacén/sello más favorables y se describen sus principales características. Las formaciones más interesantes estudiadas son la denominada como Formación Pujálvarez y Formación Columbares, constituidas por tramos de areniscas y conglomerados, y el equivalente lateral de las Calcarenitas de las Ventanas en el sector norte de la zona de estudio. El correspondiente sello a las formaciones antes citadas lo constituyen las Margas de Torremendo, las cuales alcanzan hasta más de 500 m de espesor. El Complejo Basal, conglomerados y areniscas, perforados en el sector sur por los sondeos profundos podría considerarse parte de la formación almacén, así como las calizas y dolomías triásicas, el basamento de la cuenca, aunque estas últimas posiblemente no se presenten en la zona de estudio con la porosidad y permeabilidad requerida.

Como resultado final se identifica en el mapa geológico de la zona las áreas con más posibilidades para albergar en un futuro un almacén de CO<sub>2</sub>.

## **ABSTRACT**

The work described in this investigation was aimed to characterize the formations favorable for a geological storage of CO<sub>2</sub> in a sector of the middle Eastern Betics (southern Spain). To this end, we carried out a complete review of the geological literature on the area of study, especially the information provided by oil exploration campaigns carried out in the zone; this information was retrieved from the archives of the IGME (Institute of Geology and Mining of Spain), and the Technical File of Hydrocarbons of the Ministry of Economy.

In addition, data were obtained from field work, geological sections, lithostratigraphic columns, and samples collected from outcrops.

Special emphasis was placed on the tectonics of the zone, and we present recommendations and data based on the existing bibliography, as well as observations made in the field.

In order to take maximum advantage of the data obtained from the 7 deep drillings and the 14 seismic lines studied in the zone, three specific software programs were used: Neuralog, WellCAD and GeoGraphix. This type of program provides for a more precise characterization of the geophysical parameters, the hydrogeological and geotechnical features, and the position of the more favorable formations or sections.

The work carried out in the deep drillings involved digitalization of existing diagraphs using Neuralog software. Then the WellCAD program was applied to obtain the parameters needed to characterize the formations in terms of porosity, density, salinity, thickness, clay content and resistivity.

The deep cores allowed us to appraise the seismic lines studied, which were reinterpreted to provide information about the position, depth and continuity of the sections or formations held to be of interest for CO<sub>2</sub> storage. From this information we derived the isobath maps of the

basement of the basin as well as the roof of the formation having greater possibilities of storing CO<sub>2</sub>.

Based on mechanical drilling for continuous sample retrieval, (known as Bacarot well)\_carried out in the area of study in 2010 by the IGME to investigate CO<sub>2</sub> storage, we obtained numerous data for the characterization of the lithologies constituting one of the storage/seal pairs with potential as a CO<sub>2</sub> storage. In addition to using the records from geophysical sampling and Lugeon tests for estimating permeability, we performed a series of laboratory assays on the samples obtained, including: total porosity, real density, propagation velocity, calcimetry, porosity determined by Hg injection and x-ray diffraction.

The description of the basin basement geometry and location of the sections and formations of interest as possible CO<sub>2</sub> storage were used to elaborate a static geological model of the area. The most favorable storage/seal pairs were selected, and their main characteristics were determined. The most relevant ones for the purposes of this study were the Formations of Pujálvarez and Columbares, made up of sections of sandstone and conglomerates, and the lateral equivalent of the Calcarenites of the las Ventanas Formation in the northern sector of the study zone. The seal corresponding to the above formations is constituted by the Torremendo Marls, which reach over 500 m in thickness. The Basal Complex, of conglomerates and sandstones, perforated in the southern sector by the deep drills, could be considered part of the storage formation, as could the Triassic limestones and dolomites, the basin basement; however, within the zone of study, the latter might not have the porosity and permeability required to CO<sub>2</sub> storage.

As the final result, the geological map of the zone identifies the areas with greater possibilities for CO<sub>2</sub> storage in the future.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

---

## 1.1. Justificación

En 1979 tuvo lugar la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima, convocada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) donde por primera vez se consideró a nivel internacional el cambio climático como un problema real. La Conferencia emitió una declaración para que los gobiernos del mundo controlaran y remediaran los cambios potenciales en el clima que pudieran resultar adversos para el bienestar de la humanidad.

El 11 de diciembre de 1997 se adoptó en Japón el Protocolo de Kioto sobre el cambio climático. Es un documento internacional a través del cual los países industrializados se comprometen, por primera vez, a poner en marcha medidas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero. En 1998 fue firmado por España y por la Unión Europea, en noviembre de 2009 eran 187 estados los que ratificaron el protocolo. El Protocolo de Kioto expira en 2012. Tras la Cumbre de Durban, celebrada en 2011, sólo la Unión Europea, Suiza, Australia, Noruega y Nueva Zelanda han acordado mantener vivo el tratado hasta 2017 o 2020. Han abandonado países muy contaminantes como Japón, Canadá y Rusia, lo que deja el nuevo Kioto a cargo de sólo el 15% de las emisiones globales.

Podemos decir que siempre han existido cambios en el clima por razones naturales, sin embargo en los últimos años las actividades humanas han ido aumentando sustancialmente las concentraciones de determinados gases invernadero en la atmósfera, intensificando el efecto invernadero natural, lo que provoca la aceleración del calentamiento de la superficie y la atmósfera de la Tierra, afectando adversamente a los ecosistemas naturales y a la humanidad. Muchos científicos están de acuerdo en atribuir al CO<sub>2</sub>, producido por las actividades humanas, un papel fundamental en el desajuste climático.

El motivo principal de preocupación, no es tanto el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, sino el ritmo de crecimiento de esta en los últimos años. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EEUU (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), entre otras cosas, se encarga de describir y predecir los cambios en el medio ambiente mediante la investigación de los océanos, la atmósfera, el espacio y el sol. Muestran que el dióxido de carbono se está acumulando en la atmósfera a un ritmo mayor del esperado.

La técnica conocida como Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) presenta grandes posibilidades para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y contribuir a mitigar el posible desorden climático. Consiste básicamente en capturar el CO<sub>2</sub> producido en las principales fuentes de emisiones industriales, ligadas esencialmente a la utilización de energías fósiles,

comprimirlo y transportarlo para ser almacenado en formaciones geológicas, en el océano, en carbonatos minerales, o para ser utilizado en procesos industriales.

En los últimos informes del Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) se indica que ninguna opción tecnológica proporcionará, por sí sola, todas las reducciones de emisiones necesarias para lograr la estabilización de los gases de efecto invernadero, necesitándose una cartera de medidas de mitigación, y reconociendo que entre las distintas opciones para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, las tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, pueden ser tan importantes como el ahorro y eficiencia energética o las energías renovables. De acuerdo con los informes del IPCC, en el contexto de la reducción global de las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 50% de aquí a 2050, es necesario reducir entre un 25 y un 40% las emisiones en el mundo desarrollado de aquí a 2020, y entre un 80 y un 95% de aquí a 2050. Asimismo señala que dicha reducción es técnicamente factible y que los beneficios que reportará compensarán ampliamente los costes.

En febrero de 2008 se publica en el BOE en aplicación de lo dispuesto en el artículo 9.1 de la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, las propuestas de reservas provisionales a favor del Estado de estructuras subterráneas de ser susceptibles para almacenamiento de dióxido de carbono; el denominado "Almacén 6" se encuentra comprendido en las provincias de Alicante y Murcia.

En diciembre de 2008 la Unión Europea aprobó el paquete de medidas sobre cambio climático y energía, para alcanzar los objetivos propuestos se aprobaron un conjunto de medidas legislativas entre las que destaca la Directiva sobre almacenamiento geológico de dióxido de carbono que en España el Consejo de Ministros ha aprobado como Proyecto de Ley de almacenamiento geológico de dióxido de carbono, ésta directiva regula aspectos como la determinación del emplazamiento o la responsabilidad antes y después del cierre. En relación a esto, a finales de diciembre de 2010 se publicó en el Boletín Oficial del Estado las disposiciones generales sobre almacenamiento geológico de dióxido de carbono, la Ley 40/2010 se limita a regular la actividad de almacenamiento geológico de dióxido de carbono, y contiene previsiones puntuales en relación con la captura y el transporte.

Para finalizar con las justificaciones sólo comentar que todas las opciones de reducción de gases invernadero son necesarias, que las tecnologías de captura y almacenamiento existen y están probadas. Varios países están actualmente investigando y desarrollando proyectos de captura y almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, entre los que destacan EE.UU., Canadá, Australia y Noruega.

## 1.2. Planteamiento

La técnica de CAC es tecnológicamente factible y podría tener un papel importante en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de este siglo. El objetivo de la técnica es proporcionar el tiempo suficiente para desarrollar fuentes de energía respetuosas con el medio ambiente.

Aunque las distintas fases de esta tecnología ya son de eficacia probada, es esencial ampliar la experiencia y el conocimiento, así como reducir las incertidumbres acerca de ciertos aspectos de la CAC para permitir su despliegue a gran escala.

En España, las mayores posibilidades se centran en el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>(AGC) en los acuíferos salinos profundos, debido a la gran extensión de las cuencas sedimentarias peninsulares. De las otras posibles opciones de almacenamiento geológico también son de interés el atrapamiento de CO<sub>2</sub> en rocas ultrabásicas debido a los importantes macizos peridotíticos existentes en la Península, especialmente en Andalucía y Galicia.

No poseen buenas perspectivas los almacenamientos relacionados con el petróleo y carbón debido a la escasez y pequeñas dimensiones de estos yacimientos en España.

La presente investigación se desarrolla en un sector del borde meridional de las Béticas orientales, en la denominada Cuenca del Bajo Segura. En principio esta zona resulta bastante interesante por las características del relleno de la cuenca, en la que los materiales presentan, a priori, un espesor suficiente, disponiendo de información de varios sondeos profundos con testificación geofísica realizados en la zona además de líneas sísmicas para poder conformar, con cierto detalle, la geometría y disposición de los materiales en la cuenca, especialmente en lo concerniente al Neógeno.

## 1.3. Objetivos

Los principales objetivos son los que a continuación se expresan:

- Obtener un conocimiento detallado de la geología de la región objeto de investigación, en todos sus aspectos: litológicos, sedimentológicos, estratigráficos y estructurales.
- Mejorar ese conocimiento con ayuda de los estudios y campañas de geofísica y sondeos petrolíferos efectuados en la región.

- Definir las dualidades almacén-sello a lo largo de la columna litoestratigráfica de la región, desde el Triás hasta el Plioceno, con posibilidades de servir para la inyección y atrapamiento de CO<sub>2</sub>.
- Caracterizar y definir los parámetros esenciales de los niveles seleccionados como posibles almacenes.
- Integración de los datos de superficie con los de subsuelo.
- Estudio, interpretación y correlación de los datos, selección de sectores de interés.
- Identificar las zonas con más posibilidades, según criterios geológicos y geofísicos, para ubicar un posible almacén de CO<sub>2</sub> en el área estudiada.
- Modelización del área de estudio, realización del modelo geológico estático.
- Avanzar en el conocimiento para la ubicación de un almacén de CO<sub>2</sub> en España, tanto en los aspectos positivos como negativos que podría presentar la zona en este caso estudiada, sirviendo como ejemplo para otras zonas a estudiar. Poder contribuir y recomendar acciones futuras a realizar en la investigación de almacenes geológicos profundos, tanto en esta cuenca como en otras que presenten a priori características propicias.
- En definitiva, nuestra intención última y principal objetivo es avanzar en el conocimiento de la tecnología de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, la cual ayudará a mitigar el cambio climático y dará lugar a una importante línea de investigación.

#### **1.4. Antecedentes**

En la naturaleza existen almacenes geológicos de CO<sub>2</sub>, durante miles y millones de años han existido fenómenos naturales de almacenamiento de CO<sub>2</sub>. El estudio de estos análogos demuestra que las formaciones geológicas son capaces de retener CO<sub>2</sub> durante largos periodos de tiempo.

Desde los años 40, en los EE.UU., se inyecta CO<sub>2</sub> en el subsuelo con el objetivo de desarrollar la técnica conocida como recuperación mejorada de petróleo.

Desde los años 90 se están desarrollando programas de investigación a gran escala de CAC en Europa, Estados Unidos, Canadá, Australia y Japón. El primer proyecto a escala industrial de esta técnica se realiza en una formación acuífera salina en el Mar del Norte (Noruega), comenzó en el

año 1996 y está previsto continuar operando hasta el año 2020, en este periodo de tiempo se estima que serán almacenados un total de 20 Mt CO<sub>2</sub>. Este proyecto conocido como Proyecto Sleipner y otros muchos que se han llevado a cabo o están en desarrollo, tanto a escala industrial como proyectos piloto, son la base para el conocimiento de las técnicas y pasos a seguir para desarrollar el trabajo de esta tesis. Es de destacar a escala industrial, además del Proyecto Sleipner, el Proyecto Weyburn de recuperación mejorada de petróleo en Canadá, y el Proyecto In Salah en un yacimiento de gas en Argelia. En cada uno de estos proyectos se almacena aproximadamente 1 Mt de CO<sub>2</sub> al año.

En Europa el objetivo es tener 12 proyectos de demostración a gran escala funcionando para 2015 (CO2GeoNet, 2008).

También son muy importantes los trabajos más actuales relacionados con el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en España realizados por investigadores del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y otros geólogos, como Miguel Ángel Zapatero, José Luis Reyes, Roberto Martínez, Isabel Suárez y Alicia Arenillas, en colaboración con investigadores del CIEMAT, como el titulado: Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Criterios de selección de emplazamientos.

El trabajo llamado 'Estudio preliminar de las formaciones favorables para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en España (2009), realizado por José Luis Reyes y dirigido por Miguel Ángel Zapatero.

Hay que destacar el Proyecto Europeo Geocapacity. "Assesing European capacity for geological storage of carbon dioxide" (Estimación de la capacidad europea para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, Caso español, 2009). Realizado también por el IGME y con Miguel Ángel Zapatero como director del proyecto.

Y el trabajo denominado "Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España" realizado por el IGME en el año 2010, dirigido por José Luis García Lobón.

Actualmente se están desarrollando múltiples proyectos relacionados con la tecnología de CAC, en España, la Fundación Ciudad de la Energía, tiene como objetivo el diseño y construcción de una Planta de Desarrollo Tecnológico (PDT) de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en Hontomín (Burgos), donde se inyectarán, en una formación profunda de agua salada a 1.400 metros, cantidades de CO<sub>2</sub> suficientes para realizar investigaciones asociadas al almacenamiento geológico, desarrollar metodologías y tecnologías, evaluar el comportamiento en profundidad y reforzar los conocimientos sobre seguridad.

Otra zona que será investigada, por parte de la empresa CEPSA, es el almacén denominado "Rábida", situado en tierra, en la provincia de Huelva, así como en mar, parcialmente frente al litoral de dicha provincia. La empresa solicitó con fecha 20 de abril de 2011, el permiso de investigación para almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Por otra parte, para el estudio de la zona, hay que tener en cuenta que la geología de Alicante ha sido objeto de estudio por numerosos investigadores nacionales y extranjeros, entre ellos destacar las tesis doctorales de: Fallo, P. (1945), Montenat, C. (1977), Alfaro, P. (1995), Martínez, W. (1996), Tent-Manclús, J. E. (2003) y Meijninger, B. (2006).

Además de multitud de publicaciones realizadas por investigadores de la Universidad de Alicante como Jesús Soria, Hugo Corbí, Antonio Estévez, J. Antonio Pina, José E. Tent-Manclús y Alfonso Yébenes.

Asimismo hay que citar el estudio realizado por el ITGE en relación con la geología de la zona: Investigación de pizarras bituminosas en el sureste de la Península, 1982.

En cuanto a la cartografía del área de estudio nos basamos en el MAGNA, en el GEODE y diversas publicaciones realizadas de la zona.

Es importante también mencionar los trabajos realizados por ITGE-ENAGAS en cuanto al 'Almacenamiento subterráneo de gas' en la zona de Murcia, Elche y Alicante, así como el estudio de la información geológica y geofísica del subsuelo realizado por la empresa GESSAL.

## **1.5. Metodología**

Para llegar a conseguir los objetivos expuestos se llevaron a cabo las fases de investigación siguientes:

a) Recopilación, estudio y síntesis de toda la bibliografía geológica existente sobre la región y sectores adyacentes. Esta etapa comprende varias fases:

- Bibliografía sobre la geología y evolución de la Cordillera Bética.
- Bibliografía geológica específica de la región objeto de estudio.
- Bibliografía de las campañas de geofísica y sondeos petrolíferos efectuados así como de otras perforaciones, con cierta profundidad, realizadas para la captación de aguas y/o estudios hidrogeológicos.

Asimismo se ha recopilado y estudiado la documentación existente sobre almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en el mundo, con estudio de los proyectos pilotos actualmente activos y en desarrollo.

b) Estudio sismológico de la región basado en la bibliografía existente.

c) Confección de una síntesis geológica y selección previa de dualidades almacén-sello, basado en los datos obtenidos en la etapa anterior.

e) Trabajo de campo. Realización de cortes seriados y sistemáticos de campo con levantamiento de columnas litoestratigráficas, observación y toma de datos sobre la estructura y disposición de los materiales. Toma de muestras de las litologías seleccionadas como sello y almacén.

f) Tratamiento de los datos de subsuelo e interpretación de diagráfias y líneas sísmicas. Esto incluye el aprendizaje y manejo de programas específicos, digitalización de los registros con el software Neuralog, interpretación geofísica con el programa WellCAD y reinterpretación de los perfiles sísmicos con el programa GeoGraphix, además de la realización de los mapas de isobatas correspondientes a los horizontes de interés.

g) Trabajo de laboratorio. Ensayos de laboratorio a las muestras tomadas del sondeo perforado en Bacarot y a las muestras recogidas en los recorridos de campo.

h) Elaboración del modelo geológico estático de la región objeto de estudio con selección definitiva de los pares sello-almacén y sectores de interés en donde se desarrollen en la profundidad adecuada con posibilidades de capacidad y seguridad.

## **1.6. Localización geográfica del área de estudio**

El área de estudio de este trabajo (Fig. 1) se sitúa en el sur de la provincia de Alicante, abarcando una pequeña parte de la provincia de Murcia, en concreto en la zona de la Sierra de Abanilla. Está comprendida en las hojas del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) a escala 1:50.000: Elche (893), Guardamar del Segura (914), Cabo de Santa Pola (894) y parte de las hojas de Orihuela (913), Fortuna (892) y Torrevieja (935). Se conoce comúnmente con el nombre de Cuenca del Bajo Segura, aunque en la bibliografía se encuentra con diversas denominaciones incluso dividida en varias subcuencas como, por ejemplo, Cuenca de Elche (Montenat, 1977), Cuenca de Alicante-Cartagena (Sanz de Galdeano y Vera, 1992), Subcuenca de Torrevieja (ITGE-ENAGAS, 1995) y Cuenca de San Miguel-Torremendo (Lancis *et al.*, 2004).

En su sector septentrional presenta una serie de alineaciones montañosas orientadas en dirección SO-NE que atraviesan parte de las provincias de Murcia y Alicante. De ellas las más importantes son la Sierra de Orihuela y la Sierra de Crevillente. Mientras que su límite NO está constituido por parte de las alineaciones montañosas citadas, el SE lo constituye el mar Mediterráneo, desde Alicante a Punta Prima aproximadamente.

Entre las sierras y el mar se desarrollan varias depresiones siendo la más importante por su extensión la de la Vega Baja del Segura, otros sectores deprimidos topográficamente son: ‘‘El campo de Elche’’ y la Depresión del Medio Vinalopó.

El accidente hidrográfico más importante es el río Segura con su desembocadura en Guardamar del Segura. Sobre su extensa llanura de inundación se asienta la Vega Baja del Segura. El segundo río más importante es el Vinalopó. Además toda la zona está atravesada por diferentes ramblas y otros cauces de arroyos de menor entidad.

En la zona se pueden destacar los municipios de Elche, Crevillente, Santa Pola, Callosa de Segura, Orihuela, Guardamar del Segura y Torreveija.

Presenta una densa red de carreteras y caminos que la hacen muy accesible, entre las más importantes se encuentra la autovía del Mediterráneo (A-7), la autovía de Alicante (A-31), entre las carreteras podemos destacar la N-332, N-325, N-340 y N-338. Así como diversas carreteras pertenecientes a la comunidad valenciana, como la CV-850, CV-84, CV-910, CV-905 y CV-95.

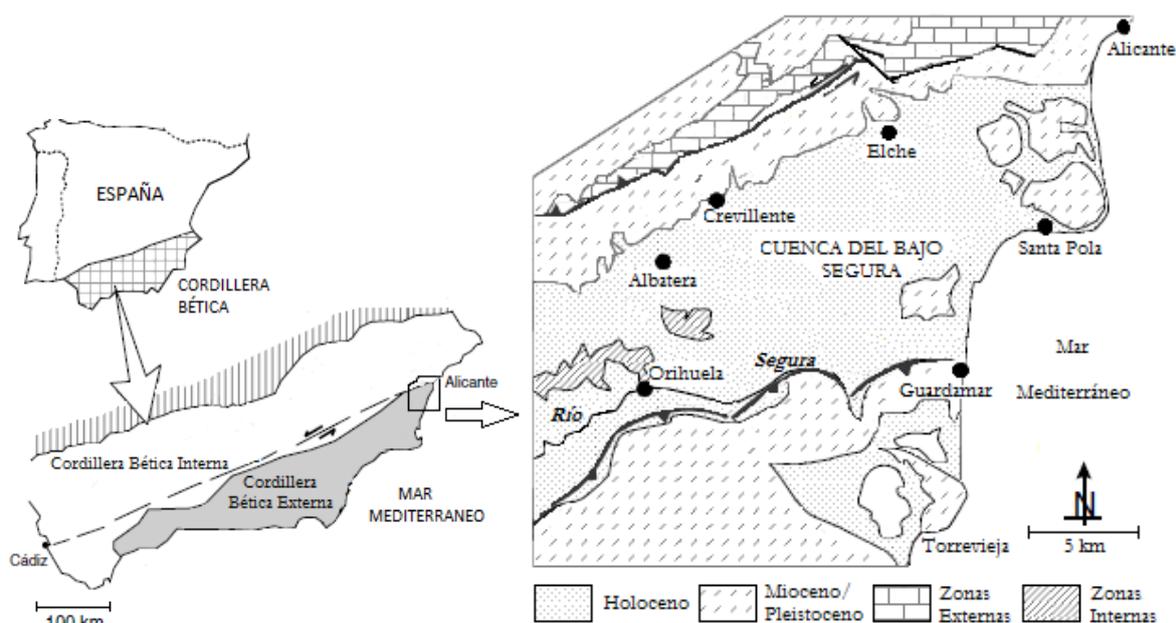


Figura 1. Situación geográfica del área de estudio.

## 1.7. Contexto geológico

### 1.7.1. La Cordillera Bética

La Cordillera Bética constituye junto al Rift, la parte más occidental de las cadenas alpinas mediterráneas desarrolladas durante la convergencia entre la placa Africana y la placa Euroasiática durante el Mesozoico tardío y la era Cenozoica.

Forma un cinturón que se sitúa al sur y sureste de la Península Ibérica, con una longitud aproximada de 600 km y una anchura máxima de 200 km (Fig. 2).

En la Cordillera Bética en función de la edad de las rocas que afloran y del grado de deformación que les afecta se pueden diferenciar cuatro grandes unidades geológicas: las Zonas Externas Béticas, las Zonas Internas Béticas, el Complejo del Campo de Gibraltar y las Cuencas Neógenas postorogénicas.

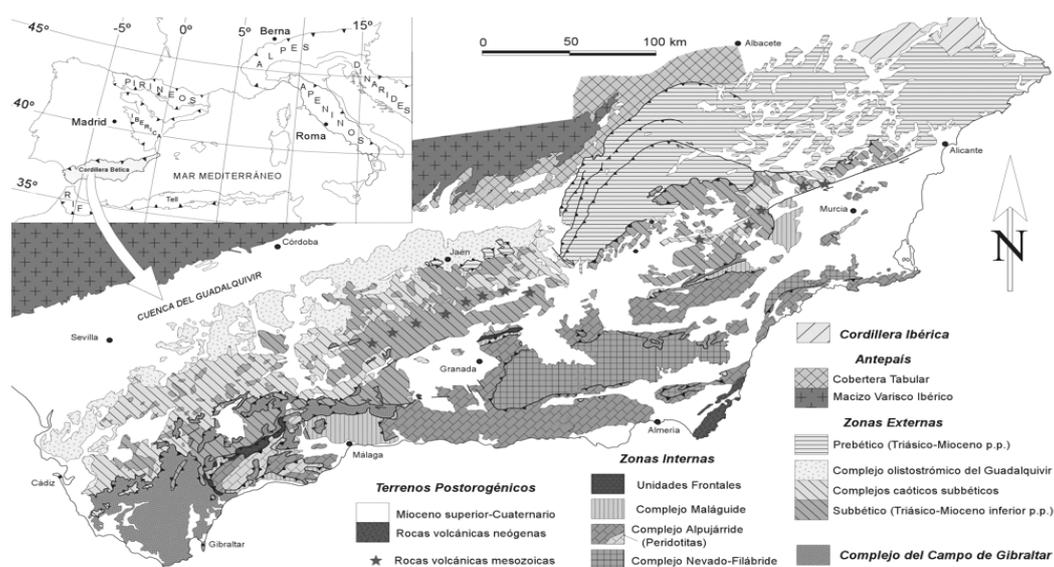


Figura 2. Mapa geológico de la Cordillera Bética (modificado de Vera, 2004).

**Las Zonas Externas Béticas** afloran extensamente al S y SE del Macizo Ibérico y del valle del Guadalquivir, desde el Golfo de Cádiz a la provincia de Alicante y se dividen en dos grandes dominios: el Prebético y el Subbético. Ambos formados por sucesiones de rocas sedimentarias de edad Triásico a Mioceno (Vera, 2004). Ocupan los afloramientos de mayor extensión de la Cordillera.

El *Prebético* aflora principalmente en el área oriental de la Cordillera, es la unidad con menor grado de deformación, se caracteriza por tener términos del Jurásico medio-superior, del Cretácico y del Paleógeno en los que dominan los depósitos de medios marinos someros, con episodios de medios costeros e incluso continentales.

El *Subbético* es la unidad más meridional, está desplazada hacia el norte de manera que cabalga ampliamente sobre el Prebético y presenta un mayor grado de deformación, hasta el punto que en amplios sectores ha perdido su coherencia interna habiendo adquirido una estructura caótica (Complejos Subbéticos caóticos). Desde el punto de vista estratigráfico el Subbético se caracteriza por tener términos del Jurásico medio-superior, del Cretácico y del Paleógeno propios de depósitos de medios pelágicos.

**Las Zonas Internas Béticas** forman la región más intensamente deformada del orógeno y están constituidas por una pila de unidades tectónicas superpuestas. Tradicionalmente, la pila antiformal ha sido subdividida, de abajo a arriba en: Complejo Nevado-Filábride, Complejo Alpujárride y Complejo Maláguide. Con diferencias notables entre ellos por la edad y litología de las rocas y el grado de la deformación y del metamorfismo. Existen otras unidades de menor extensión que se ubican en los bordes de los afloramientos de las Zonas Internas Béticas que han sido recientemente denominadas Unidades Frontales que incluyen la Dorsal y la Predorsal.

El *Complejo Alpujárride* es la segunda de las grandes unidades que forman las Zonas Internas Béticas y ocupa una posición intermedia, de manera que se dispone sobre el Complejo Nevado-Filábride y está debajo del Complejo Maláguide. De los tres complejos es el que mayor extensión de afloramiento ocupa en la actualidad. El Paleozoico está constituido por micaesquistos, cuarcitas, gneises y metabasitas, afectado por un metamorfismo de grado medio a alto. Sobre el Paleozoico se disponen los materiales permo-triásicos, que se inician con una unidad de filitas y cuarcitas (Pérmico-Triásico inferior) a la que sigue una potente unidad de rocas carbonatadas (calizas y dolomías) del Triásico medio-superior.

El *Complejo Maláguide* es la unidad tectónicamente superior. Es el único complejo, de los tres, en el que hay materiales del Jurásico, Cretácico y Paleógeno. De otra parte el metamorfismo, que afecta solamente a una parte del Paleozoico, lo hace de manera desigual en las diferentes unidades que constituyen el Complejo, pero siempre en un grado muy inferior al de los otros dos complejos, hasta el punto que en algunas unidades no hay metamorfismo. El Paleozoico tiene una unidad basal de filitas y areniscas (Ordovícico-Silúrico), una intermedia de calizas y areniscas (Devónico) y otra superior de areniscas, lutitas y conglomerados (Carbonífero). Los materiales del Pérmico y

Triásico, discordantes sobre los anteriores, están formados esencialmente por facies detríticas rojas. El Jurásico, el Cretácico y el Paleógeno afloran de manera desigual, según las áreas geográficas.

Además de estos complejos hay que mencionar el Complejo del Campo de Gibraltar (Martín, 1987), al que Fallois llamó Flysch del Campo de Gibraltar.

### **1.7.2. Cuencas Neógenas de la Cordillera Bética**

Durante el Neógeno y el Cuaternario se han desarrollado numerosas cuencas rellenas por potentes sucesiones de sedimentos que se apoyan discordantes sobre los materiales de las Zonas Externas e Internas de la Cordillera Bética. Estas cuencas han estado controladas directamente por la actividad tectónica. Sanz de Galdeano y Vera (1992) diferencian las cuencas formadas durante el Mioceno inferior y medio que presentan un carácter típicamente sinorogénico (o preorogénico en las Zonas Externas debido al retraso y disminución de intensidad de la deformación en este dominio respecto a las Zonas Internas), de las cuencas postorogénicas formadas a partir del Tortoniense. A pesar de su carácter postorogénico, estas cuencas también están afectadas por deformaciones geotectónicas, y en muchas ocasiones presentan orientaciones estructurales distintas a las típicas de la Cordillera Bética (Alfaro, 1995).

Tectónica y eustatismo han contribuido en la génesis de las Cuencas Postorogénicas. En cuanto a la tectónica, el contexto geodinámico que reina durante la etapa geotectónica de la Cordillera Bética se caracteriza por una compresión regional N-S a NO-SE responsable de la generación de una compleja red de fracturas de orientación NO-SE y NE-SO a NNE-SSO (Sanz de Galdeano y Vera, 1992), que actúan conjuntamente con otras heredadas de la fase de orogénesis, de orientación N70 y E-O.

El registro estratigráfico general de la Cuenca del Bajo Segura ha sido documentado con detalle por Montenat *et al.*, 1990, quienes dividen el relleno de la cuenca en seis grandes unidades separadas por discontinuidades: Tortoniense I, Tortoniense II, Tortoniense-Messiniense, Plioceno I, Plioceno II y Plio-Cuaternario.

Alfaro García (1995) diferencia cinco unidades genéticas en la Cuenca del Bajo Segura, coincidentes, en parte, con las establecidas previamente por Montenat, son las siguientes:

-MS-I (Tortoniense inferior). En el borde sur descansa discordante sobre depósitos del Mioceno Medio o sobre materiales alpujárrides, mientras que, en el borde norte, se apoyan sobre materiales

mesozoicos o terciarios. A techo se reconoce una discontinuidad que da paso a la unidad MS-II. Incluye en esta unidad genética la parte inferior de las Margas y Areniscas de La Atalaya (en el sector meridional) y las calizas del Tabayal (en el sector septentrional).

-MS-II (Tortonense superior). Se apoya discordantemente sobre la unidad genética inferior o sobre un basamento de edad Mesozoico o Terciario. Su techo corresponde a una discontinuidad estratigráfica identificable en toda la cuenca. En el borde sur de la cuenca, esta unidad engloba la parte superior de la Formación Margas y Areniscas de La Atalaya, la Formación Pujálvarez y la Formación Columbares. En el borde norte incluye la Formación Margas de Fortuna, los Conglomerados del Tabayal y un tramo superior detrítico-carbonatado equivalente a la Formación Areniscas de Columbares.

-MS-III (Tortonense terminal-Messiniense). En el borde sur de la cuenca está constituida por la Formación Margas de Torremendo, la Formación Calizas de la Virgen y la Formación Margas con Ostras. Entre Albatera y Crevillente está constituida por conglomerados y lutitas aluviales.

-P (Plioceno inferior). Su techo corresponde a una discontinuidad sobre la que se apoya la unidad P-Q, su base, a una discontinuidad ligada a la transgresión pliocena. Incluye las formaciones denominadas por Montenat como: Margas de Hurchillo, Areniscas de Rojas, Margas versicolores, Calizas de San Pedro, Conglomerados del Segura y Areniscas de Guardamar.

-P-Q (Plioceno superior–Cuaternario). Se apoya discordante sobre el resto de unidades neógenas y sobre un basamento muy variado. A partir de dataciones absolutas, magnetoestratigráficas y paleontológicas, se atribuye al Plioceno-Cuaternario (Alfaro, 1995).

Por otra parte y según Vera, 2004, el relleno de las Cuencas Postorogénicas puede ser dividido en seis unidades aloestratigráficas limitadas por discontinuidades mayores reconocidas a escala de toda la Cordillera Bética, cuyos límites representan eventos tectónicos y/o eustáticos.

La Cuenca del Bajo Segura presenta las 6 unidades definidas. En la figura 3 se representa la serie litológica sintética de la Cuenca del Bajo Segura.

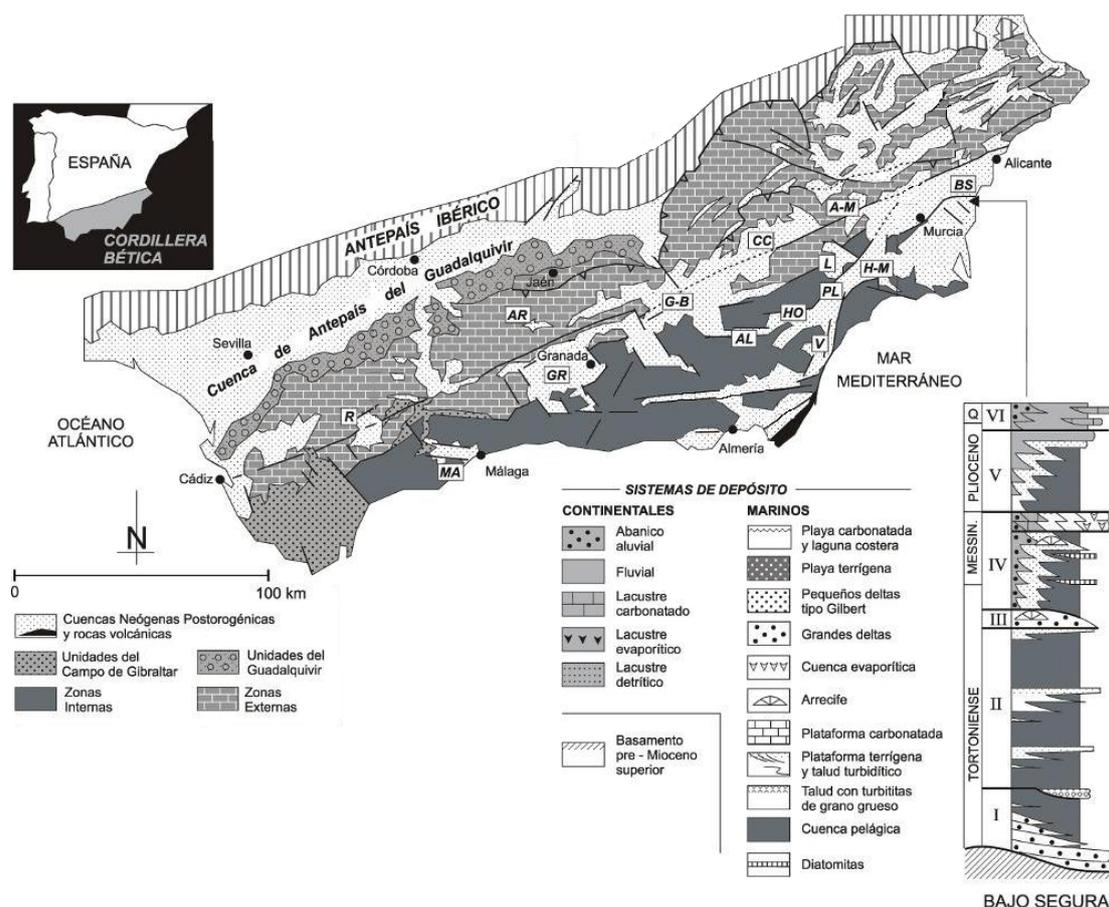


Figura 3. Esquema geológico de los principales dominios de la Cordillera Bética. Serie litológica de la Cuenca del Bajo Segura (modificado de Vera, 2004).

*Unidad I (Tortoniense):* En la Cuenca del Bajo Segura, comienza con depósitos deltaicos que evolucionan a talud turbidítico y terminan con materiales de cuenca pelágica (Montenat *et al.*, 1990a).

*Unidad II (Tortoniense):* Separada de la anterior por el evento intratortoniense 1. Esta unidad equivale a la unidad Tortoniense II (Montenat *et al.*, 1990a). Está representada por megasecuencias que comprenden, de base a techo, depósitos de cuenca pelágica, talud y plataforma o deltas con arrecifes de coral.

*Unidad III (Tortoniense):* Su límite inferior coincide con el evento intratortoniense 2. El principal efecto de este evento es una caída rápida del nivel del mar, que provoca una regresión forzada inducida por la tectónica formándose cuerpos de sedimentos marinos someros, o cortejos sedimentarios de nivel del mar bajo (lowstand systems tracts). Los sedimentos someros son de litología y ambiente sedimentario variado.

*Unidad IV (Tortonense terminal-Messiniense):* Cuyo límite inferior está marcado por el evento finitortonense. En la Cuenca del Bajo Segura esta unidad está separada de las dos infrayacentes por una superficie transgresiva relacionada con un ascenso del nivel del mar que precede a la caída registrada en la Unidad III. En el caso de la cuenca en la que existe sedimentación marina, la orla marginal aluvial evoluciona hacia deltas, y estos a plataforma con arrecifes de coral y cuenca pelágica (Montenat *et al.*, 1990; Soria *et al.*, 2001). A techo de la Unidad IV se reconoce una superficie erosiva con paleovalles encajados rellenos de conglomerados y arenas. En su conjunto esta unidad recoge a la descrita por Montenat como Unidad Messiniense.

*Unidad V (Plioceno):* En la Cuenca del Bajo Segura el límite inferior corresponde al evento transgresivo del Plioceno (Montenat *et al.*, 1990) o evento post-crisis de salinidad Messiniense. Tras la inundación marina de la base del Plioceno los paleovalles erosivos de la segunda fase de la crisis de salinidad Messiniense se rellenan de sedimentos pelágicos. Estos sedimentos pelágicos evolucionan en la vertical hacia depósitos de plataforma y costeros, y estos últimos a materiales continentales de carácter aluvial; así configuran una megasecuencia regresiva con geometría progradante que es interpretada como un cortejo sedimentario desarrollado en contexto de nivel del mar alto (highstand system tract). Los tres conjuntos litológicos de la megasecuencia regresiva corresponden a los términos PI, PII y PIII de Montenat *et al.*, 1990a.

*Unidad VI (Plioceno superior – Pleistoceno):* Se puede separar de la anterior basándose en el reconocimiento del evento intraplioceno, por la formación de nuevas estructuras en régimen compresivo (Alfaro, 1995). La generación de nuevas estructuras tectónicas, como la falla del Bajo Segura, da lugar a la compartimentación de la anterior cuenca formando altos y surcos, estos últimos ocupados por valles fluviales de fisiografía parecida a la actual. En las cuencas del sector oriental esta unidad corresponde a la Fm Sucina (Montenat, 1977).

Para estudiar la evolución sedimentaria podemos acudir al esquema virtual de correlación entre las series neógenas de Murcia y Alicante (Hispanoil-Auxini, 1974). Sobre un substrato Prebético, subbético o bético, se disponen series de distintas edades, potencias y facies, para cuyo análisis se han organizado en cinco unidades o subgrupos (ITGE, 1992), como se refleja a continuación:

-Subgrupo 1(Sb1). Comienza con un nivel conglomerático basal, granodecreciente, que evoluciona hacia sedimentos lutíticos–arenosos.

-Subgrupo 2(Sb2). Margas y areniscas con cambios laterales. Su espesor es de unos 600 m en Torrevieja. Edad Langhiense-Tortonense inferior.

-Subgrupo 3(Sb3). Discordante sobre la unidad anterior. Es de composición arenosa margosa o calcárea (bioclástica y pararrecifal, de alta porosidad). Su potencia varía entre 100 m y 800 m. Edad Tortonense superior.

-Subgrupo 4(Sb4). Paraconcordante con el anterior. Formado por margas con anhidritas de espesor variable entre 160 y 1200 m. Probablemente de edad Messiniense.

-Subgrupo 5(Sb5). Constituido por sedimentos de borde de cuenca, arenosos o carbonatados y margo yesíferos. Espesor variable, de 0 a 700 m. Discordante sobre la unidad anterior y de edad Plioceno- Pliocuaternario.

En el sector situado al N de Torrevieja, los subgrupos 1 y 2 se disponen sobre los materiales Alpujárrides, sin sobrepasar hacia el E el sondeo de Benejúzar-1. El Sb3, se detecta en los sondeos de Benejúzar-1, La Mata-1, La Marina-1 y Rojales-1.

El Sb 4 aparece en todo el sector de la cuenca, sobre los niveles permeables de Sb3. Al N y NE de Santa Pola, se detecta un sistema arrecifal de edad Messiniense, que también se puede incluir en el Sb4. Y el denominado Sb5 aparece representado en la mayor parte de la cuenca.

En este trabajo se adopta el esquema de organización estratigráfica presentado por Soria *et al.* (2008 a, b) y las nuevas aportaciones bioestratigráficas aportadas por Corbí, 2010, en dicho esquema se presentan los rasgos estratigráficos generales de la Cuenca del Bajo Segura considerados por Montenat *et al.*, 1990.

### **1.7.3. Situación y evolución geológica de la zona**

Desde un punto de vista geológico el área de estudio corresponde a una cuenca neógena (Mioceno Superior-Cuaternario), situada en las Cordilleras Béticas Orientales, se conoce comúnmente como Cuenca del Bajo Segura.

Se diferencian dos sectores (norte y sur) desde el punto de vista tectónico y paleogeográfico. En las figuras 4 y 5 se muestran los mapas geológicos simplificados, así como la organización estratigráfica diferenciada para los dos sectores (Fig. 4B y 5B).

Si se exceptúan los afloramientos de metapelitas y cuarcitas alpujárrides de la Sierra de Orihuela, que posiblemente pueden ser de edad Anisiense superior (aproximadamente 240 Ma), los materiales más antiguos que afloran en la provincia de Alicante se atribuyen al Triásico medio y

muestran facies Muschelkalk. Corresponden a depósitos, con frecuencia dolomitizados, de una plataforma carbonatada marina poco profunda.

Debajo de las llanuras abisales de la cuenca mediterránea se han localizado importantes acumulaciones de evaporitas (sulfatos y yesos) de edad Mesiniense. El singular acontecimiento paleoceanográfico que condujo a su precipitación recibe el nombre de “Crisis de Salinidad Mesiniense”. En la provincia de Alicante, la “Crisis de Salinidad Mesiniense” ha quedado bien registrada en la Cuenca del Bajo Segura. Se han reconocido en el margen norte de esta cuenca dos superficies de discontinuidad que representan dos eventos erosivos asociados a la crisis. La primera de ellas corresponde a una modesta caída del nivel del mar que provocó la formación de las evaporitas (fundamentalmente yesos) del margen sur de la cuenca. La segunda, de mayor envergadura, sería sincrónica con el depósito de las evaporitas del centro de la cuenca mediterránea y con la formación de los cañones de sus márgenes. Sobre esta superficie de discontinuidad aparecen materiales margosos del Plioceno inferior que representan la restauración de las condiciones marinas en todo el Mediterráneo.

En la actualidad la provincia de Alicante está sometida a una compresión en la dirección NO-SE. En la mitad meridional de la provincia se concentra la deformación más importante y, por tanto, las fallas más activas (fallas de Crevillente, del Bajo Segura, Guardamar, Torrevieja y San Miguel de Salinas). En este sector se produce una actividad sísmica baja.

## Sector norte

En el sector norte (Fig. 4) el basamento de la cuenca lo forman los materiales de las Zonas Externas. El límite norte coincide con la falla de Crevillente. Los materiales definen un dispositivo monoclinial con frecuentes discordancias progresivas asociadas al movimiento de la falla de Crevillente y al levantamiento de los relieves de las Zonas Externas.

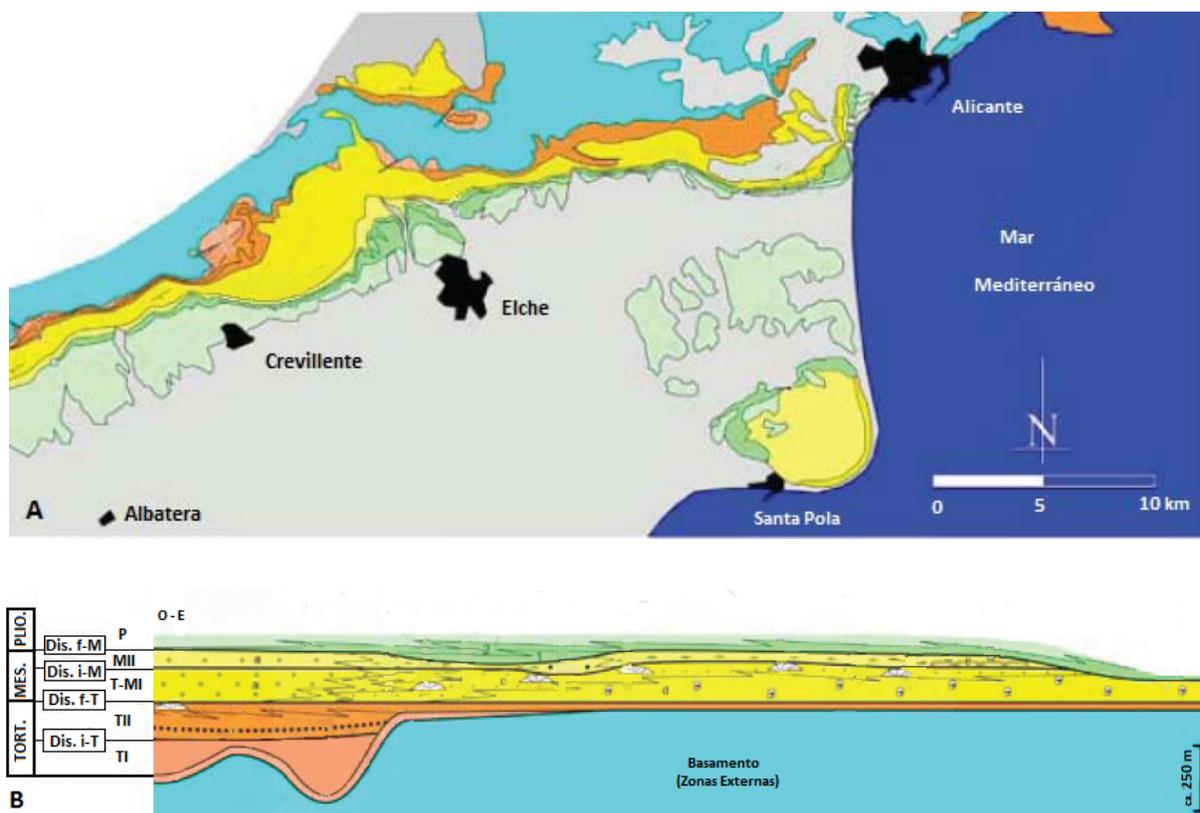


Figura 4. (A) Plano geológico simplificado del sector norte de la Cuenca del Bajo Segura. (B) Organización estratigráfica de este sector (modificado de Corbí, 2010).

## Sector sur

En el sector sur (Fig. 5) afloran materiales del substrato pertenecientes a las Zonas Internas. La parte sur limita con la alineación Torrevieja-Torremendo.

La estructura de este sector presenta notables diferencias respecto al sector norte, en el sector sur los materiales miocenos y del basamento se encuentran afectados por pliegues.

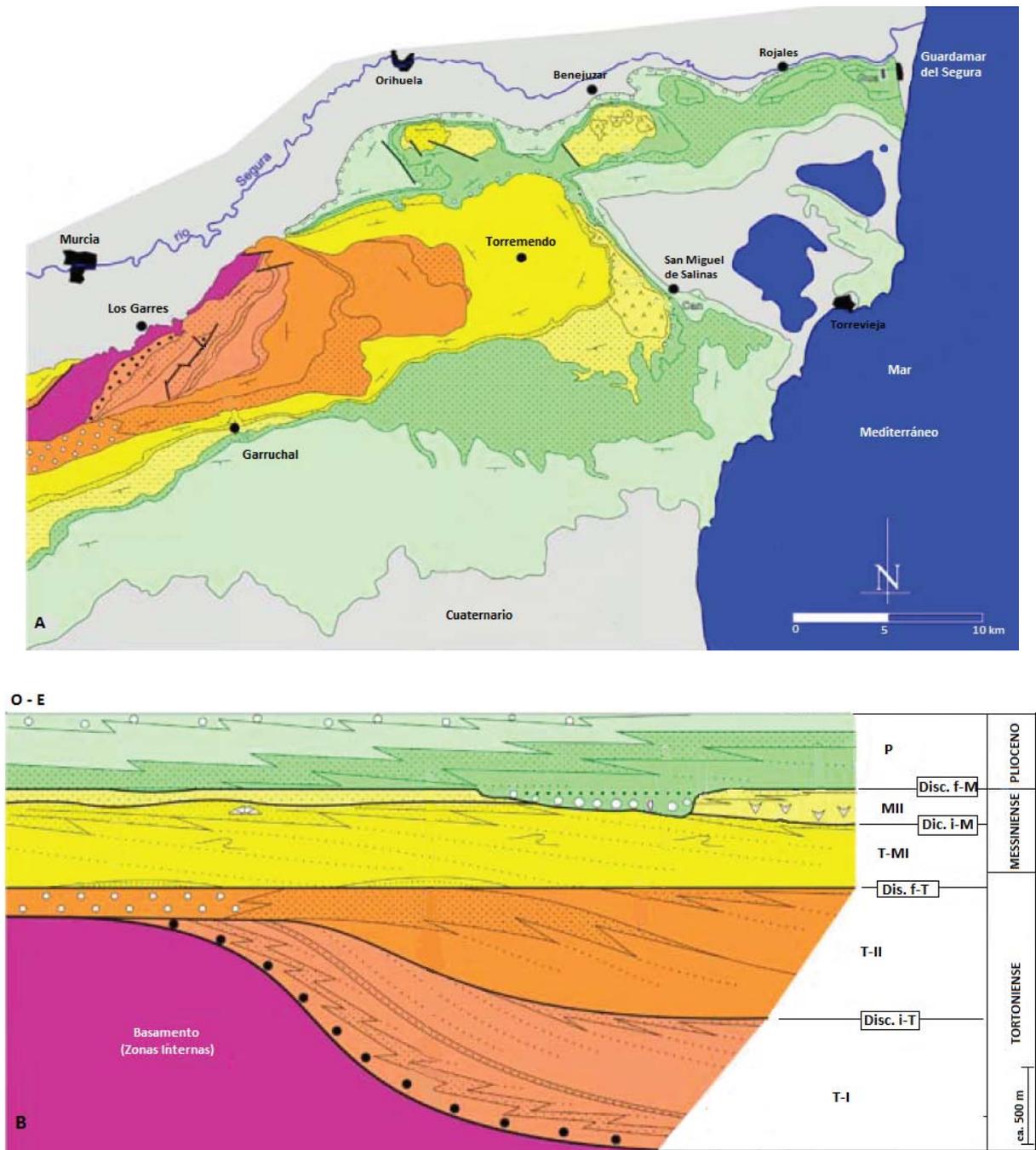


Figura 5. (A) Plano geológico simplificado del sector sur de la Cuenca del Bajo Segura. (B) Organización estratigráfica de este sector (modificado de Corbí, 2010).

### 1.8. Almacenamiento en acuíferos salinos profundos. Parámetros esenciales que deben poseer los niveles almacén y sello

El almacenamiento en acuíferos salinos profundos es la opción más prometedora para llevar a cabo la técnica de CAC. Debido a la ubicuidad de las capas acuíferas en el subsuelo (presentes en casi cualquier cuenca sedimentaria) y el enorme volumen ocupado por ellas.

Sin embargo, estas formaciones no se conocen de la misma forma que los reservorios de hidrocarburos, y cualquier estimación de su capacidad generalmente incluye importantes incertidumbres debido a la carencia de información.

Por lo anterior, conviene insistir en que gran parte de las investigaciones mundiales se han enfocado en la identificación de situaciones favorables a partir de datos geofísicos y de sondeos procedentes fundamentalmente de la industria petrolífera. Este hecho condiciona la ubicación de los almacenamientos potenciales a las zonas con suficiente información disponible, es decir, las cuencas con investigación de hidrocarburos.

La efectividad del almacenamiento en acuíferos salinos profundos depende de diversos mecanismos de entrapamiento que se producen en la formación al ser inyectado el CO<sub>2</sub>; pueden ser tanto químicos como físicos (IPCC, 2005).

Entre los mecanismos físicos se encuentran:

**Entrampamiento estructural:** Inicialmente el CO<sub>2</sub> supercrítico al ser inyectado asciende por flotabilidad y puede quedar confinado físicamente en trampas estructurales o estratigráficas si encuentra una barrera impermeable que le impida subir hacia la superficie. Es el mecanismo más inmediato en acuíferos salinos profundos.

**Entrampamiento hidrodinámico:** El CO<sub>2</sub> es atrapado por el flujo hidrogeológico natural en acuíferos salinos regionales, generalmente tienen velocidades de flujo muy pequeñas del orden de decenas de centímetros por año, lo que implica tiempos de residencia de millones de años. Cuanto más lenta sea la velocidad de transporte y mayor sea la vía de migración, mayor cantidad de CO<sub>2</sub> se irá disolviendo o será atrapado.

**Entrampamiento residual:** Se produce cuando el CO<sub>2</sub> queda inmovilizado en los poros de la roca por la actuación de las fuerzas de capilaridad (Fig. 6). La saturación residual de CO<sub>2</sub> puede variar entre el 5-30 % (Ennis-King y Paterson, 2001). El desarrollo de la pluma está dominado

por el empuje que ejerce el  $\text{CO}_2$  sobre el fluido de la formación. En la parte delantera de la pluma que migra existe una mayor permeabilidad relativa al  $\text{CO}_2$  debido a que el fluido de formación es desplazado por el empuje del  $\text{CO}_2$  ascendente y, en la parte posterior, predomina la absorción de agua (imbibición) como consecuencia de que ésta va inundando por detrás de la pluma que migra. Durante este proceso de imbibición y cuando la concentración de  $\text{CO}_2$  decae por debajo de un cierto nivel, parte del  $\text{CO}_2$  queda atrapado de manera efectiva en los poros por las fuerzas de capilaridad como fase residual inmóvil, fase que puede irse disolviendo en el agua con el tiempo.

Las experiencias de laboratorio realizadas en muestras de la Formación Frío (Texas, USA) indican que este proceso depende de la porosidad, temperatura y presión, en el caso de esta formación la profundidad óptima sería de 3.300 m y supone que en 1.000 años el 95% del  $\text{CO}_2$  inyectado quedaría retenido como gas residual.

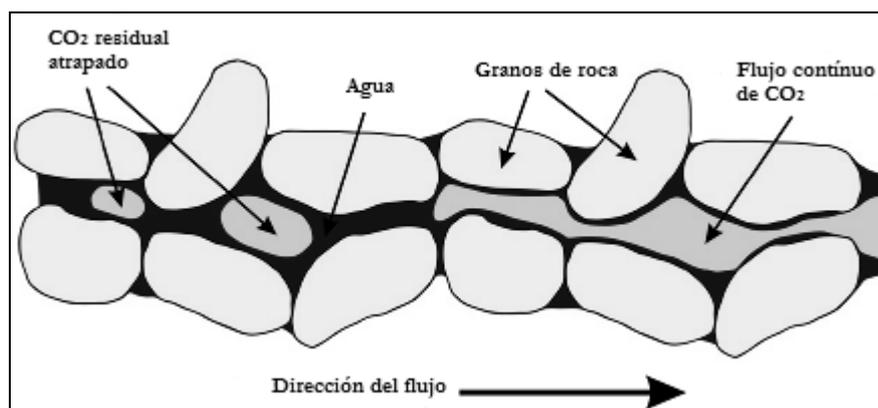


Figura 6. Entrampamiento residual de  $\text{CO}_2$  (modificado de Kaldi y Gibson-Poole, 2008).

Entre los mecanismos químicos se encuentra:

**Entrampamiento por solubilidad:** Se refiere al entrampamiento de  $\text{CO}_2$  cuando se disuelve en el agua de formación. La solubilidad del  $\text{CO}_2$  aumenta con la presión y disminuye al aumentar la temperatura y la salinidad del agua. El dióxido de carbono puede mezclarse y después disolverse en el agua mediante procesos de difusión, dispersión y convección.

A medida que se produce la disolución del  $\text{CO}_2$  en el agua, se pueden producir fenómenos de mezcla convectiva que dominarán sobre la difusión, ya que el agua aumentará su densidad al saturarse en  $\text{CO}_2$ , lo que provocará un desplazamiento de este hacia niveles inferiores del almacén.

La escala de tiempo para completar la disolución depende de la permeabilidad y la geometría de la parte superior del sello, pero se prevé que se produzca en una escala de cientos a miles de años.

**Entrampamiento mineral:** Se produce a partir de la precipitación de nuevos minerales carbonatados tras la reacción química del  $\text{CO}_2$  inyectado con las fases minerales reactivas presentes en la formación o con los fluidos mineralizados ricos en cationes divalentes como Ca, Mg u otros. La escala de tiempo de precipitación de minerales suele ser del orden de decenas a miles de años, dependiendo de los minerales presentes.

El entrapamiento mineral depende de la mineralogía de la roca almacén, la composición química del agua, y la presión y temperatura existentes.

El potencial de entrapamiento es variable de una formación a otra y debe ser examinado como parte del proceso de caracterización del lugar de almacenamiento, dependiendo de la mineralogía de la roca almacén, la composición química del agua y la presión y temperatura existentes.

La figura 7 muestra como el paso del tiempo (en escala geológica) hace que aumente el efecto de algunos mecanismos de entrapamiento citados y con ello aumenta la certeza de confinamiento permanente del  $\text{CO}_2$ .

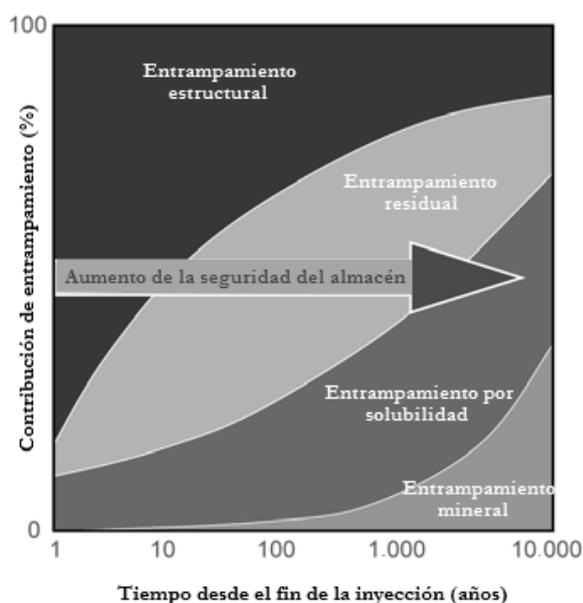


Figura 7. Contribución de cada mecanismo de entrapamiento a la seguridad del almacenamiento (modificado de CSLF, 2007).

En la práctica el entrapamiento mineral puede ser ignorado, en el análisis de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> se deben de tener en cuenta los cuatro mecanismos restantes. En el caso de Sleipner, los estudios realizados demostraron que este mecanismo no constituye un factor de relevancia debido a la reactividad limitada entre el CO<sub>2</sub> y la Formación Utsira. No obstante, en otros yacimientos podría constituir un mecanismo de almacenamiento importante y es probable que afecte a la porosidad y la permeabilidad dentro del yacimiento (Chadwich *et al.*, 2008).

Los criterios geológicos necesarios para ubicar un almacén de CO<sub>2</sub> a escala de cuenca, son:

#### **- Criterios tectónicos**

La idoneidad de una determinada cuenca sedimentaria para almacenar CO<sub>2</sub> se deriva del análisis de la deformación y fracturación dentro de su contexto geodinámico y su relación con la sismicidad. Es preferible ubicar el almacén en zona de baja o nula actividad sísmica, por los posibles efectos de la sismicidad en la seguridad del almacén.

Además, hay que tener en cuenta que la inyección del CO<sub>2</sub> en profundidad a una presión más alta que la presión hidrostática de la formación puede inducir fracturación o movimiento a lo largo de fallas existentes, y puede favorecer la formación de vías de escape para el CO<sub>2</sub> inyectado.

Para estimar las máximas presiones de fluidos aplicables se requiere el estudio de la geometría de las fallas, la medición de la resistencia de las rocas y la determinación de los esfuerzos in situ.

De manera general, todas las cuencas que se encuentren muy plegadas, falladas o situadas en cinturones de plegamiento, que incluyan secuencias muy discordantes o muestren importantes procesos de diagénesis, no son muy apropiadas para almacenar CO<sub>2</sub> (IPCC, 2005).

#### **- Estructurales y estratigráficos**

Un requisito esencial que debe cumplir el emplazamiento geológico es que garantice el confinamiento del CO<sub>2</sub> en profundidad, para ello el emplazamiento debe ubicarse en un medio que conforme algún tipo de trampa estratigráfica (es decir, discordancia sobre formación almacén) o estructural (anticlinal) que, cumpliendo con otros requisitos geológicos, garanticen la estanqueidad del almacén (Fig. 8).

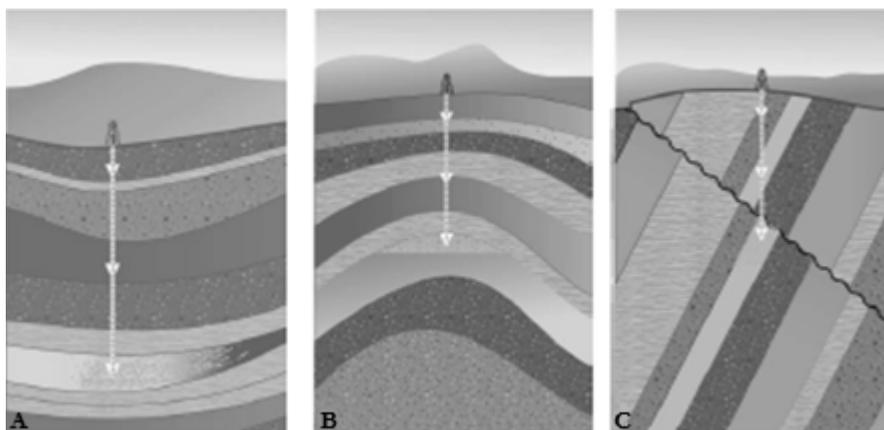


Figura 8. Posibles emplazamientos en los que el CO<sub>2</sub> puede quedar atrapado. A. Trampa por cambio de facies, acuífero salino. B. Trampa estratigráfica, estructural. C. Trampa por falla (CO2CRC, 2011).

Es necesario identificar formaciones almacén que formen parte de trampas o que estén limitadas a techo por sellos impermeables adecuados.

En trampas estructurales simples se pueden predecir los volúmenes y las vías de migración del CO<sub>2</sub> y pueden construirse modelos con un mayor grado de certidumbre que en el caso de un acuífero no confinado.

El caso de estructuras no confinadas se puede encontrar en formaciones con acuíferos regionales extensos con agua salada que carecen de grandes trampas estructurales o estratigráficas por lo que sus límites laterales no son bien conocidos. Las fuerzas de flotación siguen conduciendo el CO<sub>2</sub> hacia los niveles estructurales más altos, pero dentro de los límites de la capa confinante y siguiendo el camino más permeable.

## - Litológicos

### *Litología formación almacén*

En el caso de almacenamiento en acuíferos salinos profundos, se consideran las rocas sedimentarias de mayor porosidad y permeabilidad, como las areniscas. Las rocas sedimentarias que los componen, como areniscas y calizas (u otras rocas carbonatadas) pueden presentar una porosidad y permeabilidad relativamente altas para contener agua y poder transmitirla.

Las calizas suelen presentar baja porosidad primaria, por ello, las calizas no fracturadas tienen escasa capacidad de almacenar fluidos. Sin embargo, tienden a tener una alta porosidad secundaria, por disolución o fracturación, ya que el carbonato cálcico es muy soluble en agua.

Las areniscas normalmente tienen mayor porosidad primaria que las rocas carbonatadas. Muchos acuíferos se localizan en estas rocas y pueden presentar minerales con capacidad para reaccionar con el agua acidificada por el  $\text{CO}_2$  y disolverse aportando cationes que pueden precipitar como carbonatos.

### ***Litología formación sello***

El sello tiene por misión impedir que el fluido migre hacia la superficie o hacia otras formaciones permeables superiores. Para poder comportarse de esta forma, esta formación debe presentar una permeabilidad y características geomecánicas adecuadas.

Las rocas que presentan una buena capacidad de sellado de la formación almacén son pizarras, arcillas y rocas evaporíticas. Esto ha sido demostrado en las diferentes experiencias de almacenamiento de  $\text{CO}_2$ , como en Sleipner, Otway y Weyburn.

Estas rocas presentan buenas condiciones de sellado por su pequeño tamaño de poro, que requiere presiones capilares altas para saturar la roca y transmitir los fluidos.

Las rocas arcillosas y las pizarras suelen presentar altas concentraciones de minerales que pueden aportar cationes para atrapar el  $\text{CO}_2$  en forma de carbonatos, como son los feldespatos y arcillas ricas en Fe y Mg. Las rocas evaporíticas también suelen presentar arcillas, además de carbonatos cementando la roca.

### **- Geotérmicos y de presión**

Dependiendo de la temperatura superficial y de los gradientes geotérmicos y de presión existentes, la profundidad a la que se alcanzan las condiciones supercríticas del  $\text{CO}_2$  son muy variables.

El régimen geotérmico dentro de una cuenca sedimentaria está determinado por la magnitud e interacción de las distintas fuentes de calor y los mecanismos de transferencia por los que el calor terrestre se transfiere a la superficie (Bachu y Burwash, 1991).

Es importante conocer el régimen geotérmico y las condiciones de presión para identificar un rango óptimo de profundidad para el almacenamiento, para el cual la capacidad se optimiza maximizando la densidad del CO<sub>2</sub>.

La figura 9 muestra que las fuerzas de flotabilidad que actúan sobre el CO<sub>2</sub> serán menos fuertes en las cuencas 'frías'. Esto es debido a que para una misma profundidad, la densidad es menor en las cuencas calientes, resultando en una mayor diferencia entre la densidad del CO<sub>2</sub> inyectado y la del agua de la formación.

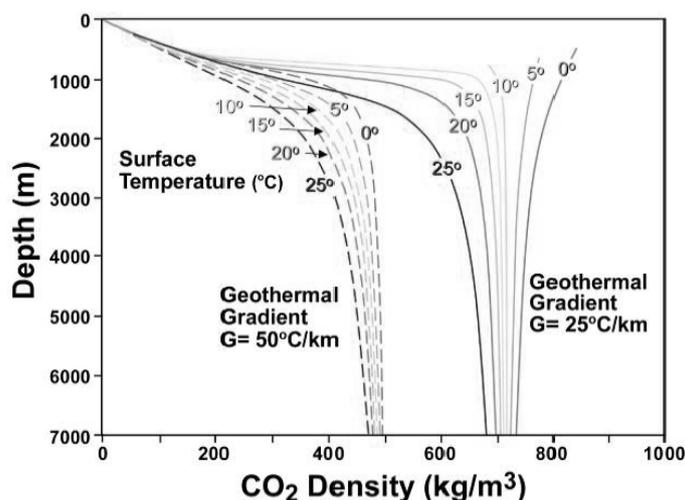


Figura 9. Variación de la densidad del CO<sub>2</sub> con la profundidad y distintos gradientes geotérmicos representativos de cuencas 'frías' y 'calientes' (Bachu, 2008).

Las cuencas que presentan un gradiente geotérmico bajo (~25°C/km) son más adecuadas, ya que permite la inyección de CO<sub>2</sub> en condiciones supercríticas a menores profundidades que con gradientes geotérmicos altos (Ruiz *et al.*, 2008).

A continuación se exponen los parámetros esenciales que deben de presentar la formación sello y almacén a la hora de realizar una inyección en profundidad.

### **Para la formación almacén los parámetros a considerar son los siguientes:**

**Profundidad:** La profundidad del techo de la formación almacén debe garantizar el estado supercrítico del CO<sub>2</sub>, normalmente por debajo de los 800 m. El objetivo es optimizar la capacidad de almacenamiento, con el fin de que ocupe menor volumen el CO<sub>2</sub> que en fase gaseosa en condiciones normales (densidad 1,97 kg/m<sup>3</sup>). El CO<sub>2</sub> alcanza su punto crítico a 7,38

MPa y 31,1 °C y pasa a estar en el llamado estado supercrítico (Fig. 10), en el cual se comporta como un gas en cuanto que tiende a ocupar todo el espacio disponible, pero con una densidad como la de un líquido, que aumenta en función de la temperatura y la presión desde 200 a 900 kg/m<sup>3</sup> (Holloway y Savage, 1993; Hendricks and Blok, 1993).

Hasta los 500-600 m de profundidad, el CO<sub>2</sub> almacenado se encuentra en forma de gas, con una densidad demasiado baja como para admitir volúmenes de almacenamiento económicamente significativos (Holloway y Savage, 1993).

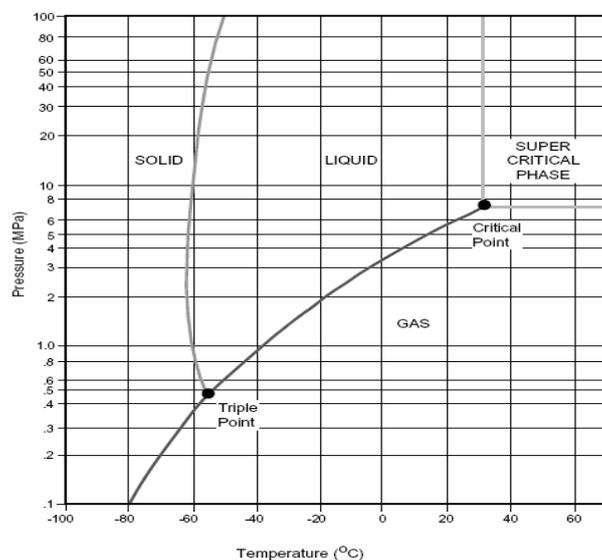


Figura 10. Diagrama de fases del CO<sub>2</sub> (Bachu *et al.*, 2000).

El CO<sub>2</sub> ocupa mucho menos espacio en el subsuelo que en superficie. Una tonelada de CO<sub>2</sub> con una densidad de 700 kg/m<sup>3</sup> ocupa 1,43 m<sup>3</sup>, pero a 0°C y 1 atmósfera, una tonelada de CO<sub>2</sub> ocupa aproximadamente 509 m<sup>3</sup> (Holloway, 2007).

La tecnología de CAC va ligada al extraordinario aumento de densidad del CO<sub>2</sub> derivado del aumento de presión que sufre al ser inyectado en profundidad.

La figura 11 muestra como a determinadas profundidades la densidad del CO<sub>2</sub> se mantiene constante, depende del gradiente geotérmico. Para un gradiente de 20°C/km se alcanzan densidades de 800 kg/m<sup>3</sup>, pero para un gradiente de 30°C/km, la densidad máxima es algo inferior a 700 kg/m<sup>3</sup>.

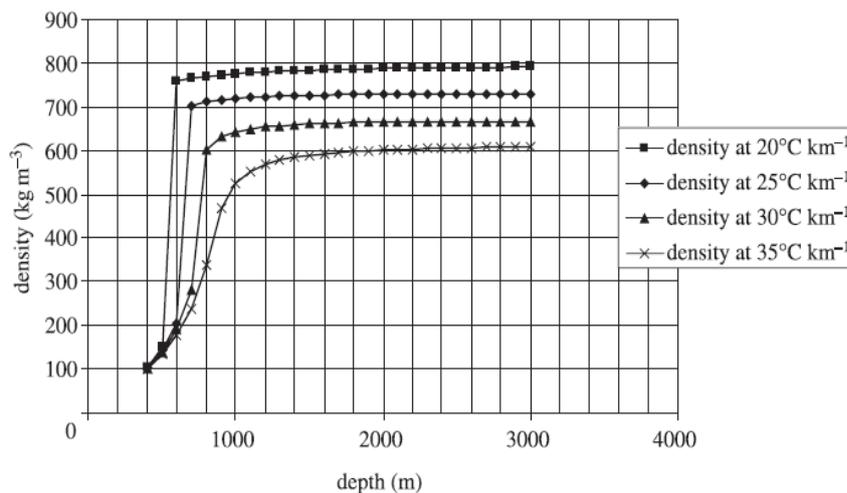


Figura 11. Aumento de la densidad del CO<sub>2</sub> con la profundidad (Holloway, 2007).

**Espesor:** Es un factor importante ya que a mayor espesor, mayor será la tasa de inyección y, por tanto, mayor la capacidad del almacén. La extensión y continuidad de la formación también son relevantes ya que van a determinar el área de confinamiento.

**Porosidad:** La porosidad es el volumen de huecos de la roca, y define la posibilidad de ésta de almacenar más o menos cantidad de fluido. La roca almacén debe de tener una porosidad superior al 10-12% (Ruiz *et al.*, 2008). La medida puede ser tomada directamente por medio de testigos de sondeo o indirectamente mediante el análisis de diagráfias.

**Permeabilidad:** Un indicador positivo para la formación almacén es que su permeabilidad sea superior a 300 mD. Si la permeabilidad de la roca es baja la inyección ocasionaría un aumento de la presión del fluido centrado en el punto de inyección. Esta medida puede ser realizada a partir de testigos.

**Salinidad:** Los almacenes para inyección de CO<sub>2</sub> tienen que contener agua salina, no apta para consumo humano ni para riego. Según lo establecido por las normas americanas, el valor de la salinidad a partir del cual un acuífero es considerado como no recurso es 10.000 mg/l TDS (total de sólidos disueltos). Las formaciones buscadas deberán presentar un contenido en sales superior al establecido como referencia pero no conviene utilizar formaciones con aguas de salinidad demasiado elevada ya que la solubilidad del CO<sub>2</sub> disminuye con el aumento de esta y el volumen de fluido almacenado podría llegar a ser menor del que se pueda esperar. La salinidad puede calcularse a partir de muestra directa, o a partir del análisis de diagráfias.

**Temperatura:** El gradiente de temperatura es un parámetro muy importante, en el caso del proyecto Sleipner, en la Formación Utsira la temperatura varía entre 29°C y 37°C, desde la parte superior de la formación (unos 800 metros bajo el nivel del mar ) hasta el punto de inyección a 1.040 metros de profundidad (Holloway *et al.*, 2002).

**Densidad teórica del CO<sub>2</sub>:** En la arena Utsira, aumenta la presión hacia abajo a través de la formación y la temperatura y la presión tienen efectos opuestos sobre la densidad, por lo que en la práctica, la densidad es relativamente constante, de unos 700 kg/m<sup>3</sup> que corresponde a una viscosidad de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 0,06 mPa s.

En la tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros geológicos para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, indicando los valores a partir de los cuales se consideran positivos o negativos.

Formación almacén	Parámetros positivos	Parámetros negativos
Profundidad	>800 m, < 2.500 m	< 800 m, > 2.500 m
Espesor	> 50 m	< 20 m
Porosidad	> 20 %	< 10 %
Permeabilidad	> 300 mD	< 10 - 100 mD
Salinidad	> 10.000 mg/l	< 3000 mg/l

Tabla 1. Parámetros geológicos clave para la adecuación de lugares de almacenamiento (modificado de Chadwick *et al.*, 2008).

#### En el caso de la formación sello:

**Espesor:** Cuanto mayor es el espesor de la capa confinante menor es la probabilidad de que se produzcan migraciones de fluido inyectado. Es recomendable un espesor superior a 100 m y no menor a 20 m (Chadwick *et al.*, 2008).

**Fracturación:** Un sello que en principio es adecuado según sus características petrofísicas y su geometría, puede presentar fracturas, de manera que la calidad no sea la demandada. Si las fracturas encontradas son importantes pueden invalidar una formación aparentemente favorable.

**Continuidad lateral:** Puede parecer un requisito indispensable, un cierre que impida la expansión del CO<sub>2</sub> lateralmente por debajo del techo, en cambio, la experiencia de Sleipner indica que la distancia de expansión queda limitada debido a que con el tiempo el CO<sub>2</sub> inyectado se disuelve en la salmuera, haciéndola más densa que la salmuera sin CO<sub>2</sub>, de manera que se va al fondo del acuífero.

Para seleccionar un emplazamiento como almacén de CO<sub>2</sub>, además de ser geológicamente adecuado, debe cumplir otra serie de requisitos indispensables para su posible ubicación, entre ellos:

**Distancia al centro de emisión:** Se daría prioridad a las áreas próximas a los focos de emisión, como las centrales térmicas de carbón y petróleo, las industrias cementeras y las industrias cerámicas.

**Volumen de almacenamiento requerido:** Es necesario evaluar si las tasas de inyección previsibles en el emplazamiento se ajustan a las tasas de emisión de la fuente. El almacén seleccionado debe de tener un tamaño (potencia y extensión) lo suficientemente grande como para almacenar la cantidad de CO<sub>2</sub> planeada.

**Viabilidad económica:** La viabilidad del proyecto necesitará la consideración previa de los aspectos económicos. Las tecnologías y equipos necesarios han sido ya utilizados por la industria energética, por lo que las estimaciones se pueden realizar con bastante precisión. La localización del emplazamiento, la escala de la operación, las características geológicas del terreno y la profundidad de la inyección son variables importantes a tener en cuenta, por afectar al coste del almacenamiento. Los costes de transporte, inyección y almacenamiento del CO<sub>2</sub> son en todo caso muy inferiores a los costes de captura (3-4 veces superiores), ya que para esta se requieren tecnologías más complejas y de mayor consumo energético.

**Requisitos ambientales:** Es importante estimar el tiempo que el CO<sub>2</sub> permanecerá almacenado, así como demostrar que el almacenamiento será seguro durante ese tiempo. La liberación de CO<sub>2</sub> a través de fallas, desde pozos de inyección o pozos abandonados puede dar lugar a riesgos potenciales sobre el medioambiente además de hacer ineficaz la estrategia de mitigación del cambio climático.

Para evitarlo es necesario realizar una cuidadosa selección de emplazamientos, identificar posibles vías de liberación y establecer los requisitos de monitorización y verificación del confinamiento.

**Zonas pobladas:** Se excluirán las áreas con proximidad a las zonas pobladas, por razones de seguridad, tanto de carácter operacional como post-operacional, y posiblemente por oposición social. Los estudios sobre percepción y aceptación del público sobre el almacenamiento geológico de dióxido de carbono están todavía en una fase inicial (IPCC, 2005).

En esta investigación no se han estudiado estos últimos criterios mencionados. Nos centramos principalmente en los criterios geológicos, estructurales y en los parámetros esenciales que deben cumplir las formaciones almacén/sello estudiadas.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTUDIO LITOESTRATIGRÁFICO**

---

## 2.1. Estudio litoestratigráfico de la Cuenca del Bajo Segura

En este sector de la Cuenca del Bajo Segura afloran materiales de tres grandes conjuntos, claramente diferenciables, pertenecientes a las Zonas Internas, Zonas Externas y terciario. Las dos primeras constituyen el substrato sobre el que se disponen los sedimentos detríticos arcillosos y carbonatados miocenos, pliocenos y cuaternarios.

### 2.1.1. Zonas Internas

Los afloramientos más importantes, por sus dimensiones, son los de la Sierra de Orihuela, y Callosa de Segura, hacia el centro-suroeste de la zona, concretamente asignados al Complejo Alpujárride. El vestigio alpujárride más oriental se encuentra frente al Cabo de Santa Pola, en la isla de Tabarca (Estévez *et al.*, 2004).

En estos afloramientos se pueden observar las litologías siguientes, de muro a techo:

*Filitas y cuarcitas. Pérmico-Triásico inferior (2)*: Localmente, calcoesquistos, con un metamorfismo de grado bajo. Afloran en proximidad al borde occidental del afloramiento de Callosa de Segura como una banda estrecha dispuesta en dirección NNO-SSE, pinzadas entre carbonatos. En otros afloramientos, fuera de la zona de estudio, concretamente en la Sierra de Orihuela, incluyen *metabasitas y anfibolitas (1)* en pequeños afloramientos repartidos por las sierras. Estas rocas verdes se distribuyen ampliamente a lo largo de toda la columna geológica del Complejo Alpujárride desde el Paleozoico hasta el Carniense.

*Dolomías y caliza gris oscura. Anisiense - Ladiniense (3)*: Se encuentran dos pequeños afloramientos en Callosa de Segura, el de mayor extensión al norte de Cox.

*Margocalizas con fósiles. Ladiniense (4)*: Aparecen asociadas a la litología anteriormente descrita (2) en la misma banda estrecha en dirección NNO-SSE, al occidente del macizo de Callosa de Segura. También se encuentra aflorando al sur de Benferri.

*Calizas micríticas con nódulos de sílex. Ladiniense (5)*: Aflorando al sur de Benferri asociado al anterior (4), y en afloramientos más pequeños y dispersos.

*Calizas y dolomías. Anisiense-Carniense (6)*: Es la litología predominante en estos afloramientos del Complejo Alpujárride, tanto en la Sierra de Orihuela como en su continuación hacia el NE, la Sierra de Callosa de Segura. En el Magna se diferencia la Unidad de Callosa, constituida por cuatro formaciones (Cox, Pizarras Verdes, Callosa y San Pedro), y , definida principalmente por carbonatos en estratos finos a medianos y la Unidad de Orihuela, constituida por dos

formaciones (Águila y Gertrudis), asimismo de carbonatos estratificados en niveles finos a muy gruesos.

En la cartografía del Plan GEODE (2009) estas dos unidades se unifican como un conjunto único de calizas y dolomías de edad Anisiense-Carniense.

En la isla de Tabarca los materiales más antiguos son el basamento que deben de corresponder a dolomías negras recristalizadas con estructura brechoide del Complejo Alpujárride, aunque algunos autores (Calvet *et al.*, 1996) mencionan la posibilidad de que sean materiales pertenecientes a las Zonas Externas.

Esta litología de calizas y dolomías del Complejo Alpujárride, en principio, se podría considerar interesante como roca almacén para CO<sub>2</sub>, sin embargo, observando sus características organolépticas esenciales en afloramiento no son aceptables, ya que carecen de porosidad y su permeabilidad debida esencialmente a sus discontinuidades (estratificación y deformación frágil), es baja.

Además, en varias muestras recogidas durante el trabajo de campo se realizó en laboratorio el cálculo de porosidad abierta obteniendo un valor medio de 3,2%, que se corresponde con un valor muy bajo para poder considerar esta litología como posible almacén de CO<sub>2</sub>

*Margas, arcillas, margocalizas, dolomías y yesos. Carniense (7):* Se localizan en el borde norte de la Sierra de Callosa de Segura, en afloramientos de pequeña extensión, al norte de la Sierra de Orihuela se encuentran con mayor extensión.

*Calizas y dolomías. Noriense-Retiense (8):* Afloran al norte de la Sierra de Orihuela.

En la tabla 2 se representa la columna litoestratigráfica del Complejo Alpujárride que conforma la Sierra de Orihuela y parte de Callosa de Segura así como otros asomos dispersos por la zona. A partir del teórico meridiano que pasa por San Isidro-Rafal, hacia el Este y hasta el mar, no existen testigos aflorantes de las Zonas Internas.

TRIÁSICO	Superior	Rhaetiense	8. Calizas y dolomías			
		Noriense				
		Carniense	7. Margas, arcillas, margocalizas dolomías y yesos locales			
	Medio	Ladiniense	3. Dolomías y caliza gris oscura	4. Margocalizas con fósiles	6. Calizas y dolomías	1. Metabasitas y anfibolitas
		Anisiense		5. Calizas micríticas con nódulos de sílex		
Inferior	Scytiense	2. Filitas y cuarcitas.				
PÉRMICO	Lopingiense	Localmente cuarcitas y cuarzomicaesquistos				

Tabla 2. Columna litoestratigráfica del Complejo Alpujárride.

### 2.1.2. Zonas Externas

Afloran, los materiales asignados a las Zonas Externas de la Cordillera Bética, limitando el borde noroccidental de la zona, dispuestos en una banda de dirección NE-SO. Si bien han sido atribuidos a dos grandes complejos, Subbético y Prebético, los agrupamos aquí en un solo conjunto: el substrato externo.

En general son niveles carbonatados, datados desde el Trías medio hasta el Paleógeno. Sus características litológicas esenciales son las siguientes, de muro a techo:

*Calizas oscuras. Triásico medio (Muschelkalk) (9):* Se pueden observar en distintos puntos en forma de pequeños afloramientos y siempre ligados al Trías de facies keuper. Los principales asomos, por su extensión, pueden estudiarse al NO de Crevillente y en Sierra Negra. Litológicamente son calizas negruzcas a veces tableadas en las que se intercalan, localmente, niveles dolomíticos y calcomargosos que han podido ser datados como Ladiniense medio-superior, basado en el reconocimiento de bivalvos, conodontos, foraminíferos y polen (Tent-Manclús, 2003).

*Margas abigarradas, arcillas rojas y verdes, yesos blancos o coloreados. Triásico superior (Keuper)(10):* Los afloramientos de mayor extensión se observan en el sector de Las Ventanas (entre Monte Alto y la Sierra de Abanilla), al oeste del meridiano de Aspe, asociados a las formaciones jurásicas, en el Alto del Forac y al este de dicho meridiano, en Sierra Negra. En conjunto están formados por margas de colores abigarrados, arcillas rojas y verdes así como yesos blancos o coloreados.

Existen dos importantes controversias en relación a la datación y emplazamiento de estos materiales triásicos. Por un lado, los testigos de rocas carbonatadas englobados en la masa margo-arcillosa-yesífera son asignados indistintamente al Muschelkalk o al tránsito Trías-Lías (Retiense), según los autores. En el plan GEODE (2009) se asignan a una Unidad Olistrostrómica, con olistolitos de unidades infrayacentes, datada de edad Langhiense (Mioceno medio). Tent-Manclús (2003) identifica afloramientos triásicos in situ y otros redepositados, además de subdividirlo en distintas formaciones y miembros, se cita la presencia de algunos bloques de calcarenitas amarillentas miocenas, englobados en las facies keuper de Sierra Abanilla, por lo que considera que difícilmente se puede justificar la edad triásica de estas facies y que, por tanto, deben ser consideradas como facies keuper retrabajadas durante el Mioceno.

También se encuentran afloramientos dispersos de poca extensión de ofitas (Carniense-Noriense).

Asimismo puede observarse un pequeño afloramiento al N del Tabayal, de arcillas abigarradas, margas yesíferas y yesos (Carniense-Noriense).

Para los objetivos de esta tesis señalaremos como interesante la presencia de un Trías de facies keuper en el borde o límite septentrional de la cuenca, emplazado por movimientos halocinéticos y que posteriormente, en parte, ha sido retrabajado y redepositado, sufriendo un transporte corto, durante el Mioceno. Estimamos que si el retrabajamiento y transporte de los materiales triásicos hubiese sido de medio a largo no existirían las masas evaporíticas presentes en los afloramientos considerados como nuevamente redepositados.

Solamente el gran afloramiento de Sierra Abanilla es, en parte, redepositado, mientras que el resto de asomos triásicos de facies keuper alineados en el borde septentrional de la zona (Sierra Negra, Alto del Forac, NE de Tabayal) están emplazados in situ.

En cuanto a la asignación de las rocas carbonatadas del Muschelkalk o Retiense, para el objetivo esencial de esta investigación, no es de especial importancia, ya que como rocas almacén no poseen características adecuadas y aparte de su complejidad estructural es muy difícil determinar su geometría en profundidad si es que estuvieran constituyendo el substrato de los sedimentos terciarios-cuaternarios de la zona de estudio así como de su continuidad bajo el Mar Mediterráneo.

*Dolomías, calizas y margas. Jurásico inferior y medio (11, 12 y 13):* El Jurásico inferior y medio está representado en el sector central de la banda noroeste que limita la zona constituyendo, en su mayor parte, los materiales que conforman la Sierra de Crevillente.

En el MAGNA se diferencian varios tramos, comenzando por unas dolomías del Sinemuriense-Hettangiense, que afloran al norte del Paso de las Yeguas, y, continuando con calizas dolomíticas, calizas con sílex y calizas nodulosas, hasta el Bajociense (Dogger). Sin embargo en el GEODE esta serie carbonatada se divide en calizas grises y blancas desde el Hettangiense hasta el Bathoniense y calizas y margas grises y amarillentas asignadas al Domeriense-Bathoniense.

Tent-Manclús (2003), diferencia nueve unidades y formaciones en el Jurásico inferior, todas de naturaleza carbonatada; dolomías a la base y calizas oolíticas o micríticas, también glauconíticas y con sílex, en general de color blanco. En el Jurásico medio distingue tres unidades de calizas, con sílex y radiolarios y un nivel superior de margocalizas rojas y blancas.

En este trabajo agrupamos el Lías-Dogger en: calizas grises y blancas en bancos gruesos a masivas (12) englobando las dolomías de base (11), de edad Hettangiense hasta Bathoniense y que afloran principalmente, de O a E, desde el Alto de San Cayetano, Sierra de Crevillente y Sierra del Caminante al norte. También pueden observarse en La Umbría, Ors, al Este de Hondón de las Nieves y en Ofra.

El otro conjunto (13) está litológicamente constituido por calizas y margas bien estratificadas grises-amarillentas, a veces con nódulos de sílex y de edad Toarciense (Lías superior) a Bathoniense (Dogger). Se encuentran aflorando principalmente al oeste de Ofra, al norte de Hondón de las Nieves y al suroeste de La Umbría.

Para los objetivos de esta investigación el primer conjunto podría considerarse para almacén de CO<sub>2</sub>, sin embargo las observaciones directas en sus afloramientos manifiestan que son rocas con escasa o nula porosidad. Para comprobarlo se realizaron ensayos de laboratorio a varias muestras tomadas en afloramiento, concretamente en el kilómetro 10 de la carretera de Albaterra-Hondón de los Frailes, con coordenadas N38°15'1,6"; W0°54'29". La porosidad abierta da valores medios del 4,2% y como densidad aparente media 2.629 kg/m<sup>3</sup>. El conjunto ha tenido una deformación frágil importante.

*Calizas pelágicas condensadas. Jurásico medio-superior (14):* Las calizas nodulosas, a veces rojas y con Ammonites (Ammonítico Rosso) se encuentran aflorando principalmente en una banda de dirección SO-NE al sur de la Sierra de Crevillente y un pequeño afloramiento al S de Hondón de las Nieves.

Tent-Manclús 2003, distingue en este conjunto tres unidades: margocalizas nodulosas rojas (Oxfordiense), alternancia de calizas margosas y margocalizas nodulosas (Kimmeridgiense-Titónico) y calizas y margocalizas nodulosas (Kimmeridgiense-Berriasiense).

Por nuestra parte, seguimos las directrices del GEODE y agrupamos este conjunto que comprende el Malm y posiblemente los niveles superiores del Dogger, bajo la denominación de calizas pelágicas condensadas.

Si el Lias-Dogger pudiese considerarse como nivel almacén estos otros niveles del Dogger-Malm constituirían, por su litología, prácticamente impermeable, el tramo sellante.

*Ritmitas margosas, calizas pelágicas. Cretácico inferior (Berriasiense- Albiense) (15):* Afloran a modo de una banda estrecha en contacto con las calizas pelágicas condensadas (14), así como en proximidad a Hondón de las Nieves.

*Margas blancas y calizas margosas. Cretácico inferior-superior (Hauteriviense-Santonense) (16):* Pertenecientes a la Fm Capas Blancas (Martín, 1987). Afloran, escasamente, al SO de Hondón de las Nieves.

*Calizas margosas rosadas, verdes y blancas. Cretácico (Cenomaniense-Eoceno) (17):* Se encuentran dos pequeños afloramientos en contacto con las calizas bioclásticas y margas del Neógeno (26).

*Margas y calizas margosas blancas. Cretácico inferior (Barremiense-Aptiense) (18). Margas arenosas micáceas y margocalizas. Cretácico inferior (Aptiense- Albiense) (19). Calizas y calizas arenosas y margosas. Cretácico inferior-superior (Albiense-Cenomaniense) (20). Margas y calizas margosas. Cretácico inferior-superior (Albiense-Coniacense) (21):* El término asignado al número 18 aflora al norte de la Sierra de Borbuño y al este del Tabayal. El correspondiente al número 19 constituye el tránsito entre las Formaciones Carrajón y Los Villares, aflora con poca extensión al sur de Monte Alto. El asignado al 20 aflora extensamente en el borde noreste de la zona, cercano a la ermita de Santa Ana. El tramo de calizas y calizas arenosas (21) posee colores ocres y grises, aflorando principalmente en el valle del Vinalopó y al norte de Los Orones.

Tent-Manclús (2003), obtiene en los niveles superiores de este conjunto asociaciones de foraminíferos planctónicos con edades que van desde el Albiense hasta el Coniacense (Cretácico superior).

*Calizas bioclásticas y oolíticas y margas con orbitolinas. Cretácico. Albiense - Cenomaniense (22):* Constituyen el tramo del miembro superior de la Fm Arroyo de los Anchos. Aflorando al este del cerro de San Cayetano.

*Alternancia de calizas margosas y margas blancas. Cretácico superior. Maastrichtiense-Turonense (23):* Son niveles de calizas margosas alternando con margas blancas y ocasionales tonos salmón. El afloramiento más oriental, en la zona de estudio, aparece al norte de Sierra Gorda, en donde estos estratos se presentan con abundantes repliegues. El afloramiento del Puntal de Matamoros, en una loma de orientación NE-SE, posee, además, niveles de calizas micríticas blancas. Al NE de La Borisa y el meridiano de Aspe, aflora también el Cretácico superior, y un poco más al norte y atravesado por la carretera de Aspe a Elche, aparece representado principalmente por margas.

Tent-Manclús (2003) diferencia tres unidades en el Cretácico superior, la unidad de calizas blanco-grisáceas, de calizas margosas y margas blancas y rojas y la unidad litológica de margas con olistostromas.

*Alternancias rítmicas de margas, areniscas y calizas en facies Flysch. Cretácico-Paleógeno (Maastrichtiense-Bartoniense) (24):* Son escasos los afloramientos del Paleógeno en el borde septentrional de la zona de estudio. Se concretan al sur de Aspe y al SO de Sierra Negra así como uno de pequeñas dimensiones al NO de Sierra Gorda.

En la tabla 3 se representa la columna litoestratigráfica del substrato bético externo, englobando, como se ha escrito anteriormente, los materiales asignados al subbético y el prebético.

Por su litología ningún tramo y nivel descrito, a partir de Lias-Dogger, se puede tener en consideración como posible material almacén de CO<sub>2</sub>. Tomados en su conjunto y por sus características de impermeabilidad podrían ser o contribuir al sellado de otros niveles inferiores que pudieran ser favorables como almacén, como, por ejemplo, los carbonatos del Lias-Dogger pero estos, como ya se viene describiendo, no presentan parámetros adecuados favorables como almacenes, especialmente por su carencia de buena porosidad y permeabilidad, aparte de su complejidad estructural e intensa tectonización.

Las experiencias mundiales en almacenes constituidos por carbonatos son escasas. En el caso de España, en la localidad de Hontomín (Burgos) y a cargo de la Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN), se está preparando una experiencia piloto para inyectar CO<sub>2</sub> en una formación de rocas calizas jurásicas para ser almacenado a unos 1.400 metros de profundidad. El gas, sometido a presión, deberá alojarse en los poros de la roca caliza, empapada de agua salobre. Esta deberá actuar como una esponja, el CO<sub>2</sub> deberá disolverse y reaccionar con los minerales de la roca para formar nuevas mineralizaciones y quedar confinado.

PALEÓGENO	Eoceno	Priaboniense	17. Calizas margosa rosadas, verdes y blancas			24. Margas, areniscas y calizas	
		Bartoniense					
		Luteciense					
		Ypresiense					
	Paleoceno	Thanetiense					
		Selandiense					
CRETÁCICO	Superior	Maastrichtiense	15. Ritmitas margosas, calizas pelágicas	16. Margas blancas y calizas margosas	23. Calizas margosas y margas blancas	19. Margas arenosas	21. Margas y calizas margosa
		Campaniense					
		Santonense					
		Coniaciense					
		Turonense					
		Cenomaniense					
	Inferior	Albiense					
		Aptiense					
		Barremiense					
		Hauteriviense					
		Valanginiense					
		Berriasiense					
JURÁSICO	Superior (Malm)	Tithoniense	14. Calizas pelágicas condensadas (Ammonítico Rosso)				
		Kimmeridgiense					
		Oxfordiense					
	Medio (Dogger)	Calloviense	12. Calizas grises y blancas	13. Calizas y margas grises y amarillentas			
		Bathoniense					
		Bajociense					
		Aaleniense					
	Inferior (Lias)	Toarciense	11. Dolomías				
		Pliensbachiense					
		Sinemuriense					
Hettangiense							
TRIÁSICO	Superior (Keuper)	Rhaetiense	10. Margas abigarradas, arcillas rojas y verdes, yesos blancos o coloreados				
		Noriense					
		Carniense					
	Medio (Muschelkalk)	Ladiniense	9. Calizas oscuras. Alternancia de tramos carbonatados y calcomargosos, predominantemente margosos hacia la parte superior de la sucesión. Incluye importantes cuerpos de rocas ígneas (ofitas)				

Tabla 3. Columna litoestratigráfica del substrato bético externo.

### 2.1.3. Neógeno

Afloran los materiales neógenos a todo lo largo del borde norte de la zona, adosados a los niveles subbético-prebéticos, así como en el sector suroccidental y nororiental, dejando entre ellos una amplia llanura ocupada por terrenos cuaternarios.

La columna litoestratigráfica neógena se describe a continuación, de muro a techo:

*Margas y margas calcáreas (25). Calizas bioclásticas y margas (26). Margas arenosas y margas blancas. Mioceno inferior (Aquitaniense-Burdigaliense) (27):* Estos materiales pueden estudiarse esencialmente en sus afloramientos de Monte Alto y este del cerro de San Cayetano.

El tramo de calizas bioclásticas del Aquitaniense-Burdigaliense podría constituir una formación interesante a considerar como almacén. En los alrededores de Monte Alto se encuentran en contacto con el Keuper, presentan color amarillento, y muy fracturadas, lo que les confiere una buena permeabilidad secundaria. En los ensayos de laboratorio realizados para determinar la porosidad abierta media se obtuvieron valores de 13,4% y densidad aparente media de 2.357 kg/m<sup>3</sup>, las muestras fueron tomadas en la carretera de Albaterra-Hondón de los Frailes, CV-873, en las coordenadas N 38°15'02"; W 0°54'30".

El tramo de margas arenosas y margas blancas (27) aflora formando una estrecha banda al este del Pantano de Elche y con algo más de extensión al E del Tabayal, discordante sobre el Triásico y el Cretácico superior del Valle de Vinalopó. El Mioceno inferior no aflora en los asomos del borde sur de la zona.

*Calcarenitas y calizas bioclásticas (28). Margas blancas con intercalaciones de areniscas y calizas (Burdigaliense-Serravalliense) (29). Areniscas bioclásticas, biocalcarenitas con niveles de calizas y ocasionales de conglomerados y margas. Mioceno medio (Langhiense-Serravalliense) (30). Margas blancas y limos rosas con intercalaciones de conglomerados (Tortonense) (31):* Afloran al norte y este del Pantano de Elche, en una banda ancha entre terrenos triásicos de facies keuper y carbonatados cretácicos. No aparecen, al igual que el Mioceno inferior, al sur de la zona.

Las calcarenitas y calizas bioclásticas (28) bautizadas por Montenat (1977) como Calizas del Vinalopó, se encuentran en discordancia angular sobre los depósitos del Mioceno inferior. Son de colores amarillentos a verdosos con una estratificación poco marcada y a pesar de sus acumulaciones de foraminíferos y restos de equinodermos, moluscos y briozoos, no se pueden datar de forma precisa si no como Mioceno medio.

En este tramo carbonatado-detrítico forman un conjunto homogéneo, bastante tectonizado y con un espesor mínimo de 200 m.

Nos encontramos en este punto de la columna litoestratigráfica de la zona con un tramo interesante (28) para considerarlo como posible almacén, especialmente por su potencia y características hidrogeológicas, así como por su posible nivel sellante constituido por las margas blancas con intercalaciones de areniscas y calizas (29). Sin embargo, su intensa tectonización y ausencia de continuidad lateral en la zona, los descarta como dualidad almacén-sello, ya que no es posible establecer, ni siquiera, su modelo geométrico-geológico aproximado.

*Calcarenitas, biocalcarenitas y calizas con ocasionales niveles de margas arenosas y conglomerados basales (32). Conglomerados, areniscas y arcillas con ocasionales pasadas de calizas (33). Calizas de algas. Calcarenitas, calciruditas. Serravalliense (34):* La base del Mioceno superior aflora de manera un tanto caótica, en cuanto al tamaño y distribución de sus afloramientos, a lo largo de todo el borde septentrional de la zona, excepto en el sector noreste, a partir del meridiano de Sierra Gorda, aproximadamente.

Así el tramo 34 se va ensanchando hacia el este hasta el Barranco de las Monjas y SSO del embalse de Vinalopó.

Este conjunto de calizas, conglomerados y calizas de algas fue denominado como 'Fm de calizas del Tabayal' por Montenat (1977) asignándolo al Tortoniense inferior o Tortoniense I.

Reposa en discordancia angular sobre los tramos que constituyen el Mioceno medio, así como sobre el Cretácico y Triásico arcillo-evaporítico. En general son calizas bioclásticas groseras de color crema o rosáceas, con restos de moluscos, equínidos y briozoos, a veces dispuestos en niveles. El conjunto es masivo y compacto sin una clara estratificación.

Todo el conjunto se puede estimar con una potencia media comprendida entre los 100 y 120 m. La heterometría, diseminación y escasa extensión de los afloramientos del Tortoniense inferior, los descarta, en principio, para considerarlos como posibles niveles almacén de CO<sub>2</sub> a pesar de sus otras buenas características como potencia, permeabilidad y porosidad.

Sin embargo, su régimen marino de depósito de plataforma, que culmina con las capas de conglomerados continentales, nos hace estimar que puedan encontrarse, en profundidad, bajo la llanura cuaternaria, y el mar, con suficiente continuidad para poder constituir otra opción de niveles almacén.

*Margas blancas en facies Tap. Mioceno superior (Tortonense I) (35)*: Afloran exclusivamente al sur de la Sierra de Crevillente, entre Monte Alto y al norte del embalse de la población que da nombre a la Sierra. En el sector más occidental aparecen en una banda relativamente estrecha, con una potencia no superior a los 60 m, mientras que en el oriental, al N del embalse de Crevillente, alcanzan un espesor superior a los 300 m. Son margas blancas, ligeramente azuladas con intercalaciones detríticas.

Este conjunto engloba las denominadas como Fm de Les Moreres y Unidad litológica de las margas de la Galería de los Suizos (Tent-Manclús, 2003). Son equivalentes a la Formación de Margas y Areniscas de La Atalaya (Montenat, 1977).

*Conjunto calcáreo-detrítico. Formación las Ventanas (sector norte) (36)*: Reposo indistintamente sobre terrenos de variada edad y litología. De esta manera se presenta en discontinuidad sobre materiales del mioceno medio, cretácicos y triásicos.

En la figura 12-A, tomada cerca del km 15 de la carretera de Aspe a Crevillente se encuentra dicha formación como un conjunto de areniscas masivas, mal estratificadas, con un nivel de conglomerados a la base de cantos redondeados decrecientes. Se encuentra discordante sobre materiales cretácicos.

En la figura 12-B, realizada desde el km 4 de la carretera CV-850, se dispone la Formación las Ventanas como areniscas amarillentas sobre la discordancia, y por debajo los materiales del Trías keuper.

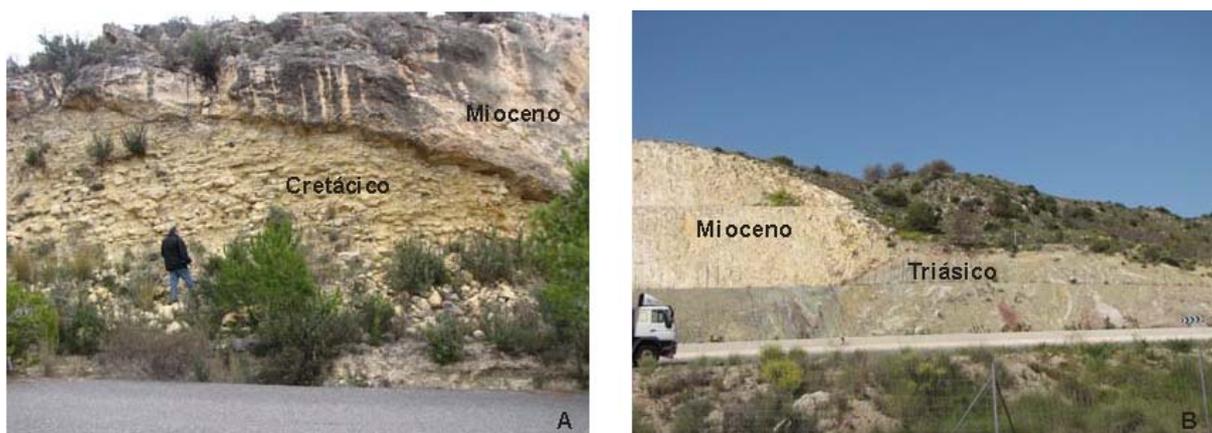


Figura 12. A) Discordancia: Mioceno (Formación las Ventanas)-Cretácico. B) Discordancia: Mioceno (Formación las Ventanas)-Triásico.

Aflora prácticamente a todo lo largo del borde norte de la zona, desde el sur de la Sierra de Abanilla, hasta el límite oriental de la cuenca en la Sierra de Borbuño.

A diferencia de las series miocenas anteriormente descritas, esta unidad, atribuida al Tortoniense II-Messiniense, aflora extensamente, con una gran continuidad, en sucesiones monoclinales muy regulares solamente trastocada por repliegues en el sector de Sierra Gorda.

A todo lo largo de sus afloramientos presenta cambios laterales de facies, así, por ejemplo, en la margen derecha del embalse del Vinalopó, Montenat (1977) distingue los tramos siguientes:

A la base, areniscas margosas grises con ostreidos, seguidas de areniscas calcáreas amarillentas (60 m). Sobre el anterior, 70 m de areniscas-calcáreas con lentes de conglomerados y cantos generalmente bien rodados arrastrados de terrenos mesozoicos y nummulíticos del dominio Bético. Un nivel margoarenoso intercalado en este tramo permitió datarlo como Tortoniense II, al encontrarse *Globorotalia pseudomiocénica*. Continúa con unos 40 m de conglomerados con cantos poco evolucionados alternando con margas arenosas rojizas. La figura 13 representa la columna litológica descrita en la margen derecha del embalse del Vinalopó.

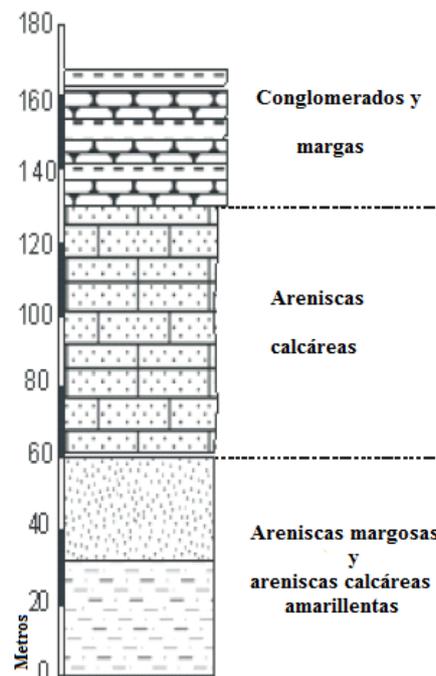


Figura 13. Columna litológica, margen derecha del embalse del Vinalopó.

En el sector norte, la Formación de las Ventanas posee una potencia total de unos 170 m. Sin embargo este espesor no es constante a todo lo largo de sus afloramientos así como su composición litológica, alimentada aquí de elementos terrígenos, aportados por la red fluvial que

da lugar a su medio de depósito, de tipo deltaico, previo a la sedimentación litoral de plataforma organodetrítica de todo el Tortoniense II.

En los proyectos de investigación y exploración de pizarras bituminosas llevados a cabo por el IGME en el año 1980, la Fm las Ventanas se describe en varios cortes geológicos, así por ejemplo, al norte del embalse de Crevillente está constituida por casi 100 m de areniscas amarillentas sin aparente ordenación interna, en bancos de 20 a 40 cm, con organismos fósiles abundantes y cementación variable, según los bancos.

Más al este, al sur de la ermita de Santa Ana, comienza con 200 m de calizas bioclásticas de color blanco o crema, con bancos constituidos exclusivamente por conchas de organismos, esencialmente ostreidos, estratificadas en niveles de 30 a 60 cm de espesor y karstificadas en superficie. A esos niveles le siguen más de 300 m de margas arenosas con restos carbonosos y de organismos limonitizados (Margas de Torremendo).

En la isla de Tabarca afloran las calcarenitas amarillentas que Calvet *et al.*, 1996, llamó Unidad de Tabarca y que por similitud de facies y posición estratigráfica se han asignado a la Unidad litológica de las Calizas de las Ventanas (Sáez Martínez *et al.*, 2008).

Para completar el conocimiento de esta interesante unidad se han realizado varios recorridos de campo y un sondeo mecánico con recuperación de testigo continuo.

En nuestras observaciones de campo, en el recorrido realizado en la carretera CV-873, que va desde Hondón de los Frailes hasta Albatera, se observa como sobre un paquete de margas blancas y grises, arcillosas y margocalizas limosas ocre con parches arrecifales, asignado al Serravalliense-Tortoniense I, se dispone la Formación de las Ventanas constituida, de muro a techo por los siguientes tramos:

A la base, 12 m de calcarenitas ocre, a continuación 4 m de conglomerado gris con cantos redondeados de tamaño de grano, en general, entre 2-3 cm. Seguidos de 1,5 m de conglomerado tipo brechoide. Y por último, aproximadamente 5 m de calcarenitas y calizas de aspecto grumoso, con estructuras cerebróides, belemnites y porites (nivel arrecifal). La figura 14 representa un esquema de la columna litológica de la Fm las Ventanas en la carretera CV-873.

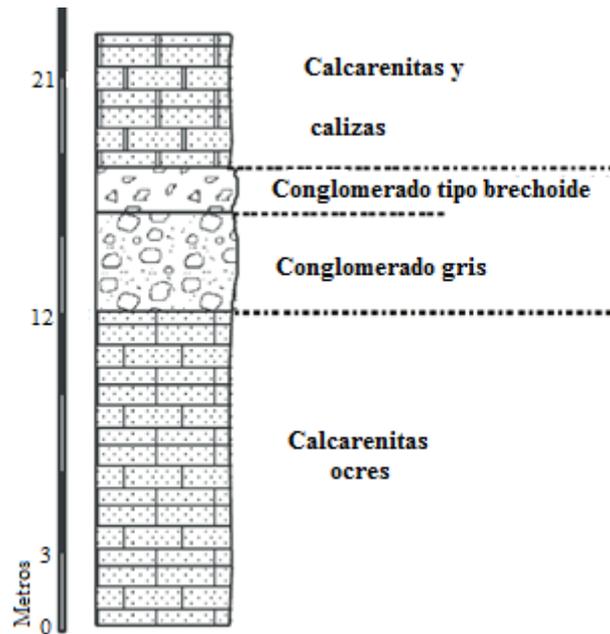


Figura 14. Columna litológica de la Formación las Ventanas en la carretera CV-873.

En el recorrido realizado en la carretera N-325 (de Aspe a Crevillente) la Formación las Ventanas presenta una mayor potencia aparente, si bien le hemos calculado un espesor real de casi 300 m teniendo en cuenta que en esta englobamos lo que Tent-Manclús (2003) divide en Unidad litológica de las Calizas de las Ventanas y la base de la Unidad litológica de Calcarenitas, arcillas y conglomerados, hasta los niveles de Margas de Torremendo, que constituyen los materiales sellantes del conjunto favorable como almacén.

La columna litológica de la Formación las Ventanas en la carretera N-325 (Fig. 15) es, de muro a techo la siguiente:

A la base, 50 m de calcarenitas masivas, mal estratificadas con niveles de conglomerados a la base. Cantos redondeados, heterométricos, granodecrecientes. Ciclos de 2-3 m de espesor de conglomerado y niveles de calcarenitas con grandes ostrácodos. Seguido de una alternancia de 150 m de calcarenitas y conglomerado blanco-gris-beige. Abundantes niveles lumaquéllicos, con ostrácodos, lamelibranquios, turritélidos y equinodermos. A continuación 100 m de alternancias de margas-arcillosas rojizas con niveles calcáreos y areniscosos y conglomerados-calcarenitas. A techo areniscas amarillentas (color albero).

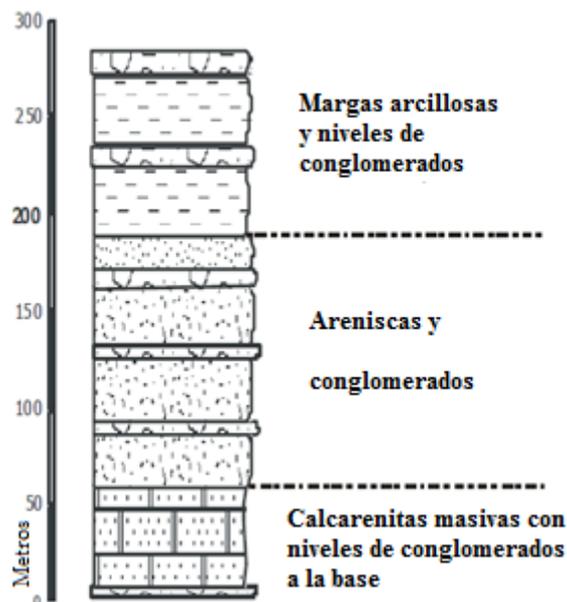


Figura 15. Columna litológica de la Formación las Ventanas en la carretera N-325.

En este recorrido se observa como la Formación de las Ventanas descansa en discordancia angular erosiva sobre niveles cretácicos constituidos por calizas abudinas en bancos de 15 a 20 cm con juntas margocarcillosas-arcillosas de 5 a 10 cm de espesor.

Por otro lado, en la margen derecha del embalse de Elche y sobre un conjunto caótico de calcarenitas, conglomerados, microconglomerados y margas, atribuido al Tortoniense I, la Formación las Ventanas se dispone con un espesor de casi 300 m, constituida hacia la base, de 150 m constituidos por alternancias de calcarenitas y conglomerados en niveles regulares bien estratificados, a veces alternan bancos de microconglomerados y areniscas de color ocre con finos niveles de cantos. A partir de unos estratos margo-arcilloso de color rojizo, que con mayor o menor espesor siempre se presentan hacia la mitad de la serie, en casi todos los recorridos de campo realizados, se dispone otra alternancia de calcarenitas y conglomerados rematados por calizas areniscosas crema sobre las que se disponen las Margas de Torremendo.

En recorridos de campo realizados en las proximidades de Bacarot observamos la alternancia de areniscas compactas y otras menos compactas, con unos 30 metros de potencia aparente. En una muestra tomada en afloramiento, en las coordenadas N 38° 19 '25'', W 0 ° 36 '15'' la porosidad abierta media obtenida en ensayos en laboratorio es de 21,9 % y una densidad aparente media de 2.080 kg/m<sup>3</sup>.

En la Sierra de Borbuño encontramos la Fm las Ventanas como areniscas de color albero, las cuales presentan muchos fósiles entre ellos ostras de gran tamaño, en muestras tomadas en

afloramiento, en las coordenadas N 38°19'07"; W 0°35'41", presentan una porosidad abierta media de 27,3% y una densidad aparente media de 1.975 kg/m<sup>3</sup>. En otras muestras tomadas al oeste de Sierra Gorda, en las coordenadas N 38°18'50", W 0°39'38", se encuentra la Fm las Ventanas, en las cuales el valor obtenido de porosidad media es de 29,6%, con una densidad aparente media de 1.901 kg/m<sup>3</sup>.

Por último, y dentro del proyecto "Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>" realizado por el IGME en el año 2009, se perforó un sondeo mecánico con recuperación de testigo continuo, en la localidad de Bacarot (Alicante), llamado de aquí en adelante sondeo Bacarot (SB), mediante el que pudimos estudiar las características de los niveles basales de las Margas de Torremendo y los bancos de techo de la Fm de las Ventanas, en una potencia aparente de casi 70 m.

La litología de estos estratos, de techo a muro, se representa en la figura 16.

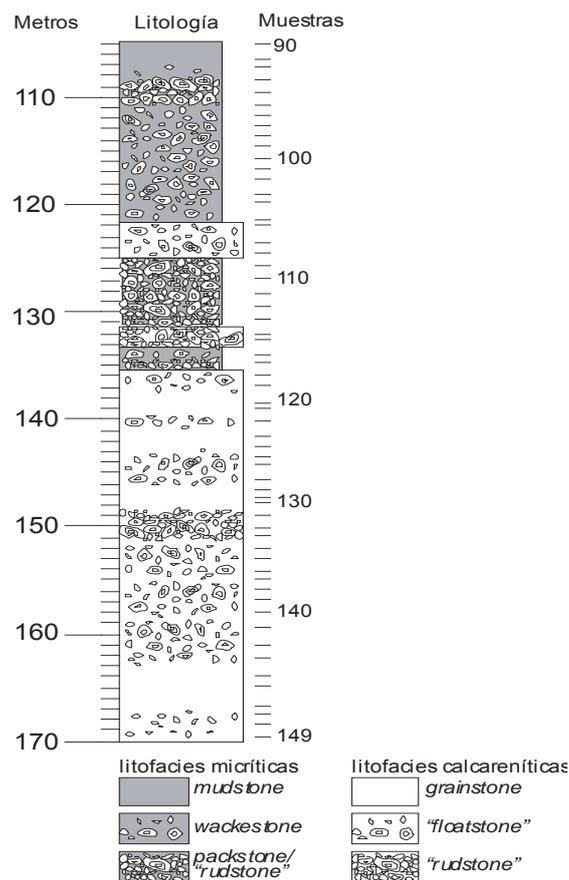


Figura 16. Esquema de la columna litológica de la Formación las Ventanas en el sondeo Bacarot.

La Fm las Ventanas, siguiendo las últimas aportaciones bioestratigráficas aportadas por Corbí, H. 2010, presenta su equivalente lateral en el sector sur de la cuenca en la denominada "secuencia de Pujálvarez" del sistema TII.

En investigaciones anteriores se había considerado la Fm las Ventanas como equivalente lateral de la Fm Columbares (en el sector sur) ya que sobre ambas reposa la Fm Torremendo, a partir de los últimos estudios bioestratigráficos realizados se planteó su independencia estratigráfica.

La Fm Columbares (sector sur de la cuenca) en la actualidad, es considerada equivalente lateral a la Formación de Conglomerados y Calcarenitas de la Raya del Búho, la cual está representada muy localmente al norte de Crevillente.

*Formación Torremendo. Mioceno superior (Tortonense II-Messiniense I) (37):* Aflora a lo largo del borde norte de la zona desde las estribaciones del Cerro de San Cayetano hasta el límite nororiental del sector, a modo de una banda más o menos continua, con algunas interrupciones, y de espesor variable.



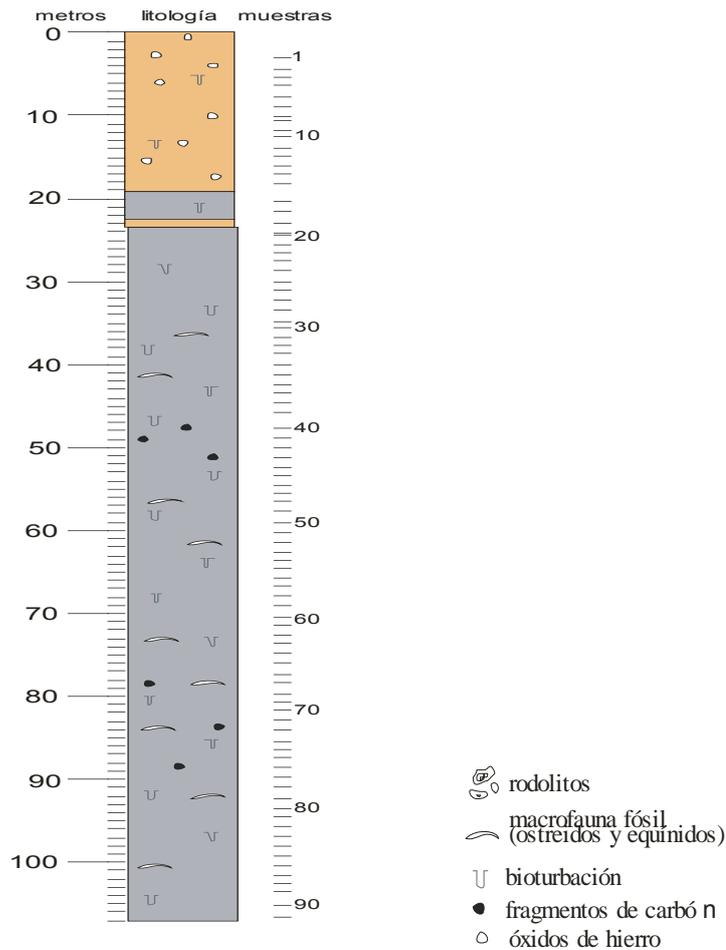
Figura 17. Afloramiento de la Formación Torremendo. Foto tomada en la localidad de Bacarot.

Se sitúan siempre en continuidad sobre las Ventanas, por ello las consideramos como el nivel guía que actuaría como sellante de los bancos carbonatados-detriticos, si estos se manifestaran favorables en extensión y características. Se trata de unas margas, unas veces arenosas y otras limosas con restos carbonosos y pirita, que intercalan niveles margocalizos.

En afloramiento (Fig. 17) no presentan buenas condiciones de observación ya que ocupan las depresiones que suceden inmediatamente a los resaltes provocados por los niveles más competentes de la Formación de las Ventanas, sin embargo pueden verse intercalaciones de

niveles margocalizos y detríticos, sobre todo areniscosos, tanto en vertical, donde se hacen más frecuentes a techo, como en horizontal.

El sondeo Bacarot ha permitido reconocer con detalle los casi 100 m de muro de este conjunto de las Margas de Torremendo (Fig. 18) así como algunas de sus características hidrogeológicas y petrofísicas más importantes. De esta manera la descripción detallada de este paquete es la siguiente, de techo a muro:



■ Marga gris.

■ Marga beige con óxidos de Fe.

Figura 18. Columna litológica de la base de las Margas de Torremendo en el sondeo Bacarot.

Conviene destacar que este conjunto puede alcanzar una potencia superior a los 800 m en las proximidades de la población de Torremendo.

*Conjunto calcáreo-detrítico-arrecifal de la Formación de la Virgen. Messiniense I (38):* Sobre las Margas de Torremendo (Montenat, 1977) y, en sustitución, en el borde norte, de un tramo evaporítico, se deposita de forma discordante un paquete de areniscas calcáreas.

Al igual que la Fm las Ventanas, este conjunto posee una gran continuidad lateral en el borde septentrional de la zona de estudio, aflorando desde el embalse de Crevillente hasta el límite oriental del sector investigado.

En general aparece como una banda estrecha y continua excepto entre los embalses de Crevillente y de Elche, en donde su espesor aparente es mucho mayor, debido, en esa zona, a una mayor influencia de aportes terrígenos provocados por la acción de un episodio deltaico submarino.

Este conjunto, al que consideramos también como de interés para posible almacén de CO<sub>2</sub> posee las características esenciales siguientes: color en general, amarillento, bancos de potencia decimétrica con profusión de estructuras sedimentarias primarias sobre todo laminaciones paralelas y cruzadas y estructuras de bioturbación, niveles arrecifales. La potencia media de este paquete es de 40 a 50 m.

Los recorridos de campo efectuados en el borde norte ponen de manifiesto las series que a continuación se describen.

Entre los embalses de Crevillente y Elche, en la carretera N-325, en dirección a la antena de televisión de RNE y sobre un delgado paquete de Margas de Torremendo que no supera, en este sector los 60 m de potencia, se disponen, de muro a techo:

A la base, calizas blancas con niveles lumaquélicos de ostrácodos, calizas areniscosas con ostrácodos y areniscas beige-marrón oquerosas y a continuación un nivel de calcarenitas tableadas con abundantes fósiles. Seguidamente se encuentran areniscas masivas, un nivel margoso-limoso, calizas con abundantes fósiles y calizas blancas. Un nivel margo-limoso ocre-pardo, calcarenitas, calizas grises y margas con cristales de yeso diseminados y niveles limo-areniscosos. Por encima se sitúan las calcarenitas y conglomerados, con grandes ostrácodos, presentan aspecto ruinoso y abundantes fósiles y corales.

La potencia total, del conjunto denominado Formación la Virgen es de unos 20 m (Fig. 19).

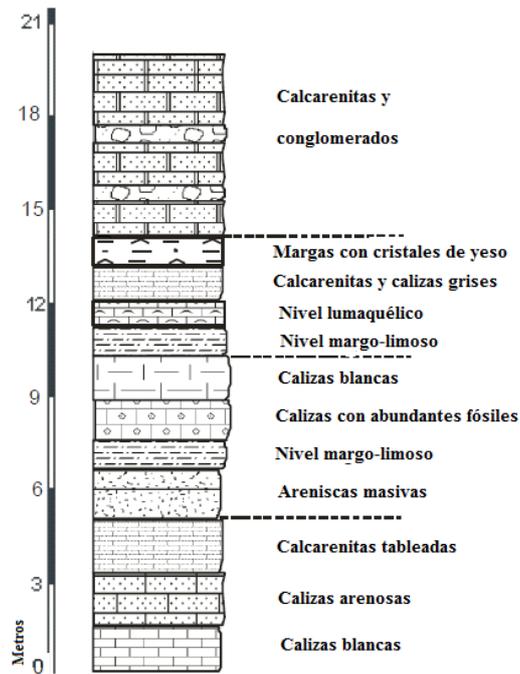


Figura 19. Columna litológica de la Formación la Virgen en la carretera N-325.

En la margen derecha del embalse de Elche, la serie que puede observarse es, de muro a techo, la siguiente:

-Calcarenitas poco cementadas con niveles margo-calizo intercalados y bancos endurecidos de color oscuro y otros más blandos de color amarillento. Restos de thalasinoides.

-Calcarenitas, calizas gris-crema de aspecto grumoso con abundantes fósiles. Arrecifal.

-Margocaliza limo-arenosa.

-Calcarenitas bien estratificadas en bancos de 10-20 cm estratodecrecientes con niveles de cantos (conglomerados) y color amarillento.

Aquí la serie aflorante alcanza una potencia superior a los 80 m (Fig. 20).

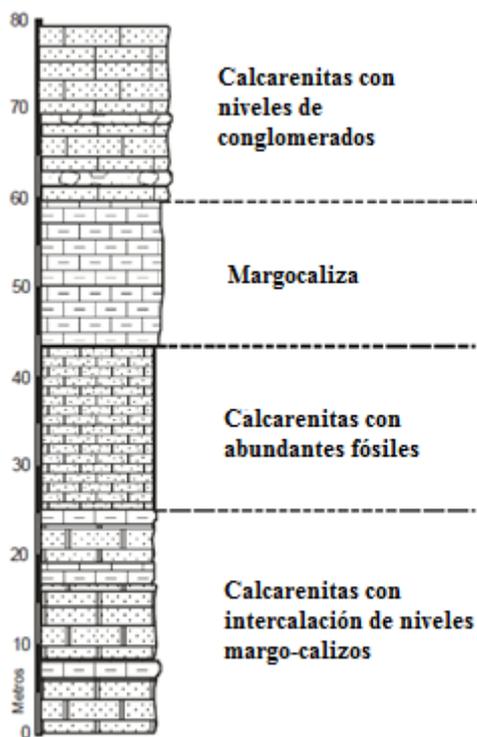


Figura 20. Columna litológica de la Formación la Virgen en la margen derecha del embalse de Elche.

Por último, en la parte oriental, al norte de Torrellano y en proximidad al punto en donde se efectuó el sondeo Bacarot, sobre las Margas de Torremendo se dispone la serie (Fig. 21), de muro a techo, siguiente:

En la base, 0 a 10 metros aproximadamente: calcarenitas amarillentas, calizas areniscosas-areniscas en bancos de 50 a 60 cm y calizas blancas con aspecto grumoso y numerosos fósiles (arrecifales).

De 10 a 20 m: Caliza gris, calizas amarillentas, calizas blancas grumosas (arrecifales) y calcarenitas-calizas crema-amarillentas.

De 20 a 30 m: Calizas blancas grumosas, margas y margocalizas, niveles calizo-silíceos pardos, margas con cristales de yeso diseminados y calizas blancas grumosas.

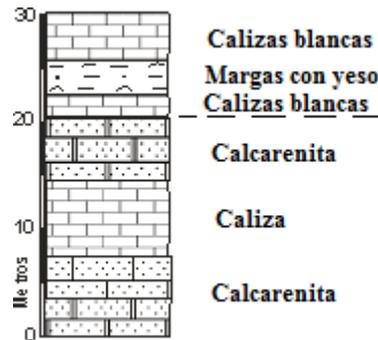


Figura 21. Columna litológica de la Formación la Virgen. Al norte de Torrellano.

Estos niveles se consideran, al igual que la Fm las Ventanas, como de interés para posible almacén de  $\text{CO}_2$ , por su potencia, extensión y continuidad, ya que son depositados en un medio de plataforma marina somera con crecimientos arrecifales, y por poseer características petrofísicas e hidrogeológicas adecuadas, al menos en cuanto a porosidad y permeabilidad. Asimismo sobre ellos se depositan unos niveles regresivos, de carácter continental, constituidos por margas verdosas, grises o rosas con intercalaciones de areniscas poco cementadas y asociadas a episodios de calizas lacustres blancas nodulosas (Montenat, 1977), que pueden ejercer de sello inmediato de los niveles carbonatados-detríticos considerados como almacén.

En las muestras tomadas de las Calizas de la Virgen en el sector norte de la zona de estudio, cercanas al sondeo SB, los resultados obtenidos de porosidad abierta media son de 23,5% y 25,7%, con una densidad aparente media de  $2.045 \text{ kg/m}^3$  y  $2.018 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente. El primer valor corresponde a las calizas más duras y el segundo valor a las que tienen un aspecto más pulverulento, las coordenadas donde fueron recogidas las muestras son: N  $38^\circ 18' 36''$ , W  $0^\circ 35' 59''$ .

En el sector sur el equivalente a la Fm la Virgen aflora al sur de Bnejúzar, se presentan tramos de yeso fibroso (38y), denominado Formación San Miguel formado por grandes conjuntos de yeso que crecen formando puntas de flecha, sobre estos hay una margas limosas horizontales, bien estratificadas en bancos centimétricos con cristales de yeso y las fisuras están rellenas de yeso.

*Calcarenitas, arcillas y conglomerados. Messiniense II (40):* Sobre las Margas de Torremendo y la Fm de las Calizas de la Virgen, hacia el oeste, se desarrolla este conjunto. Se trata de conglomerados anaranjados, calizas grises, margas blancas y calcarenitas.

En la carretera de Hondón de los Frailes a Albaterra se puede observar más de 30 m de conglomerados con cantos carbonatados seguidos de unos 60 m de margas blancas a las que se le superponen otros 100 m de margas y conglomerados rojizos denunciando ya una sedimentación continental, del Mioceno terminal.

Montenat (1977) describe niveles regresivos continentales, análogos a las denominadas Margas con Ostras, definidas en la provincia de Murcia, clausurando la sedimentación miocena.

*Margas con yesos. Lacustres. Messiniense (41):* Estrecha banda aflorando al sur de la Sierra de Abanilla.

*Margas azules y blancas. Localmente limos, arenas, diatomitas y sílex. Cuenca. Messiniense superior-Plioceno Inferior (42):* Aflora con bastante extensión en el sector sur de la zona de estudio, en contacto con las areniscas calcáreas, arenas, limos amarillos y margas (44).

*Gravas, arenas y limos. Localmente margas. Abanicos deltaicos (43):* Aflora al norte del embalse de la Pedrera y se extiende hacia el O.

*Areniscas calcáreas, arenas, limos amarillos y margas. Plioceno inferior (44):* Aflorando al oeste de La Marina y en el sector sur con bastante extensión desde el embalse de la Pedrera hasta Guardamar del Segura.

En la tabla 4 se sintetiza la columna litoestratigráfica neógena.

NEÓGENO	Plioceno	Zancleense	42. Margas azules. Cuenca	44. Areniscas calcáreas, arenas, limos amarillos y margas. Litoral. 43. Gravas, arenas y limos. Abanicos deltaicos	
	Mioceno	Messiniense		41. Margas con yesos. 40. Unidad de calcarenitas, arcillas y conglomerados 38y. Yesos de la Formación San Miguel, equivalente lateral del conjunto calcáreo detrítico (38). 38, 38s. Conjunto calcáreo detrítico evaporítico.	
				37. Margas de Torremendo	
		Tortonense	36. Conjunto calcáreo detrítico. 35. Margas blancas 34. Calizas 33. Conglomerados y areniscas 32. Calcarenitas y biocalcarenitas 31. Margas blancas y limos rosas de algas		
	Serravaliense		29. Margas blancas con intercalaciones de areniscas y calizas. 28. Calcarenitas y calizas bioclásticas.	30. Areniscas bioclásticas	
	Langhiense				
	Burdigaliense	27. Margas arenosas y margas blancas 26. Calizas bioclásticas y margas 25. Margas y margas calcáreas.			
	Aquitaniense				

Tabla 4. Columna litoestratigráfica del Neógeno.

#### 2.1.4. Plioceno II-Cuaternario

La base de todo este sistema, denominado aquí, Plioceno II-Cuaternario lo constituye un tramo de areniscas calcáreas, arenas, limos amarillos y margas, típico de depósitos litorales y asignado al Plioceno en general, aunque normalmente se dispone sobre materiales del Plioceno inferior y Messiniense superior, especialmente de las margas azules y blancas.

Aflora al sur de la zona de estudio desde El Pinet, al este, y hasta el límite occidental cerca de Torrevieja y Punta Prima.

La potencia de este tramo oscila entre los 20 y 100 m.

Sobre él y desarrollándose a lo largo de todo el Plioceno y hasta la parte basal del Pleistoceno se deposita un conjunto constituido por conglomerados, arenas, limos y margas con gasterópodos, depositado en un ambiente continental, fluviolacustre, abarcando gran parte del Plioceno e incluso la base del Pleistoceno.

Por encima de este conjunto detrítico-margoso se sitúan unas margas blancas, arenas micáceas y arcillas rosadas. En afloramiento presentan un espesor máximo de unos 20 a 30 m, sin embargo, como se describirá más adelante, según datos de sondeos, alcanzan gran desarrollo presentando numerosos cristales de yeso. Estas margas blancas se sitúan en el Pleistoceno basal. Sobre estos materiales se encuentra la denominada por Montenat (1977) "costra de Sucina" por medio de una discordancia angular y erosiva.

Esta "costra" superpuesta indistintamente sobre materiales pliocenos o messinienses, está formada por arcillas y limos rojos a la base coronados por caliches y costras carbonatadas englobando una serie de elementos a modo de brecha. La potencia de este tramo no supera los 20 m de los que 1 m corresponde al caliche superior. Se le asigna una edad genérica de Pliocuaternario.

Por encima de la "costra de Sucina" se ubican todos los términos del Holoceno medio discordantes sobre cualquier material anterior. Litológicamente se trata de arcillas, limos, arenas y conglomerados, que se disponen en forma de diferentes depósitos: glaciares, conos de deyección, terrazas fluviales, dunas y playas fundamentalmente. Todos ellos ocupan la amplia llanura que se desarrolla desde el borde norte de la zona hasta la línea de costa, con la salvedad de los afloramientos neógenos de Benejúzar, Benijofar-Guardamar del Segura, La Marina y Santa Pola.

Según los afloramientos, el conjunto Plioceno II-Cuaternario, posee una potencia mínima comprendida entre los 100 y 200 m.

*Margas azules .Cuenca. Plioceno medio-Pleistoceno inferior (45). Calcarenitas, arenas y limos amarillos (46). Arcillas rojas, arenas y conglomerados. Abanicos aluviales Plioceno II (47):* En el sector norte, la serie neógena culmina en la zona proximal de la cuenca con margas blancas. Según Tent-Manclús (2003) la base de este tramo corresponde a una superficie erosiva que muestra un marcado paleorelieve y que según Soria *et al.* (2002) corresponde a una caída del nivel del mar ligado a la crisis de salinidad del Messiniense.

A las margas le sucede un conjunto de calcarenitas amarillentas, arenas y limos, como resultados de la apertura del estrecho de Gibraltar que dio fin a la crisis de salinidad del Messiniense (Tent-Manclús, 2003).

Por último se deposita un paquete caracterizado por el desarrollo de facies continentales. Se trata de calizas lacustres en la base que hacia techo pasan a arcillas rojas con paleosuelos en las que se intercalan canales y lóbulos conglomeráticos (Soria *et al.*, 2002). Montenat, 1977 incluyó estos materiales en la denominada Formación Sucina.

Los niveles de margas blancas y azuladas así como calcareníticas amarillentas afloran a modo de una banda con mayor o menor potencia aparente a todo lo largo del borde desde el límite occidental de la zona hasta el oriental. Asimismo al norte y noreste de Santa Pola en donde la línea de costa dibuja un trazado en forma de rodilla.

Dentro del Plioceno II-Cuaternario también diferenciamos los materiales siguientes en la zona de estudio:

*Conglomerados, arenas, limos y margas con gasterópodos. Fluvial y fluvio lacustre. Fm Montesinos. Plioceno y parte basal del Pleistoceno (48).*

*Conglomerados. Canales fluviales (49).*

*Margas blancas, arenas micáceas y arcillas rosadas con suelos hidromorfos. Con lagunas. Pleistoceno basal (50).*

*Abanicos aluviales-Pleistoceno-holoceno (a).*

*Caliches y costras carbonatadas. Coluviales y aluviales. Holoceno basal y medio (c).*

*Dunas activas (punteado verde) y dunas fósiles (punteado rojo) (d)*

La tabla 5 muestra la columna litoestratigráfica de los materiales del Plioceno II-Cuaternario en la zona de estudio.

CUATERNARIO	Holoceno	(Actual)	a. Abanicos aluviales	c. Caliches y costras carbonatadas. Coluviales y aluviales d. Dunas activas y dunas fósiles.
	Pleistoceno	Calabriense		50. Margas blancas, arenas micáceas y arcillas
		Gelasiense	48. Conglomerados, arenas, limos y margas	49. Conglomerados
NEÓGENO	Plioceno	Piacenziense	45. Margas azules. Cuenca	46. Calcarenitas, arenas, limos. 47. Arcillas rojas, arenas y conglomerados

Tabla 5. Columna litoestratigráfica del Plioceno II-Cuaternario.

Las unidades, formaciones o tramos anteriormente descritos se ilustran en el mapa del Anexo I.

## 2.2. Discontinuidades

Ya se ha expuesto en el capítulo 1.7.2 las unidades diferenciadas en el neógeno de la cuenca según los diversos autores. En general, las distintas diferenciaciones no poseen grandes controversias ya que en las discontinuidades mayores que individualizan las unidades aloestratigráficas, UTS o subgrupos son prácticamente coincidentes.

En la tabla 6 se indica una síntesis sobre el estudio litoestratigráfico de la Cuenca del Bajo Segura, comparando las diferentes unidades que se describen en la bibliografía más destacable de la zona de estudio.

	Geología del Subsuelo. Hispanoil (1974)	IGME (1982)	Montenat (1990)	ENAGAS-ITGE (1992)	Alfaro (1995)	Soria (2008)	GESSAL (2004)	Vera (2004)	Corbí (2010)
Unidad 1	<b>Tortoniense Inf.</b> Conglomerado de base de la Cresta del Gallo.	<b>Infraserravaliense.</b> Areniscas margosas (amarillentas), bien estratificadas, con intercalaciones conglomeráticas de cantos poligénicos y heteromorfos, incluyen restos de erizos y conchas de moluscos. Potencia: 200m.	<b>Tortoniense I</b> Conglomerados de la Cresta del Gallo. Areniscas Rojas Inferiores. Margas y Areniscas de la Atalaya.	<b>Langhiense-Serravaliense.</b> Nivel conglomerático basal, granodreciente, que evoluciona hacia sedientos lutítico-arenosos. (Sobre los materiales Alpujarrides, al N de Torreveja).	<b>MS-I (Tortoniense inferior)</b> En el borde sur descansa discordante sobre depósitos del Mioceno Medio o sobre materiales alpujarrides, mientras que, en el borde norte, se apoyan sobre materiales mesozoicos o terciarios. Incluye en esta unidad genética la parte inferior de las Margas y Areniscas de La Atalaya (en el sector meridional) y las calizas del Tabayal (en el sector septentrional).	<b>TI (Tortoniense)</b> Fm Los Garres y Relejero. Formación Paredón. Formación Atalaya.  Discontinuidad intra-Tortoniense	<b>Burdigaliense terminal-Langiense-Serravaliense.</b> Formación: 'El Relejero'	<b>Tortoniense:</b> La sedimentación, en contexto de nivel del mar en ascenso, genera megasecuencias de profundización y patrones de apilamiento de estratos retrogradantes. En la Cuenca del Bajo Segura, la megasecuencia comienza con depósitos deltaicos que evolucionan a talud turbidítico y terminan con materiales de cuenca pelágica.	<b>Sistema T-I</b> Conjunto litológico de carácter margoso que reposa sobre una unidad carbonática inferior. Conglomerados de la Cresta del Gallo. Margas y areniscas de la Atalaya.
Unidad 2	<b>Tortoniense Inf.</b> Series margo areniscosas en diversos paquetes. Frecuente nivel calcáreo-detritico. Facies costeras que evolucionan a Margas de la Atalaya. Episodio evaporítico de yeso.	<b>Serravaliense-Tortoniense I.</b> De muro a techo: -Margas de El Relejero: Margas grisáceas. -Conglomerados de El Relejero: Concordantes sobre el tramo anterior. - Formación Cresta del Gallo: Del tramo anterior se pasa a una sucesión más areniscosa. -Formación Margas de la Atalaya	<b>Tortoniense II</b> Separado del anterior por el evento intratortoniense.  Serie margosa con niveles de areniscas. Hacia el techo se hacen más carbonatadas	<b>Serravaliense-Tortoniense inferior.</b> Margas y areniscas con cambios laterales. Su espesor es de unos 600 m en Torreveja. (Sobre los materiales Alpujarrides, al N de Torreveja).	<b>MS-II (Tortoniense superior)</b> Discordante sobre la unidad genética inferior o sobre un basamento de edad Mesozoico o Terciario. En el borde sur de la cuenca, esta unidad engloba la parte superior de la Formación Margas y Areniscas de La Atalaya, la Fm margas de Pujálvarez y la Fm areniscas de Columbares. En el borde norte incluye un tramo superior detritico-carbonatado equivalente a la Fm Columbares.	<b>TII (Tortoniense)</b> Sector sur: Fm Atalaya. Fm. Columbares y Fm. Pujálvarez.  Discontinuidad fini-Tortoniense	<b>Serravaliense Superior.</b> Formaciones: ''Atalaya'' ''Cresta del Gallo''	<b>Tortoniense:</b> Separada de la anterior por el evento intratortoniense 1. Equivale a la unidad Tortoniense II de Montenat. Está representada por megasecuencias que comprenden, de base a techo, depósitos de cuenca pelágica, talud y plataforma o deltas de arrecifes de coral.	<b>Sistema T-II</b> Separado del anterior por la discontinuidad intra-Tortoniense. En el sector norte: Formación Margas de Les-Morerres. Formación Conglomerados de la Raya del Búho. Margas de la Galería de los Suizos. Calizas de las Ventanas. En el sector sur: Formación Columbares y Formación Pujálvarez.
Unidad 3	<b>Tortoniense Sup-Messi.</b> Discordante sobre el anterior. Margo-limolítico en las cubetas. Arenosos o calcáreo.	<b>TortonienseII- Messiniense I.</b> -Margas de la Guardia Civil: Secuencia margo-arenosa. Comienza con niveles de calcarenitas con restos de equinidos, algas, etc. -Margas de Torremendo: Paquete margoso, margas arenosas y limosas con restos carbonosos y pirita que intercalan niveles margocalizos.	<b>Tortoniense -Messiniense</b> Conglomerados, areniscas y margas. Corresponde lateralmente a los Conglomerados de Murcia. Formación Calizas de la Virgen. Formación Margas de Torremendo	<b>Tortoniense Superior.</b> Discordante sobre la unidad anterior. Es de composición arenosa, margosa o calcárea. Su potencia varía entre 100 y 800 m. Se detecta en los sondeos Benejúzar, La Mata y Rojales.	<b>MS-III (Tortoniense terminal - Messiniense)</b> En el borde sur de la cuenca está constituida por la Fm Torremendo, la Fm Calizas de la Virgen y la Fm Margas con Ostras. Entre Albaterra y Crevillente está constituida por conglomerados y lutitas aluviales.	<b>T-MI (Tortoniense sup.-Messiniense)</b> Formación Torremendo  Discontinuidad intra-Messiniense	<b>Tortoniense Inferior (Tortoniense I).</b> Formaciones: ''Columbares'' ''Puerto Cadena'' ''La Guardia Civil''	<b>Tortoniense:</b> Su límite inferior coincide con el evento intratortoniense 2. El principal efecto de este evento es una caída rápida del nivel del mar. Los sedimentos someros son de litología y ambiente sedimentario variado.	<b>Sistema T-MI</b> Separado del subyacente por la discontinuidad fini-Tortoniense. Sector norte: Formación Calizas de la Virgen. Margas de Torremendo Sector sur: Calizas de la Virgen. Margas de Torremendo.
Unidad 4	<b>Mioceno Terminal-Plioceno</b> Facies margosas, salvo eventuales términos más detriticos de base. Finaliza en Murcia por un amplio episodio evaporítico, inobservable en Almería.	<b>Messiniense II- Plioceno I.</b> Paquete de areniscas calcáreas que se instala sobre la discordancia intramessiniense. Bajo ellas se pueden situar unas arcillas rojas poco potentes. Hacia el W pasan a Margas algo limosas con ostreidos ''Margas con Ostras (Montenat)''	<b>Plioceno I</b> Sistema de margas pelágicas. Formación Hurchillo	<b>Messiniense.</b> Paraconcordante con el anterior. Formado por margas con anhidritas de espesor variable entre 160 y 1200 m.	<b>P (Plioceno inferior)</b> Su techo corresponde a una discordancia sobre la que se apoya la unidad P-Q, su base, a una discontinuidad ligada a la transgresión pliocena. Incluye las formaciones denominadas por Montenat como: margas de Hurchillo, areniscas de Rojales, margas versicolores, calizas de San Pedro, Sucina, conglomerados del Segura y areniscas de Guardamar.	<b>MII (Messiniense)</b> Fm San Miguel, y La Virgen.  Discontinuidad fini-Messiniense	<b>Tortoniense Superior</b> Formaciones: ''Torremendo'' ''Los Cárceles''	<b>Tortoniense terminal-Messiniense:</b> Cuyo límite inferior está marcado por el evento finitortoniense. En el caso de la Cuenca en la que existe sedimentación marina, la orla marginal aluvial evoluciona hacia deltas, y estos a plataforma con arrecifes de coral y cuenca pelágica.	<b>Sistema M-II</b> Separado del anterior por la discontinuidad intra-Messiniense. Sector norte: Compuesto por cinco sistemas de depósito, presenta características similares al infrayacente. Sector sur: Presenta menor diversidad de sistemas de depósito, sólo se diferencian dos. Margas con Ostras y Fm Garruchal. Y el otro sistema: Fm Yesos de San Miguel
Unidad 5	<b>Plioceno- Cuaternario</b> Formaciones areniscosas o carbonatadas (	<b>Plioceno II- Cuaternario.</b> La base la constituye un paquete de areniscas y calcarenitas. Por encima de estas areniscas, margas blandas, hacia el E presentan numerosos cristales de yeso. Hacia techo se hacen más arcillosas. Sobre estos materiales se sitúa la Costra de Sucina (Montenat), formado por arcillas y limos rojos.	<b>Plioceno II.</b> Formación Areniscas de Rojales	<b>Plioceno- Pliocuaternario.</b> Constituido por sedimentos a borde de cuenca, arenosos o carbonatos y margo-yesíferos. Discordante sobre la unidad anterior.	<b>P-Q (Plioceno superior-Quaternario)</b> Se apoya discordante sobre el resto de unidades neógenas y sobre un basamento muy variado. A partir de dataciones absolutas, magnetoestratigráficas y paleontológicas, se atribuye al Plioceno-Cuaternario.	<b>P</b> Fm. Hurchillo, Rojales y Montesinos.	<b>Messiniense.</b> Formación: Venta La Virgen	<b>Plioceno:</b> Tras la inundación marina de la base del Plioceno los paleovalles erosivos de la segunda fase de la crisis de salinidad Messiniense se rellenan de sedimentos pelágicos. Estos sedimentos pelágicos evolucionan en la vertical hacia depósitos de plataforma y costeros, y estos últimos a materiales continentales de carácter aluvial.	<b>Sistema P</b> Separado del anterior por la discontinuidad fini-Messiniense. Sector norte: Fm. Margas de Hurchillo. Areniscas de Rojales. Sector sur: Fm. Margas de Hurchillo. Fm. Areniscas de Rojales
Unidad 6			<b>Plio-Cuaternario</b> Sistema de arcillas y conglomerados. Formación Margas y Areniscas versicolores. Fm Conglomerados del Segura.				<b>Messiniense terminal-Plioceno</b> Formaciones: ''El Espartal'' ''Loma Tercia''	<b>Plioceno superior - Pleistoceno:</b> Se puede separar del anterior por el reconocimiento del evento intraplioceno, y la formación de nuevas estructuras en régimen compresivo. La generación de nuevas estructuras tectónicas, como la fallas del Bajo Segura, da lugar a la compartimentación de la cuenca.	

Tabla 6. Síntesis de las unidades litoestratigráficas de la Cuenca del Bajo Segura.

En este trabajo se van a seguir las directrices marcadas, en cuanto a la columna litoestratigráfica en las recientes publicaciones de Soria, J. y las nuevas aportaciones bioestratigráficas aportadas por Corbí, 2010.

En las figuras 4 y 5 se muestran los mapas geológicos simplificados, así como la organización estratigráfica diferenciada para los dos sectores.

De esta manera, en el **sector norte** el relleno sedimentario de la cuenca abarca temporalmente desde el Tortoniense al Plioceno y está compuesto por cinco unidades aloestratigráficas (II, III, T-MI, MII y P), separadas por las discontinuidades que a continuación se denominan:

Discontinuidad intra-Tortoniense

Discontinuidad fini-Tortoniense

Discontinuidad intra-Messiniense

Discontinuidad fini-Messiniense

**T-I:** Está representado por un conjunto litológico de carácter margoso que reposa en concordancia o discordancia sobre una unidad carbonática inferior. Esta unidad inferior ha recibido diferentes denominaciones así en Montenat 1977 y 1990 se define como “Formación de Calizas del Tabayal”.

El conjunto margoso está representado por una sucesión de margas ricas en organismos planctónicos cuyo espesor máximo (en torno a 150 metros) se alcanza en el afloramiento de Margas Les Moreres; en otros puntos se encuentra con menor espesor, como en el caso del afloramiento de Albaterra (Soria *et al.*, 2001).

**T-II:** Está separado del anterior por la discontinuidad intra-Tortoniense, es equivalente al Tortoniense II de diferentes autores, su edad está establecida como Tortoniense. Según Tent-Manclús (2003) esta discontinuidad se localizaría dentro de la Formación Margas de Les Moreres, la Formación Conglomerados y Calcarenitas de la Raya del Búho, las Margas de La Galería de los Suizos y las Calizas de las Ventanas.

**T-MI:** Separado del subyacente por la discontinuidad fini-Tortoniense. La edad de la mayor parte es asignado al Messiniense, si bien su parte basal correspondería al Tortoniense. En él se pueden separar cuatro sistemas de depósito, según Soria *et al.*, 2001, que presenta lutitas rojas (limos y

arcillas) con intercalaciones de conglomerados y areniscas. Asimismo se intercalan bancos de conglomerados con geometrías canalizadas y lobulares, el siguiente sistema corresponde a margas y arcillas con fósiles de ostreidos y de roedores, además de calizas margosas con gasterópodos y ostrácodos, el siguiente corresponde a la Fm Calizas de la Virgen de Montenat (1977); formado por dos asociaciones diferentes i) areniscas calcáreas con fósiles de pectínidos, ostreidos, serpúlidos y localmente trazas fósiles de thalassinoides, ii) calizas arrecifales de coral (*Porites* y *tarbellastrea*). El último sistema equivale a la Fm Margas de Torremendo de Montenat (1977), formado por una sucesión de margas ricas en fósiles planctónicos entre las que se intercalan frecuentes bancos de tempestivas y/o turbiditas arenosas.

**MII:** Asignado al Messiniense, reposa sobre la discontinuidad intra-Messiniense. Está compuesto por varios sistemas de depósito equivalentes a: lutitas rojas con intercalaciones de conglomerados y areniscas; calizas y calizas margosas con fósiles de gasterópodos y bioturbación por raíces de gran tamaño; lutitas con paleosuelos hidromórficos con intercalaciones de margocalizas con fósiles de roedores y amplios canales rellenos de gravas y arenas; margas rojas y grises con intercalaciones de calizas masivas micríticas y puntualmente canales rellenos de gravas y arenas, y el último se encuentra representado por tres asociaciones de facies diferentes: margas calcáreas marinas con bivalvos, calizas estromatolíticas y areniscas y calcarenitas oolíticas con frecuentes ripples de oleaje.

**P:** La edad establecida mediante foraminíferos planctónicos es de Plioceno inferior tardío (Montenat *et al.*, 1990). Se encuentra separado del anterior por una superficie erosiva denominada discontinuidad fini-Messiniense. Está formado por cuatro sistemas de depósito que se suceden de forma continua en la vertical (P0, P1, P2 y P3). El sistema P0 está formado por cantos calizos y oncolitos, incluidos en una matriz arenosa con fragmentos de ostreidos y pectínidos. El sistema P1 corresponde a la Formación Margas de Hurchillo de Montenat, representado por una sucesión de margas homogéneas ricas en fósiles planctónicos. El sistema P2 es equivalente a la Fm Areniscas de Rojas de Montenat (1977). Por último, el sistema P3 ha sido denominado como Formación Margas y Areniscas versicolores (Montenat *et al.*, 1990) constituido por dos conjuntos litológicos: margas y calizas con gasterópodos de agua dulce y lutitas rojas con intercalaciones de canales de gravas.

En el **sector sur** podemos distinguir cinco unidades aloestratigráficas (TI, TII, T-MI, MII y P) cuyas discontinuidades limitantes se reconocen en toda la extensión de la cuenca, denominadas:

Discontinuidad intra-Tortonense

Discontinuidad fini-Tortonense

Discontinuidad intra-Messiniense

Discontinuidad fini-Messiniense

**T-I:** Asignado al Tortonense por Montenat *et al.*, 1990, se encuentra representado por cuatro sistemas de depósito, el primero recibe el nombre de Conglomerados de la Cresta del Gallo por Montenat *et al.*, 1990, dominado por brechas y conglomerados rojos. El siguiente sistema litológicamente está compuesto de areniscas con pasadas conglomeráticas que se interpretan como depósitos turbidíticos, se denomina "Areniscas rojas de transición"; el siguiente corresponde a las "Areniscas rojas inferiores" de Montenat *et al.*, 1990 que se divide en la parte inferior y la superior.

Y el sistema equivalente a las Margas y Areniscas de la Atalaya de Montenat *et al.*, 1990, formado por margas predominantemente.

**T-II:** La edad fue precisada como Tortonense, se encuentra superpuesto sobre la discontinuidad intra-Tortonense, formado por varios sistemas de depósito que son agrupados en megasecuencias. La primera megasecuencia: Formación Columbares de Soria *et al.*, 2001, dominado por margas típicas de cuenca pelágica en la base y a techo por areniscas y conglomerados marinos someros y deltaicos. La segunda megasecuencia se denomina Formación Pujálvarez de Soria *et al.*, 2001, está formada por margas pelágicas con intercalaciones de tempestitas arenosas a la base, y un sistema de constitución arenosa y carácter marino somero a techo.

**T-MI:** Incluido dentro del Messiniense en su mayor parte, salvo la parte inferior que corresponde al Tortonense terminal. Separado por la discontinuidad fini-Tortonense. La base del sistema la constituyen las margas con turbiditas (Margas de Torremendo). Se encuentra el sistema deposicional que corresponde a las Calizas de la Virgen (Montenat, 1977), dominado por areniscas calcáreas con bioconstrucciones arrecifales coralinas locales y el sistema denominado Margas de Torremendo, formado por margas ricas en fósiles planctónicos, en las que se intercalan niveles de areniscas turbidíticas

**M-II:** Asignado a la parte alta del Messiniense, se diferencian dos sistemas de depósito, el denominado como Formación Margas con Ostras por Montenat, 1977 y como Fm Garruchal (Soria *et al.*, 1990), constituido por margas grises y rojas con ostreidos. Otro sistema de depósito corresponde a la Fm Yesos de San Miguel de Montenat *et al.*, 1990, formado por bancos de yeso selenítico de espesor variables intercalados en margas arenosas laminadas con fósiles planctónicos. La Fm la Virgen es el equivalente lateral de los Yesos de San Miguel.

**P:** Asignado al Plioceno inferior por Montenat *et al.*, 1990. Separado por la discontinuidad finimessiniense, está compuesto por cuatro sistemas de depósito al igual que en el sector norte. El sistema P0, equivalente a la Fm de olistolitos de Montenat 1990, el sistema P1, denominado como Fm Margas de Hurchillo. El sistema P2 compuesto por la Fm Areniscas de Rojas y por último el sistema P3 compuesto por la Fm Arenas y Margas versicolores.

## **CAPÍTULO 3**

### **TECTÓNICA**

---

### 3.1. Antecedentes

En 1945 Fallot publica sus observaciones de la zona entre Alicante y el río Guadiana, para este autor la Sierra de Crevillente es un anticlinal de grandes proporciones, pero sin accidentes importantes y cuya rama sur emerge del Mioceno. Desde un punto de vista estratigráfico posee una serie, de tipo subbético, más completa que en ninguno de los macizos vecinos. Desde un punto de vista tectónico, son de interés los contactos anormales del Trías de su vertiente meridional. Al oeste de la terminación del anticlinal de Crevillente, destaca la Sierra de Abanilla, apareciendo como un pliegue mucho más reducido pero de la misma naturaleza que el anterior.

**Montenat 1977**, distingue cinco episodios en la evolución reciente de la estructuración de la parte oriental de la Cordillera Bética:

1. Al final del Burdigaliense se produjo, al igual que en el resto de la Cordillera, su estructuración principal. Estos movimientos son los responsables del desmantelamiento casi total del Aquitaniense y del Burdigaliense.
2. Durante el Langhiense y el Serravaliense domina la distensión, como también ocurre en regiones próximas, que se manifiesta a través de importantes emisiones volcánicas.
3. En el límite Serravaliense-Tortonense tienen lugar nuevos movimientos compresivos que dan lugar a un acortamiento N-S.
4. A partir del Tortonense y hasta el Cuaternario se instaura un largo periodo distensivo. Las discordancias registradas, de amplitud variable y gran extensión geográfica, indican la existencia de movimientos distensivos (intratortonense, del límite Mioceno-Plioceno e intraplioceno) que repercutirán en la evolución paleogeográfica.
5. Los movimientos compresivos vuelven a instaurarse en el Cuaternario, lo que se traduce en una reactivación de los accidentes preexistentes (fallas transcurrentes conjugadas NE-SO sinextrosas y NO-SE dextrosas) y por la creación de nuevas estructuras (pliegues de ejes E-O). Todas estas estructuras muestran deformaciones que indican un acortamiento de dirección cercana a N-S.

Según **Montenat et al., 1990**, el basamento de la Cuenca del Bajo Segura estaría compartimentado en varios bloques por fracturas con direcciones preferentes NE-SO/ENE-OSO y NO-SE, dispuestos en umbrales y cubetas subsidentes. Los relieves aflorantes en el centro de la cuenca corresponderían a las partes aflorantes de los bloques levantados.

**Goy, J.L. et al., 1990**, considera la actividad tectónica sumamente importante en el paso Pleistoceno inferior-medio, momento en el cual se produce un cambio paleogeográfico brusco en toda el área y se crea la Cuenca del Bajo Segura.

Para **Alfaro, 1995**, el relleno de la Cuenca del Bajo Segura se inicia tras la fase de deformación finiserravalliense (Montenat, 1977). A mediados del Tortoniense, un segundo evento tectónico genera la discordancia intratortoniense, claramente marcada en el margen sur. Durante este intervalo, el borde norte es el más activo de la cuenca. Tras el evento intratortoniense se sucede una etapa caracterizada por una actividad tectónica más moderada. En la fase finimesiniense la inestabilidad tectónica estaría ligada al funcionamiento del Corredor de desgarre de Palomares-Alhama-Bajo Segura y, especialmente, a la actividad del "Accidente de Crevillente", a lo largo de cuyo trazado se desarrollan discordancias progresivas. Finalmente, a mediados del Plioceno, los esfuerzos compresivos son absorbidos principalmente por el accidente del Bajo Segura, mientras el "Accidente de Crevillente" dejaría de ser activo. Dicho autor en su tesis concluye que la estructura más activa de la zona es el Accidente del Bajo Segura que funciona como un conjunto de fallas inversas enterradas. Otra falla que muestra actividad es el Accidente de Los Hondones como falla vertical o inversa en profundidad.

En 1998 se realiza el Mapa Neotectónico y Sismotectónico de España a escala 1:1.000.000 en él se destaca en el sector oriental de la Península (Fig. 22) las características siguientes:

- La casi desaparición del Subbético, extrujado entre Prebético y "Bloque de Alborán" desde Elche a Alicante.
- La presencia frecuente de estructuras diapíricas con extrusión de material Triásico (arcillo-yesífero) en relación con los sistemas de fallas actuantes durante la época geotectónica, aunque muchas de estas estructuras diapíricas estén originadas anteriormente.
- La falla NE-SO representada por el accidente de Cádiz–Alicante o Crevillente.
- El estudio de los cantos estriados en formaciones de edad neotectónica en los sectores de Elche y Alicante muestran la presencia de esfuerzos compresivos alternativos E-O y N-S, que debieron de actuar durante el Plioceno superior y el Pleistoceno
- En el área del Bajo Segura existe una fuerte subsidencia que se inicia en el Pleistoceno inferior y que continúa en la actualidad. El origen de la cuenca está relacionado con los

movimientos destrales de las alineaciones N 140-160 que dan origen al hundimiento del Bajo Segura.

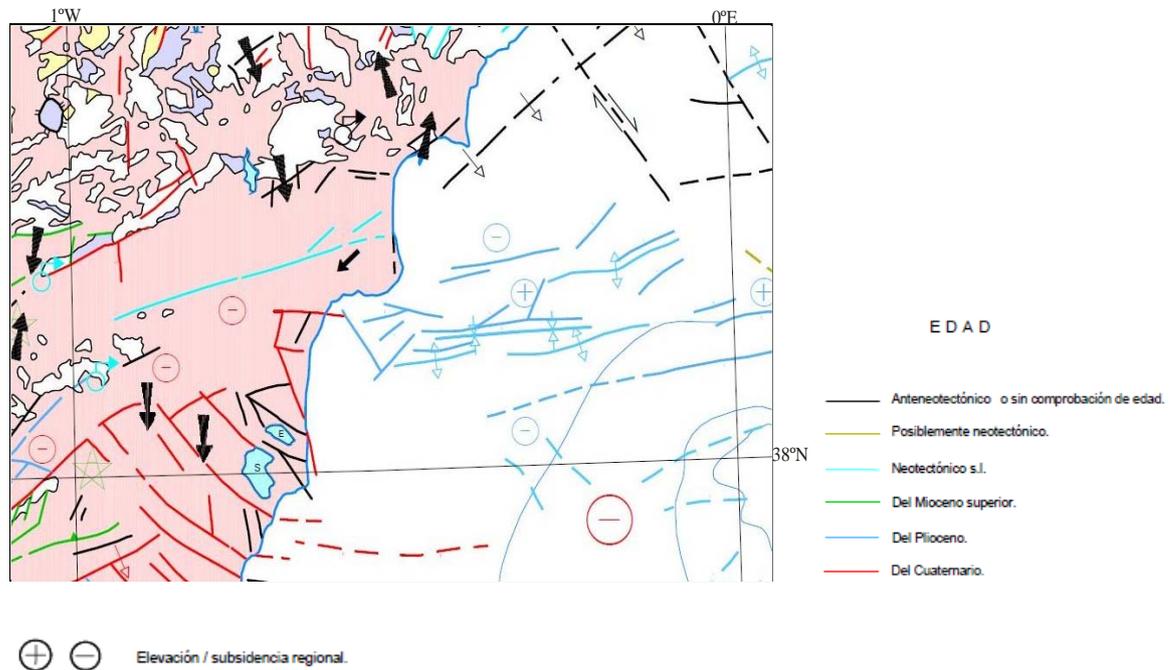


Figura 22. Imagen del mapa neotectónico en la zona de estudio (IGME, 1998).

En la tesis de **Tent-Manclús, 2003**, en una de las conclusiones se indica que en la evolución de la Cordillera Bética se pueden distinguir dos grandes etapas. En la primera, desarrollada entre el Triásico y el Paleoceno superior, domina la tectónica distensiva. En la segunda desarrollada entre el Paleoceno superior y la actualidad, predomina la tectónica compresiva asociada a un movimiento transpresivo, por lo que concluye que el tránsito entre ambas etapas tiene lugar durante el Paleoceno Superior.

Las principales estructuras de deformación de las Zonas Externas Béticas se formaron por la colisión oblicua de las Zonas Internas (Dominio de Alborán) contra el Paleomargen Sudibético, que ocurrió del Burdigaliense superior al Tortoniense inferior (Vera, 2004).

**Sanz de Galdeano et al., 2007**, indica que las estructuras recientes responsables del relieve actual de la Cordillera son principalmente pliegues (algunos de ellos deben estar asociados a cabalgamientos profundos) ligados a la compresión NNO-SSE y fallas normales asociadas a la extensión perpendicular ENE-OSO. También hay algunas fallas de dirección de gran importancia regional pero, debido al predominio de movimientos horizontales, tienen una impronta en el relieve mucho menor.

La falla del Bajo Segura, posible responsable del terremoto de Torrevieja de 1829, es una falla inversa ciega que produce en superficie pliegues activos como el anticlinal del Pilar, este pliegue está relacionado con su actividad reciente.

### 3.2. Tectónica de la zona de estudio

La Cuenca del Bajo Segura presenta un conjunto de fracturas y pliegues que han actuado desde el Tortonense, momento en el que quedó definida paleogeográficamente esta cuenca.

A continuación se describen algunas de las características de la deformación continua y discontinua que afectan a los materiales de la etapa neotectónica.

En la figura 23 se presenta el esquema estructural, en él se indica la posición de las fracturas más importantes que se encuentran en el área de estudio, mas adelante en el apartado de `deformación discontinua` se describen las características principales de cada una de ellas.

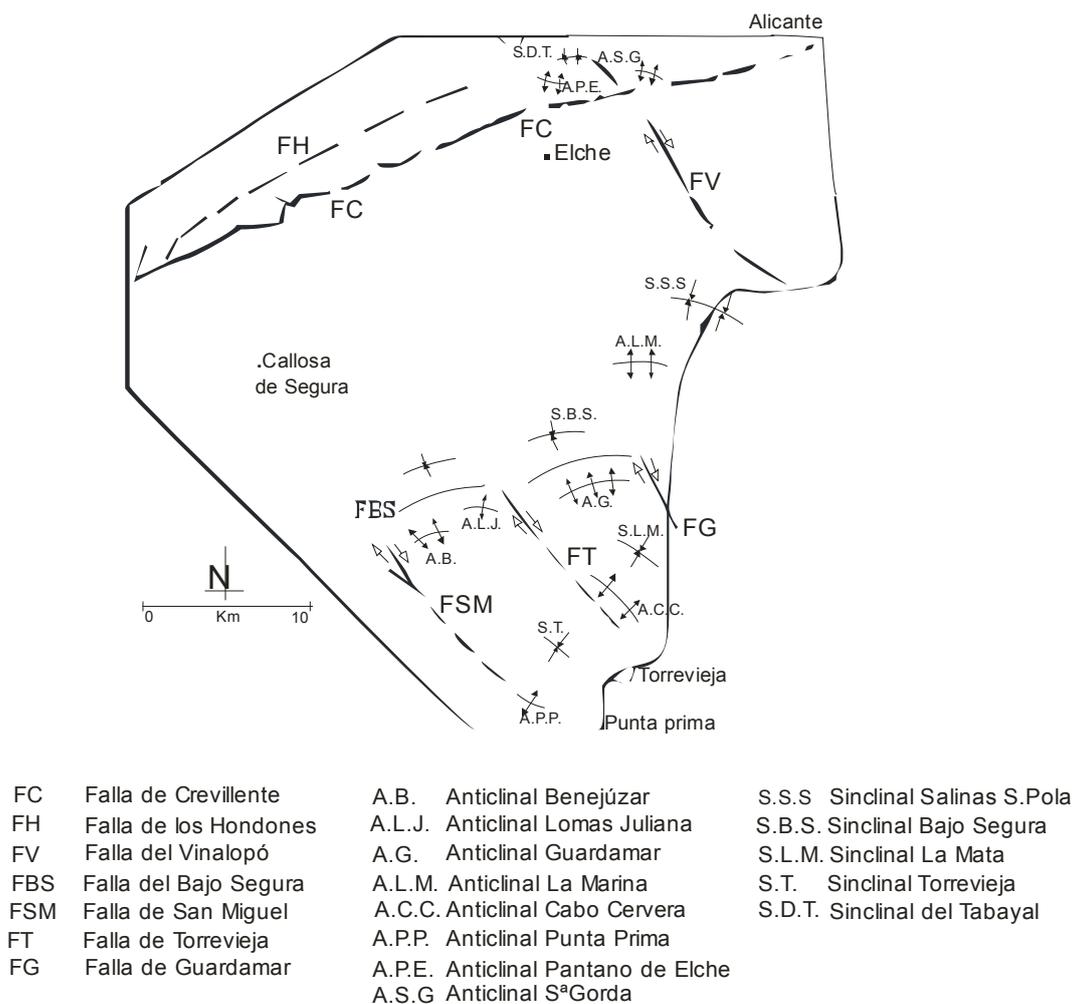


Figura 23. Esquema estructural de la zona de estudio (modificado de Alfaro, 1995).

### 3.2.1. Deformación continua

#### 3.2.1.1. Zonas Internas

La deformación continua se manifiesta especialmente en los pliegues anticlinales que afectan a los materiales situados a lo largo de la margen derecha del río Segura, de oeste a este destacan: el anticlinal de Benejúzar, con dirección de su plano axial ENE-OSO, el anticlinal de Lomas de Juliana, el anticlinal de Guardamar, el sinclinal de la Mata, anticlinal Cabo Cervera, el sinclinal de Torrevieja y el anticlinal de Punta Prima.

En la margen izquierda del río se encuentra el sinclinal del Bajo Segura, anticlinal de La Marina y el sinclinal Salinas de Santa Pola.

El anticlinal de Benejúzar está situado a 2,5 kilómetros al SE del pueblo de Benejúzar, la dirección de su plano axial es de ENE-OSO, girando en sentido ENE-OSO, en el sector oriental. Está estimada su superficie en unos 15 km<sup>2</sup>. Aflora el núcleo del pliegue, formado por el tramo evaporítico constituido por capas de yeso bien cristalizado (selenítico).

El anticlinal se encuentra flanqueado por dos fallas de dirección NO-SE, estas fallas afectan a los materiales plásticos del Messiniense por lo que deben estar selladas en profundidad (ITGE-ENAGAS, 1995a).

La presencia en la zona de una anomalía gravimétrica positiva (ITGE, 1992) podría indicar la continuidad de la estructura y la proximidad a la superficie del basamento alpujárride.

Una de las fallas NO-SE separa el domo de Benejúzar del de Lomas de Juliana, este anticlinal es una estructura pliocena, con núcleo Messiniense, muy tendida y con buzamientos comprendidos entre los 5° y 10°.

Otra falla de dirección NNO-SSE, al oeste de Rojas y Benifojar, que aproximadamente coincide con el tramo del ferrocarril que pasa por la zona, separa las estructuras de La Loma de Juliana del anticlinal Guardamar, se trata de una formación pliocena cuya charnela llega al sur de Guardamar, y cuyo flanco oriental se encuentra limitado por la Falla de Guardamar.

El anticlinal de Cabo Cervera se localiza entre la Salina de la Mata y la costa afectando al basamento Alpujárride y al relleno Neógeno, en relación con la falla de Torrevieja este anticlinal separa dos sinclinales sobre los que actualmente se sitúan las Salinas de Torrevieja y la Mata.

En la margen izquierda del río Segura destacamos el anticlinal de La Marina de dirección ENE-OSO (como el de Benejúzar y la Mata), está situado al O de la localidad de La Marina, su superficie se estima en 15-20 km<sup>2</sup> (ITGE-ENAGAS, 1995a).

Entre todos estos anticlinales se desarrollan sinclinales rellenos por sedimentos recientes. Entre otros, se encuentran los sinclinales del Bajo Segura, Salinas de Santa Pola, El Saladar-Elche y Torrevieja-La Mata.

En la parte más occidental de la zona de estudio se encuentran los afloramientos de los materiales Alpujárrides, en concreto la Sierra de Orihuela, y la Sierra de Callosa de Segura. Estos constituyen, junto con otros de mucha menor extensión, los testigos alpujárrides más orientales de la Cordillera Bética en la Península. Se conforman como antiformal que se sumergen hacia el este dividiendo la cuenca en profundidad en dos subcuencas o senos separados por un alto fondo alpujárride.

Los materiales alpujárrides están afectados por una deformación continua que produjo pliegues isoclinales a gran escala y una deformación discontinua que dio lugar a fallas normales de direcciones preferentes N-S y E-O.

Es claramente observable en proximidad al mirador de Orihuela y junto a la entrada del túnel, exactamente en el punto de coordenadas N 38°15'50`` y O 0°56'46`` un afloramiento que presenta un pliegue de microlitones (Fig. 24) denunciando la afectación de estas rocas por un proceso de cizallamiento discontinuo que aprovecha posiblemente una esquistosidad de crenulación previa.



Figura 24. Pliegue de microlitones.

Este cizallamiento discontinuo se pone en evidencia en la Sierra de Orihuela (Fig. 25) en donde se aprecia un plegamiento de pliegues isopacos formados por el desplazamiento que sufren los niveles por superficies de cabalgamiento posiblemente asociadas a un cabalgamiento o cizallamiento más importante.



Figura 25. Vista de la Sierra de Orihuela (izquierda) y esquema de cizallamiento (derecha).

### 3.2.1.2. Zonas Externas

En las Zonas Externas las estructuras más evidentes debidas a la deformación continua que afectan a nuestra zona y al entorno son las siguientes:

Anticlinal del Pantano de Elche (N130E), se trata de un anticlinal sintectónico, en el flanco sur los materiales tortonienses tienen buzamientos superiores a  $60^\circ$  mientras que en los sedimentos cuaternarios no superan los  $10^\circ$  de buzamiento. El anticlinal de Sierra Gorda (N130E), se aprecia una tendencia a la inmersión hacia el SO, en el núcleo del anticlinal se encuentra el Trías keuper, el sinclinal del Tabayal (E-O) y los pliegues de la Sierra de Borbuño (E-O). Estos pliegues mencionados afloran a lo largo del tramo oriental de la Falla de Crevillente.

Al norte de la Falla de Crevillente siguen aflorando pliegues que afectan a los materiales neógenos, fundamentalmente del Mioceno superior y el Plioceno inferior.

### 3.2.2. Deformación discontinua

Existen principalmente dos direcciones de fracturación: NO-SE y NE-SO. Las fracturas afectan principalmente al basamento, suelen ser profundas y se manifiestan en superficie a través del plegamiento de los materiales más recientes. Las fallas de dirección NO-SE funcionan como fallas normales y/o dextrosas.

En las zonas externas los relieves más importantes están controlados por fallas de dirección NE-SO.

La falla más destacada de las Zonas Externas es la Falla de Crevillente (N70°E, dextrorsa). La terminología y el trazado principal de esta falla ha sido muy variada desde su primera mención en la bibliografía existente, en este trabajo se denominará Falla de Crevillente ya que es el término más utilizado posteriormente por diferentes autores. La traza abarca desde Alicante hasta el norte de la Sierra de Arana.

La actividad sísmica en las Cordilleras Béticas se concentra al sur de la Falla de Crevillente, es donde se encuentra la actividad sísmica más importante, especialmente en las Zonas Internas (Burillo, 1989). Otros autores indican que este accidente, correspondiente al contacto Zonas Internas/Externas no presenta índices sismogénéticos significativos y no parece haber actuado desde el Mioceno, por lo que algunos autores lo han considerado como "cicatrizado" (Durand-Delga and Fontboté, 1980).

**Falla de los Hondones** (N70E sinistrorsa), el nombre fue propuesto por Alfaro García, 1995. Se trata de una falla de dirección NE-SO, se encuentra en el flanco norte de la Sierra de Crevillente aproximadamente paralela a la falla de Crevillente, la que posiblemente conecte en profundidad. Esta falla es considerada como la responsable del levantamiento de la lineación Crevillente-Abanilla.

**Falla del Vinalopó** (N155°E, dextrorsa). Falla de dirección NO-SE. Muestra un funcionamiento peculiar debido a su diferente orientación, en ella domina la componente dextrorsa, pero con un desplazamiento menor que el de las grandes fallas transversales. Su funcionamiento principal se produjo antes de la etapa neotectónica, se detectaron deformaciones de los materiales recientes a lo largo de la falla. Parece fosilizada por las calcarenitas amarillentas del Plioceno (Tent-Manclús, 2003).

**Falla ciega del Bajo Segura**, hay que señalar que no se trata de una única falla, sino de la acción conjunta de varias fallas inversas o de una estructura compleja en rampa y despegues. Se observa en el borde sur de la cuenca, cómo la Falla ciega del Bajo Segura está formada por varios segmentos arqueados convexos hacia el norte. Cada arco está separado por una falla, que de este a oeste, son: Falla de Guardamar, Torrevieja y San Miguel de Salinas, de direcciones NO-SE. Se trata de una falla inversa, situada en un contexto geodinámico reciente, el de la Cordillera Bética, donde la mayoría de fallas activas estudiadas son normales o de salto en dirección (Alfaro *et al.*,

2010). Esta falla corta rocas carbonatadas triásicas del Complejo Alpujárride y pliega la cobertera sedimentaria suprayacente, de edad Mioceno superior a Cuaternario (Montenat, 1977; Alfaro, 1995). Por otra parte, varios perfiles sísmicos de alta resolución han puesto en evidencia la existencia de varias flexuras en los sedimentos pleistocenos que rellenan el sinclinal situado en el bloque de muro de la falla en el actual valle del río Segura. Estas flexuras y la presencia de varios pliegues hectométricos asociados a los anticlinales de la zona indican que la falla se ramifica en superficie en varios segmentos (Alfaro *et al.*, 2010).

La **Falla de San Miguel de Salinas**, falla de dirección NO-SE, posee aproximadamente 17 km de longitud desde la costa al sur de Torre Vieja. Su funcionamiento más evidente es de falla normal controlando el área subsidente de las salinas de Torre Vieja (Somoza, 1989).

La prolongación hacia el norte de la Falla de San Miguel de Salinas pasaría entre las sierras de Callosa y de Orihuela llegando al sureste de la localidad de Abanilla. En ese punto, según los datos de Gauyau, 1977, existe una falla que cortaría a la de San Miguel dando lugar a un arrastre dextrorso.

A lo largo de la misma se han detectado anomalías gravimétricas y desplazamientos verticales del basamento Alpujárride (Montenat, 1977).

La **Falla de Torre Vieja**, de dirección NO-SE, controla el borde oeste de las salinas de La Mata (Somoza, 1989), presenta una longitud en el continente de unos 12 km. Funciona como falla dextrorsa ante una situación compresiva NNO-SSE.

La **Falla de Guardamar** presenta una traza superficial de unos 4 km, quedando sumergida bajo el mar. Con una dirección más hacia el norte que las anteriores.

Estas tres últimas fallas citadas, de dirección NO-SE, parecen prolongarse unos pocos kilómetros por el interior de la plataforma continental (Alfaro *et al.*, 2002).

Nuestras observaciones de campo han puesto de manifiesto que uno de los sistemas de fallas, de dirección NO-SE, y concretamente N160°E/60°E que se encuentra al oeste de la presa del pantano de Elche, son en general fallas normales que afectan a los materiales neógenos más profundos, próxima a las coordenadas N38°18'21"; W 0°43'57" encontramos una falla normal, en el bloque superior, calcarenitas amarillentas bien estratificadas con dirección N65E/65S y en el bloque inferior calizas areniscosas masivas (Fig. 26).

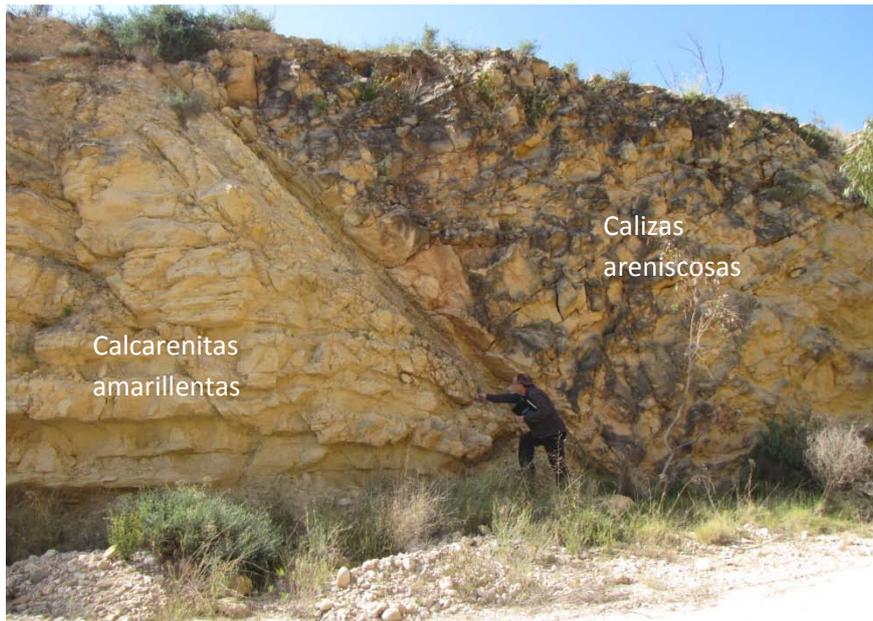


Figura 26. Falla con relleno arcilloso.

Este tipo de fallas tienen una característica de gran interés para los objetivos de esta investigación como es la de presentar en su superficie de falla un relleno arcilloso impermeable de hasta 40 cm de espesor, por lo que podrían actuar como limitantes o selladores laterales de los posibles niveles almacén (Fig. 27), tanto por sí mismas (superficie de falla) como por desplazamiento normal de los niveles sello. Las propiedades de las rocas que se encuentran dentro de las zonas de falla afectan la capacidad de sello de una falla.

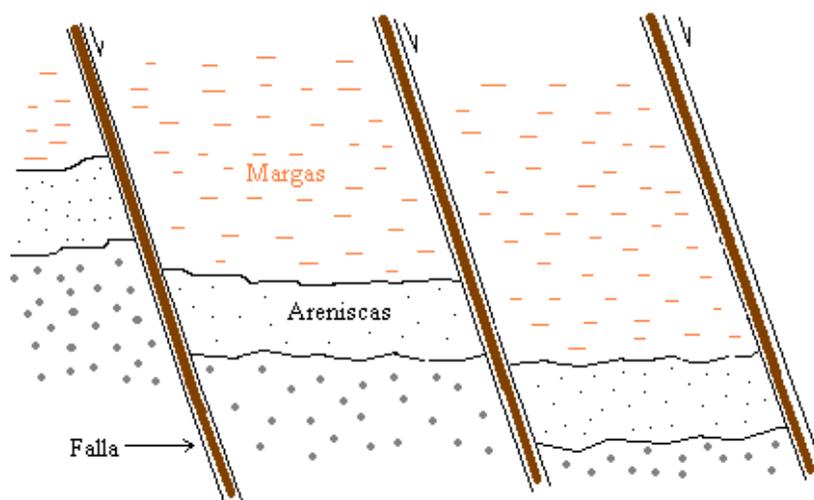


Figura 27. Esquema de la acción de las fallas como limitantes laterales en un posible almacén en areniscas.

Las fallas pueden ser responsables del atrapamiento de hidrocarburos y la compartimentación de yacimientos. Mediante la integración de datos sísmicos y datos de pozos entre otros, los geocientíficos pueden modelar el comportamiento de las fallas e incorporar los resultados en simuladores de flujo de fluido de yacimientos (Cerveny, 2005). Esto mejora la predicción del comportamiento de las fallas y reduce el riesgo asociado.

En la experiencia con yacimientos de hidrocarburos, las fallas que actúan como sello pueden constituir un control primario sobre el yacimiento pero también pueden transformar un yacimiento grande y continuo en diversos compartimentos formando un grupo de yacimientos con características diferentes de presión.

En otra observación realizada en los materiales alpujárrides (Fig. 28), concretamente al sur de San Isidro, en los materiales calizos-dolomíticos que afloran, encontramos varias fracturas rellenas de arcilla, aunque no se observaron indicios de movimiento.



Figura 28. Fracturas rellena de arcilla, al sur de San Isidro.

### 3.3. Sismicidad

Uno de los criterios favorables para ubicar un posible almacén de  $\text{CO}_2$  es que la zona sea de baja o nula actividad sísmica. Este no es el caso de la Cuenca del Bajo Segura, ya que se considera la sismicidad en el SE Peninsular, como en el resto de la Cordillera Bética, activa, aunque generalmente moderada.

La sismicidad registrada en la Cordillera Bética y, concretamente en su extremo oriental, está asociada al contacto entre las placas euroasiática y africana. Está caracterizada por terremotos de magnitud pequeña y moderada ( $M \leq 5$ ) (Alfaro, 1995).

Actualmente se conoce sólo un terremoto de mayor magnitud ocurrido en la zona, el terremoto de Torrevieja que tuvo lugar en el año 1829, a este terremoto se le asignó una intensidad X (escala MSK) y una magnitud entre 6.3 y 6.9.

La sismicidad registrada en el área de estudio se concentra en el área de la Vega Baja del Segura y Torrevieja, en el resto de la región la sismicidad se encuentra más dispersa.

En los estudios de tectónica activa de la Península Ibérica la Falla ciega del Bajo Segura tiene gran interés debido a que es una de las fallas que tiene asociada mayor actividad sísmica en los últimos 500 años. Probablemente esta falla es la responsable del terremoto de Torrevieja. Además de este terremoto, tuvieron lugar otros cuatro eventos que alcanzaron intensidad superior a VIII, tres de ellos en Orihuela y uno en Guardamar. Y otros tantos de menor intensidad (=VII) en Rojales y Torrevieja. Actualmente la falla parece que sólo provoca terremotos de pequeña magnitud.

El análisis de la sismicidad histórica e instrumental evidencia que el índice de actividad de la zona es bajo-moderado, aunque no se descarta que se puedan producir terremotos de gran magnitud (Alfaro, 1995).

### **3.3.1. Problemática sísmica de la zona de estudio**

Los estudios específicos de tectónica activa son relativamente modernos y todavía escasos en la Cordillera Bética. Se aplican técnicas que utilizan el registro geológico reciente para calcular los índices de actividad de una falla, por lo general se tienen en cuenta los últimos 500.000 años. En regiones con un índice de actividad tectónico bajo, como el extremo oriental de la Cordillera Bética, las evidencias de actividad tectónica en los últimos 500.000 años no son fáciles de establecer (Alfaro, 1995).

El uso de nuevas tecnologías y la investigación realizada sobre el terreno en las fallas activas de la Península obligan a revisar el mapa de riesgo sísmico de España. Según los expertos que trabajan en este campo, existen zonas de España no contempladas hasta ahora en la cartografía de riesgo que pueden registrar terremotos de magnitud V mientras que otras áreas "tranquilas" que no sufren seísmos desde hace cientos de años pueden sufrir un gran temblor en cualquier momento.

El Instituto Geográfico Nacional de Ministerio de Fomento (IGN) trabaja en la incorporación de nuevos conocimientos y modificar el mapa de riesgo y la Norma Sísmica NCSE-02 vigente en España.

Una investigación del Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en la que participan la Academia Rusa de Ciencias, el Centro Internacional de Física Teórica y la Universidad de Trieste (Italia), ha identificado la existencia de nodos o puntos de intersección de líneas morfoestructurales donde se pueden generar terremotos que superen la magnitud V. La investigación ha identificado nuevas zonas de riesgo sísmico en áreas de la Cordillera Cantábrica, el extremo occidental de las Cordilleras Béticas y el norte de Valencia, donde no hay registro de terremotos de esa intensidad.

La catalogación de esta región como adecuada para la selección en ella de almacenes profundos de CO<sub>2</sub> se ve dificultada por la sismicidad registrada en la zona, pero esto no debe suponer un rechazo a la hora de su estudio ya que las posibilidades pueden darse tanto en tierra como en mar.

El espesor (alrededor de 500 metros) de las margas plásticas, que actuarían como nivel sellante, puede ser suficiente para asegurar la estanqueidad de la formación almacén incluso si se viera afectada por algún temblor.

La mayoría de la energía de los terremotos tiende a disiparse en profundidades menores a las que el CO<sub>2</sub> se almacena. Como ejemplo de la seguridad del almacén ante un temblor se encuentra el caso del proyecto Nagaoka (Research Institute of Innovative Technology for the Earth, RITE). En octubre de 2004 un terremoto de magnitud 6,8 en la escala de Richter se produjo a 20 km del punto de inyección del proyecto piloto de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en Japón. En este proyecto el CO<sub>2</sub> es almacenado en una formación salina a una profundidad de 1.100 metros. Las actividades de inyección fueron suspendidas inmediatamente después del terremoto, pero se reanudaron poco después. La formación almacén fue controlada antes, durante y después del terremoto y no se detectaron fugas (IEA, 2008). Una prueba más es el gran número de yacimientos de petróleo y gas cercanos a las fallas activas de California.

La sismicidad de la región estudiada en esta investigación es considerada de grado moderado lo cual no la descarta en sus posibilidades de albergar un almacén de CO<sub>2</sub>, siempre que se tomen las medidas recomendadas por las leyes y reglamentos de seguridad sísmica.

## **CAPÍTULO 4**

# **INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE GEOFÍSICA Y SONDEOS PARA EL CONOCIMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO DE LA CUENCA**

---

#### 4.1. Datos de la geofísica y sondeos de la zona

La Cuenca del Bajo Segura ha sido objeto de varias campañas geofísicas con diversos fines: prospección petrolífera, hidrogeológica e investigación geotécnica, principalmente.

En primer lugar se ha realizado la recopilación de la información exploratoria del subsuelo de la zona, sondeos profundos con testificación geofísica y las campañas de sismica de reflexión, encontrada prácticamente en su totalidad en las dependencias y bases de datos del IGME, entre ellas destaca el Sistema de Información Geográfica (SIGEOF) y la base de datos de hidrocarburos del IGME. También se consultó el fondo documental del Archivo Técnico de Hidrocarburos del Ministerio de Economía, gestionado en el año 2008 por la empresa GESSAL.

En cuanto a la información de los sondeos profundos ha consistido en los informes finales de los sondeos, “master log” (diagramas de perforación), diagrafías disponibles y la columna litológica de dichos sondeos. Debido a la antigüedad de los datos no ha sido fácil su adquisición, una vez recopilada la información hay que llevar a cabo el escaneado de los documentos ya que se encuentran en un formato antiguo el cual es necesario digitalizar para sus posteriores y posibles fases de estudio. Las diagrafías han sido digitalizadas con el programa específico Neuralog, y los datos obtenidos de las mismas son tratadas con el software WellCAD.

En este trabajo se han analizado los resultados de 7 sondeos profundos (Tabla 7), perforados para la investigación de hidrocarburos, denominados: La Marina-1, La Mata-1, Benejúzar-1, Rojas-1, San Miguel de Salinas-1, San Miguel de Salinas-2 y Torrevieja Marino-C1, con profundidades comprendidas entre 805 m y 1.648,5 m. La información que cada uno de ellos posee varía según el sondeo, en el caso del sondeo Benejúzar-1 disponemos de mucha más información en comparación con el sondeo Torrevieja Marino C-1. La ubicación de los sondeos se representa en el mapa de la figura 29.

Denominación del sondeo	X	Y	Huso	Profundidad total (m)	Fecha fin perforación
(1) Benejúzar-1	0°49`0,80``W	38°3`32,60``N	30	1.648,5	11/03/1968
(2) San Miguel de Salinas-2	0°47`21,80``W	37°58`26,70``N	30	1.134,5	25/03/1970
(3) San Miguel de Salinas-1	0°42`58,80``W	37°56`47,70``N	30	805	31/12/1967
(4) La Mata-1	0°39`30,80``W	38°2`4,60``N	30	829	25/02/1970
(5) Rojas-1	0°42`52,80``W	38°4`34,60``N	30	1.582	19/11/1952
(6) La Marina-1	0°39`30,80``W	38°8`44,60``N	30	1.610	06/04/1951
(7) Torrevieja Marino C-1	0°23`54,57``W	37°58`20,58``N	30	722	13/12/1978

Tabla 7. Sondeos profundos localizados en el área de estudio de la Cuenca del Bajo Segura.

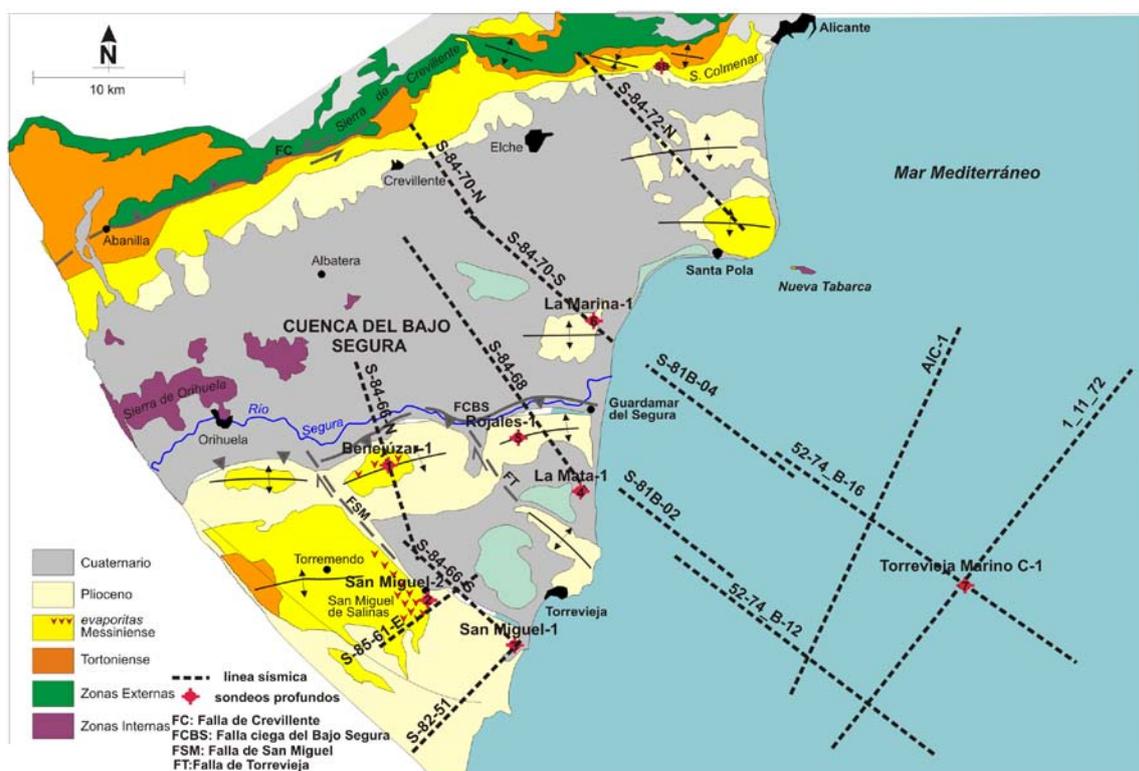


Figura 29. Mapa geológico sintético de la zona de trabajo indicando la posición de los sondeos y líneas sísmicas.

También se ha consultado la información de varios sondeos realizados para la investigación hidrogeológica (IGME-IRYDA) que oscilan aproximadamente entre los 100 y 300 m de profundidad, y que han proporcionado información sobre la naturaleza litológica y potencia del relleno Cuaternario-Plioceno de la Depresión del Bajo Segura.

Además de la información obtenida de las campañas de sondeos eléctricos verticales realizadas en la zona de estudio (Gauyau, 1977).

Asimismo contamos con el sondeo efectuado en Bacarot durante el Proyecto "Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas susceptibles de constituir emplazamientos de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>", dirigido por el IGME. Es una perforación con una longitud de 170 metros, próxima a la localidad de Bacarot (Alicante), por tal, de aquí en adelante, se denominará con las siglas SB. En él se cortan los niveles de muro de las Margas de Torremendo (posible nivel sellante) y el techo de las calcarenitas de las Ventanas. En este sondeo, mediante testificación geológica, geofísica y ensayos de muestras tomadas en sus testigos, hemos estudiado detalladamente las características petrofísicas e hidrogeológicas de los niveles interesantes. En el capítulo 5 se detallan los datos obtenidos con esta perforación.

La información de las campañas sísmicas recopiladas son las realizadas en la zona de estudio en los años '80, se han estudiado un total de 14 líneas incluidas en las campañas onshore: S-84, S-82 y S-85, y la campaña offshore de los años '60, '70 y '80.

Existen en la actualidad para la zona offshore estudiada en esta investigación, perfiles efectuados en el año 2008 durante la campaña EVENT-Shelf a bordo del buque oceanográfico García del Cid, durante esta campaña se realizaron diez perfiles de sísmica de alta resolución con el objetivo de cartografiar rupturas superficiales en el fondo marino y las estructuras localizadas en el subsuelo de la zona sumergida de la zona de falla del Bajo Segura. La mayoría de los perfiles tienen una orientación NNE-SSO a N-S y dos de ellos tienen una orientación O-E cruzando perpendicularmente a los otros perfiles (Perea *et al.*, 2010).

Para la realización de esta tesis no hemos podido obtener la información de dichos perfiles más modernos. Por esta razón se analizan los correspondientes a la campaña marina realizada en los años '60, '70 y '80.

Se han seleccionado las líneas que presentan mayor calidad, teniendo en cuenta la antigüedad de las campañas, en total se ha trabajado con 14 líneas sísmicas. La mayoría de las imágenes sísmicas han sido obtenidas gracias a la empresa GESSAL y consultando la base de datos del IGME (SIGEOF).

El trabajo realizado con las líneas sísmicas, en principio, consistió en la elección de los perfiles sísmicos más interesantes, aquellos que presentaban mayor información y tenían mejor

resolución, ya que debido a la antigüedad de las campañas hay líneas que no merece la pena estudiar por la escasa información que proporcionan.

La reinterpretación de las líneas nos permitió realizar el estudio de la continuidad de las formaciones, las estructuras existentes, los cierres y las fallas presentes en el subsuelo.

Asimismo pueden ser una ayuda inestimable para delimitar las formaciones almacén-sello favorables y sus características geométricas, profundidad y potencia.

Cada una de las líneas se vectorizan convirtiéndolas a formato digital SEG-Y, con el programa LEASSV (Lynk Exploration Archivist Seismic Scanning and Vectorising) en la empresa GESSAL. Después de esto se interpretaron con el software GeoGraphix Version 2007 de la compañía Landmark. La ubicación de las líneas sísmicas se aprecia en el mapa de la figura 29.

En la tabla 8 se indica el nombre de las líneas estudiadas (mantenemos la denominación SIGEOF para las líneas obtenidas en dicha base de datos, al objeto de facilitar su localización).

<b>Nombre línea</b>	<b>Año</b>
<b>ONSHORE</b>	
<b>S-84-72-N</b>	1984
<b>S-84-70-N</b>	1984
<b>S-84-70-S</b>	1984
<b>S-84-68-N</b>	1984
<b>S-84-66-N</b>	1984
<b>S-84-66-S</b>	1984
<b>S-85-61 E</b>	1985
<b>S-82-51</b>	1982
<b>OFFSHORE</b>	
<b>S81B-04</b>	1981
<b>S81B-02</b>	1981
<b>52-74_B-16</b>	1974
<b>52-74_B-12</b>	1974
<b>ALC-1</b>	1967
<b>1_11_72</b>	1967

Tabla 8. Nombre y año de realización de las líneas sísmicas onshore y offshore estudiadas.

#### 4.1.1. Información obtenida y metodología utilizada para la interpretación de los registros de pozo

Los sondeos perforados para la exploración de hidrocarburos en la zona de trabajo, que se han estudiado para el desarrollo de esta investigación se indican en la tabla 7.

La información que aporta cada sondeo es diferente, así mientras que los denominados Benejúzar-1, San Miguel de Salinas-1, San Miguel de Salinas-2 y Torrevieja Marino C-1 además de diversos tipos de registros, poseen informes finales. En los sondeos de La Mata-1, La Marina-1 y Rojas-1 la información es menor, sólo aportan el log recopilativo o fundamental y algunas diagrfías (Tabla 9).

	Informe final	Tipos de Registros							
		Gamma Ray	Neutrón	SP	Caliper	Conduc.	Densidad	Resist.	Sónico
Benejúzar-1	√	√	√	√	√	-	√	√	√
San Miguel de Salinas-1	√	-	-	√	√	-	√	√	√
San Miguel de Salinas-2	√	√	√	√	√	√	√	-	-
Rojales-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Mata-1	-	√	√	√	√	√	√	√	-
La Marina-1	-	-	-	√	-	-	-	√	-
Torrevieja Marino C-1	√	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 9. Información de los registros disponibles en los sondeos profundos.

Toda la información anteriormente expuesta en la tabla 9 se encontró en su totalidad en las dependencias del IGME, en un formato conocido como microfichas, lo que requirió realizar el escaneado de cada tipo de registro y de los informes.

Una vez escaneadas todas las diagrfías se puede trabajar con ellas en softwares como NeuraLog v.2007, utilizado para la digitalización de los registros.

NeuraLog es la solución de digitalización más ampliamente utilizada en la industria del petróleo y gas. Este programa nos permite transformar los registros de pozos escaneados en registros digitalizados para tener mayor precisión de análisis y poder trabajar con ellos en programas como

GeoGraphix y WellCAD, ya que, del formato en papel obtenemos el registro en los formatos estándares más comunes de la industria petrolera: LAS 1.2 y 2.0.

Se digitalizaron un total de 31.915 metros, repartidos de la siguiente manera: Benejúzar-1: 10.630 m; San Miguel de Salinas-1: 4.125 m ; San Miguel de Salinas-2: 8.140 m; La Mata-1: 5.040 m y La Marina: 3.980 m.

No se tienen datos de registros geofísicos en los sondeos de Rojas-1 y Torrevieja Marino C-1.

Con los registros ya digitalizados se trabajó con ellos con el software WellCAD v4.3. Este programa es utilizado para el tratamiento de registros geofísicos, desarrollado por Advanced Logic Technology (ALT). Es una herramienta de análisis de datos para los distintos tipos de información.

De cada sondeo disponemos de distintos tipos de registros, para obtener los valores petrofísicos se introducen las diferentes diagrfías y a partir de ahí calculamos los parámetros dependiendo de los tipos de registros de los que disponemos de cada sondeo.

Principalmente hemos trabajado con cuatro sondeos: Benejúzar-1, San Miguel de Salinas-1, San Miguel de Salinas-2 y La Mata-1. En el Anexo II se incluyen los registros geofísicos obtenidos de dichos sondeos, ya que de estos si disponemos de suficiente información.

Del sondeo La Marina-1 tenemos el SP y resistividad; de Rojas-1 y Torrevieja Marino C-1 no hay información de diagrfías. La información que dispusimos del sondeo Benejúzar-1 es la más completa en cuanto a registros geofísicos.

Los parámetros petrofísicos necesarios para definir el potencial de una formación como posible almacén de CO<sub>2</sub> no se obtienen de manera directa sino que se deducen a partir de las características de la formación medidas directamente con las herramientas de registros geofísicos.

Otro aspecto del estudio de los sondeos ha consistido en la elaboración de sismogramas sintéticos, que ha permitido su “calado” sobre los perfiles sísmicos. Para realizar los sismogramas sintéticos es necesario contar con el registro sónico y densidad, como es el caso del sondeo Benejúzar-1 y San Miguel de Salinas-1, para el sondeo San Miguel de Salinas-2 y La Mata-1 contamos con el registro de densidad, y para los demás sondeos, Rojas-1, La Marina-1 y Torrevieja Marino C-1 se realiza un sismograma sintético teórico, ya que disponemos de sondeos próximos, y aplicamos las mismas velocidades de intervalo. Esto implica menor precisión, pero en la zona de trabajo no disponemos de otros datos.

#### 4.1.2. Parámetros petrofísicos calculados en los sondeos profundos

A continuación se detalla cada uno de los parámetros calculados para caracterizar las formaciones atravesadas por los sondeos, en cada caso la metodología utilizada para el cálculo de cada parámetro y su justificación.

##### Volumen de arcilla

Es posible calcularlo en los sondeos Benejúzar-1, La Mata-1 y San Miguel de Salinas-2 ya que son los pozos en los cuales disponemos de la curva de Gamma Ray. En formaciones sedimentarias, el registro de Rayos Gamma refleja el contenido de arcilla de las formaciones porque los elementos radiactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas (Schlumberger, 1989).

El cálculo se realizó mediante la fórmula de volumen de arcilla:  $V_{sh} = (GR - GR_{cln}) / (GR_{shl} - GR_{cln})$ , donde el valor de GR es el valor medido en el registro y los demás son parámetros fijos, con lo cual se generó una curva asociada que presentaba los valores de volumen de arcilla a lo largo del pozo. Se determinó un índice de arena limpia ( $GR_{cln}$ ) de 20 API y un límite de gamma ray para las arcillas ( $GR_{shl}$ ) de 100 API.

El registro de potencial espontáneo (SP) también es útil para dar valores cualitativos del contenido arcilloso de una capa. El registro de Gamma Ray es particularmente útil en la definición de estratos de lutita cuando la curva del SP no se registra.

Este cálculo se justifica por la necesidad de identificar tramos de roca con alto contenido en arcilla que pudieran formar parte del sello del almacén, y a su vez se buscan formaciones con poco contenido en arcillas como las idóneas para el almacenamiento, la ausencia de arcillas incrementa la porosidad efectiva y por tanto, la permeabilidad.

##### Geometría del pozo

A partir del registro Caliper mediante el software WellCAD representamos la geometría del pozo en 3D, este registro mide las variaciones del diámetro del mismo a lo largo de la trayectoria del pozo.

Con las imágenes obtenidas con el software podemos ver el diámetro del pozo y los derrumbes ocurridos lo cual nos puede dar una idea de la cantidad de arcilla presente, ya que a más derrumbes posiblemente mayor cantidad de arcilla, así como de la intensidad de la fracturación, dependiendo del tipo de litología atravesada. La determinación de este parámetro nos da, en principio, un valor cualitativo de la permeabilidad.

Los cuatro pozos estudiados con el software cuentan con registro de caliper son: Benezúzar-1, San Miguel de Salinas-1, San Miguel de Salinas-2 y La Mata -1.

### **Porosidad**

La porosidad es el volumen de los poros por cada unidad volumétrica de formación, es la fracción del volumen total de una muestra que es ocupada por poros, se representa usualmente por el símbolo  $\emptyset$ .

Se pueden obtener valores de porosidad a partir del registro sísmico, de densidad o un registro neutrónico en caso de que se conozca la litología de la formación.

Se obtuvieron los valores de porosidad de los cuatro pozos, teniendo en cuenta diferentes registros.

Para el sondeo Benezúzar-1 y San Miguel de Salinas-1 hemos trabajado con los registros: sísmico y densidad. Para San Miguel de Salinas-2 y La Mata-1 con el registro de densidad.

Para la evaluación de la porosidad en la mayoría de los casos usando el registro sísmico utilizamos la fórmula de Wyllie para areniscas consolidadas y compactas, en formaciones limpias con pequeños poros existe una relación entre la porosidad y el tiempo de tránsito (Schlumberger, 1989).

La fórmula utilizada para el cálculo de la porosidad con el registro sísmico es:

$$SPOR = (\{DT\} - DT_{ma}) / (DT_{fld} - DT_{ma})$$

Siendo:

DT = Lectura del perfil sísmico, en  $\mu\text{seg}/\text{pie}$ .

$DT_{ma}$  = Tiempo de tránsito en la roca matriz, este valor dependerá de si atraviesa el sondeo areniscas, calizas o dolomías.

$DT_{fld}$  = alrededor de  $189 \mu\text{seg}/\text{pie}$  (que corresponde a la velocidad del sonido en el fluido).

Esta fórmula también es útil en carbonatos que tienen porosidad intergranular, con frecuencia existe porosidad secundaria, debido a fracturas, en estas la velocidad del sonido depende de la porosidad primaria.

En arenas no consolidadas e insuficientemente compactadas con la fórmula de Wyllie se obtienen valores de porosidad demasiado altos, estas arenas no compactadas comúnmente se presentan en formaciones geológicamente más recientes y a poca profundidad.

Con el registro de densidad, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$DPOR = (\rho_{ma} - \{RHOB\}) / (\rho_{ma} - \rho_{fld})$$

Siendo:

$RHOB$  = Lectura del perfil de Densidad en  $\text{g}/\text{c}^3$ .

$\rho_{ma}$  = Densidad de la matriz, siendo los valores comunes: 2,65 para arenas, areniscas y cuarcitas. 2,68 para arenas calcáreas o calizas arenosas. 2,71 para calizas y 2,87 para dolomías.

$\rho_{fld}$  = Densidad del fluido, igual a 1 .

De los registros estudiados, el valor de porosidad más fiable se obtiene del registro de densidad, el registro sísmico tiende a ignorar la porosidad secundaria ya que las lutitas y fracturas complican su lectura como también la presencia de gas.

La porosidad es un factor imprescindible en la caracterización de la formación almacén, un 5% es el valor mínimo admisible para considerar una formación como almacén (Prado *et al.*, 2009). Sin embargo, una porosidad elevada no implica que sea favorable la litología como almacén, dependerá de la permeabilidad.

## Temperatura

La temperatura junto con la presión, controla la viscosidad y solubilidad de los fluidos. La solubilidad del CO<sub>2</sub> aumenta con la presión y disminuye al aumentar la temperatura y la salinidad del agua. Las experiencias de laboratorio realizadas en muestras de la Formación Frío (Texas, USA) indican que el proceso de atrapamiento residual depende de la porosidad, temperatura y presión.

El cálculo de la temperatura también es importante para estimar la capacidad de almacenamiento, en el caso de formaciones permeables con agua salada, el resultado depende fundamentalmente del producto del volumen de poro (volumen disponible en la estructura) por la densidad del CO<sub>2</sub>. La densidad del CO<sub>2</sub> varía con la profundidad y es función de la presión y de la temperatura (IGME, 2009).

Por otra parte, dependiendo de la temperatura superficial y de los gradientes geotérmicos y de presión existentes en la zona, la profundidad a la que se alcanzan las condiciones supercríticas del CO<sub>2</sub> son variables. Para un gradiente geotérmico en torno a 25°C y en condiciones de presión hidrostática, el techo de la formación almacén debe superar los 800 m de profundidad (Ruiz *et al.*, 2008), para que se alcancen dichas condiciones.

El régimen geotérmico dentro de una cuenca sedimentaria viene determinado por la magnitud e interacción de las distintas fuentes de calor y los mecanismos de transferencia por los que el calor terrestre se transfiere a la superficie (Bachu and Burwash, 1991).

Depende específicamente del tipo, edad y tectónica de la cuenca, de la proximidad a fuentes de calor corticales, tales como cámaras magmáticas, intrusiones y volcanes, del flujo calorífico del basamento, de la conductividad térmica y producción de calor en la secuencia sedimentaria, que a su vez es función de la litología y la porosidad de las rocas y, de la temperatura en el techo de la secuencia sedimentaria (Bachu, 2000).

El significativo efecto del régimen geotérmico de una cuenca sedimentaria sobre la capacidad y la seguridad de las operaciones de almacenamiento de CO<sub>2</sub> indican la necesidad de conocer parámetros como la temperatura superficial y las condiciones geotérmicas, como criterios para la selección de cuencas sedimentarias para la inyección de CO<sub>2</sub>.

Por los motivos ya descritos, se ha determinado el valor del gradiente geotérmico para cinco de los sondeos de la zona de estudio, de los cuales disponemos de información de registros geofísicos o algún informe que nos indica los valores de temperatura medidos en los sondeos.

Contamos con información de valores de temperatura para el sondeo Benejúzar-1, San Miguel de Salinas-1, San Miguel de Salinas-2, La Mata-1 y La Marina-1. En la figura 29 se indica la posición de los sondeos profundos estudiados.

El valor del gradiente geotérmico medio es determinado a partir de los datos de temperatura de fondo de pozo (BHT) obtenidos para cada tipo de diagráfia en los sondeos profundos.

Durante la perforación, la temperatura dentro del sondeo permanece aproximadamente uniforme debido a la circulación de lodo; cuando ésta termina y el lodo permanece en reposo dentro del sondeo, después de cierto tiempo (que puede ser de semanas o incluso meses), se alcanza el equilibrio térmico entre la formación y el lodo dentro del sondeo. En estas circunstancias la temperatura y gradiente geotérmico medido en el sondeo son representativos de la temperatura y gradiente geotérmico en las formaciones geológicas. Cuando el equilibrio térmico se logra dentro del sondeo, el gradiente geotérmico medio (G) puede ser estimado a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Gradiente geotérmico} = \Delta T / \Delta z$$

Donde  $\Delta T$  es la variación de la temperatura medida en el intervalo de profundidades  $\Delta z$  (Correia *et al.*, 2009).

El gradiente geotérmico, G, en el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad utilizada es K/m (kelvin por metro), pero normalmente en la práctica, la unidad utilizada es °C/km (grado Celsius por kilómetro) (Correia *et al.*, 2006).

Los valores de temperatura obtenidos en los sondeos generalmente han sido perturbados por el proceso de perforación, lo que implica la necesidad de aplicar correcciones (Correia *et al.*, 1990).

En nuestro caso no se han podido aplicar las correcciones a los valores de temperatura porque no disponemos de los datos para realizarlos, es decir, no conocemos los tiempos de circulación del lodo ni los tiempos de determinación de las temperaturas de fondo de pozo (BHT) para cada diagráfia. Por lo que para estimar el gradiente geotérmico utilizamos el valor medio de temperatura del aire y las temperaturas (BHT), medidas en cada perforación, sin ningún tipo de corrección.

Según el Atlas Climático Ibérico elaborado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), para la zona de estudio, los valores medios anuales de la temperatura media del aire en Alicante son de 17°C. Así, para cada perforación, el gradiente medio fue estimado calculando, por regresión lineal, la recta que mejor se adapta a las temperaturas medidas en cada sondeo (BHT) y la temperatura en superficie (17°C).

Para el sondeo Benejúzar-1 la metodología para estimar el gradiente geotérmico es diferente ya que presenta indicios de circulación de agua a través de la perforación.

Debe tenerse en cuenta que las temperaturas utilizadas no sufren ninguna corrección y por tanto, los gradientes geotérmicos estimados pueden presentar errores elevados, del orden de algunos grados Celsius por kilómetro, por consiguiente, debe tenerse en cuenta sólo como información cualitativa.

En la descripción de cada sondeo del apartado 4.1.3. se indican los resultados obtenidos y las gráficas temperatura/profundidad elaboradas para cada uno de ellos. En las tablas del Anexo III se indican los valores utilizados para la realización de los gráficos en cada sondeo.

Por lo general, los valores obtenidos de gradiente geotérmico en la cuenca se encuentran por encima de los valores medios, pero hay que tener en cuenta, como ya se ha mencionado, que no se han corregido, desconocemos el error que pueden presentar.

## **Permeabilidad**

La permeabilidad ( $k$ ) es una medición de la facilidad con que los líquidos fluyen a través de una formación, en general la unidad de medida es el milidarcy (mD). Para el cálculo de la permeabilidad, es útil el registro de potencial espontáneo (SP), este registro permite detectar las capas permeables e impermeables en los materiales que atraviesan, obtenemos una estimación cualitativa de la permeabilidad.

La presencia de una deflexión negativa de SP puede ser un indicador de permeabilidad en una zona particular, la ausencia de deflexión no es indicador de ausencia de permeabilidad, igualmente en una zona que presente una deflexión SP más amplia no es necesariamente la zona más permeable, lo mismo ocurre si en la zona existe una deflexión menor, esto no significa que tenga menos permeabilidad.

Un indicador positivo para la formación almacén es que su permeabilidad sea superior a 300 mD (Chadwick *et al.*, 2008). Si la permeabilidad de la roca es baja la inyección ocasionaría un aumento de la presión del fluido centrado en el punto de inyección. El valor de la permeabilidad puede medirse en laboratorio a partir de testigos.

Para ser permeable una roca debe tener poros interconectados o fracturas, existe cierta relación entre la porosidad y la permeabilidad.

Hay que tener en cuenta que un valor alto de porosidad no tiene que ir acompañado de un valor alto de permeabilidad, hay ciertas clases de arenas que tienen altas porosidades pero sus granos son tan pequeños que no permiten el paso de líquidos con facilidad, por lo que sus permeabilidades pueden ser muy bajas, en cambio en otras formaciones como las calizas, pueden presentar fracturas o fisuras por las que el resultado de la permeabilidad sea muy alto, pero la porosidad sea muy baja.

Este valor también puede verse afectado por la disposición y variaciones del tamaño de grano de las capas que constituyen una formación favorable, presentando grandes diferencias en la horizontal con respecto a la vertical. Sería el caso de una formación detrítica multicapa constituida por niveles de distinto tamaño de grano (limos-arenas-arcillas).

## **Resistividad**

La unidad de resistividad usada en el perfilaje electrónico es el ohmio-metro<sup>2</sup>/metro (abreviado ohmio-m<sup>2</sup>/m). La conductividad eléctrica es el recíproco de la resistividad y se expresa en milimhos por metro (mmho/m).

Las mediciones de resistividad son básicas en las determinaciones de saturación de agua. Las mediciones de resistividad se emplean solas y en combinación para determinar la resistividad en la formación no invadida por el lodo de perforación (llamada resistividad verdadera,  $R_t$ ). El equipo usado para medir este parámetro es el Doble Laterolog (LLD), debido a que su alcance de lectura lateral llega a salvar la zona invadida cercana a las paredes del pozo. A partir de este registro podemos calcular la resistividad del agua de formación ( $R_w$ ). También en formaciones limpias se puede determinar  $R_w$  a partir de las lecturas del SP, empleando la ecuación del potencial espontáneo estático.

## **Salinidad**

Un criterio fundamental para ubicar un posible almacén de CO<sub>2</sub> es que se encuentre saturado en agua salada, con un valor de salinidad >10.000 mg/l. Este es el valor considerado por las Normas Americanas para calificar un acuífero como no recurso.

Este valor puede ser calculado a partir del análisis de diagráfias, la resistividad medida por la sonda es función de la porosidad y de la resistividad del agua de formación, que a su vez es función de la salinidad del agua y la temperatura de la formación. Se parte de la fórmula de Archie.

La cantidad de sal en el agua como regla general, aumenta con la profundidad, por lo tanto a medida que aumenta la cantidad de sal en el agua, la resistividad disminuye, porque los iones salinos son los conductores de esa electricidad. El aumento de la salinidad con la profundidad se debe al efecto "esponja" durante la compactación y diagénesis. La expulsión del agua marina contenida en los depósitos va acompañada de una retención de parte de los iones salinos en la matriz de los sedimentos. Por ello, a mayor profundidad más concentración de iones salinos en el agua "connata" residual, después de la expulsión de parte de esa agua.

## **Densidad de formación**

En cuatro de los sondeos profundos estudiados contamos con el registro de densidad, en Benejúzar-1, San Miguel de Salinas-1, San Miguel de Salinas-2 y Rojas-1.

Con este registro obtenemos los valores de densidad total aparente. Para areniscas, calizas y dolomías la densidad total aparente es prácticamente igual a la densidad total. Para algunas substancias, tales como sal, yeso, anhidrita, carbón y para formaciones gasíferas es necesario hacer una corrección para pasar de la lectura del perfil de densidad al valor de la densidad total.

El perfil de densidad se utiliza principalmente para cálculos de porosidad.

### 4.1.3. Descripción y resultados de los sondeos profundos

Se detalla a continuación la información general de cada uno de los sondeos, así como la interpretación y síntesis de su correspondiente columna litoestratigráfica correlacionándolas con las obtenidas en superficie según la bibliografía y los trabajos de campo efectuados durante la realización de esta tesis.

#### 4.1.3.1. Sondeo Benejúzar-1

Este sondeo está situado en el término municipal de Benejúzar (Alicante).

Las coordenadas de posición del sondeo son:

Latitud: 38° 03' 28" N                      X: 691365.52                      UTM HUSO 30

Longitud: 2° 52' 03"E                      Y: 4214691.74

Cotas:  $Z_m$  (mesa de rotación): 113 m.

$Z_s$  (cota del terreno): 110 m.

Con una profundidad total de 1.648,5 metros. Operado por la Compañía COPAREX en el año 1968.

El sondeo se situó cerca del anticlinal existente en la zona, denominado anticlinal de Benejúzar, esta estructura coincide con una anomalía gravimétrica positiva.

Se trata de un pliegue asimétrico, con una dirección media N90E, presenta el flanco septentrional más buzante que el meridional, y en su flanco norte se sitúa un pequeño pliegue anticlinal de varios cientos de metros de longitud probablemente ligado a una geometría irregular en profundidad del accidente del Bajo Segura (Alfaro, 1995).

La serie litoestratigráfica del sondeo, obtenida de su informe final (tomando como nivel de referencia  $Z_m$ ) es la siguiente:

**0-83 m:** Yeso masivo cristalino con intercalaciones de marga plástica gris clara.

**83-118 m:** Marga gris clara plástica, con algunas pasadas arcillo-arenosas duras, gris oscuro.

**118-220 m:** Alternancia de margas plásticas, gris claro a gris amarillento (en la parte superior) y arenisca fina con cemento calizo arcilloso, gris a gris pardo.

**220-451 m:** Marga gris clara a gris azul, plástica.

**451-462 m:** Marga gris clara a gris azul, plástica, con pasadas de arenisca fina gris con cemento calizo arcilloso.

**462-577 m:** Marga gris con intercalaciones de arena fina con cemento calizo-arcilloso, que se hacen más abundantes hacia la base del intervalo.

**577-596 m:** Alternancia de marga gris plástica, y de arenisca fina, gris, con cemento calizo-arcilloso.

**596- 625 m:** Arenisca fina, dura, con cemento calizo-arcilloso. Pasadas margosas.

**625–654 m:** Arenisca fina, dura, con cemento calizo–arcilloso. Localmente pasadas margosas. Calcita y pirita.

**654-916 m:** Marga gris alternando con arenisca fina, con cemento calizo arcilloso, localmente micácea, microconglomerática. Algunas pasadas conglomeráticas más abundantes hacia la base con elementos de cuarcita gris-azulada, arcillitas rojas, cuarzo, caliza microcristalina.

**916-1.261 m:** Alternancia de arenisca fina, gris a gris pardo, localmente micácea, glauconítica con cemento calizo-arcilloso y de arcilla caliza localmente limosa o arenosa. Intercalaciones de conglomerado poligénico más abundante en la parte inferior del intervalo, y predominantes entre 1.174 y 1.261 m.

**1.261-1.326 m:** Arenisca fina, gris, parda, poligénica, con cemento calizo arcilloso. Intercalaciones de arcilla gris. Algunas pasadas de conglomerado poligénico, a base de elementos de micaesquistos y cuarzo, más raramente de dolomía y caliza.

**1.326-1.349 m:** Conglomerado poligénico, a base de elementos de micaesquistos y cuarzo y más raramente de dolomía. Intercalaciones de arenisca fina, gris parda, con cemento arcilloso-calizo. Escasas intercalaciones de arcilla gris.

**1.349-1.384 m:** Arenisca fina, gris parda, con cemento calizo o arcilloso dolomítico y caliza arenosa gris parda, arcillo dolomítica. Algunas pasadas conglomeráticas de elementos de micaesquistos, cuarzo y dolomía.

**1.384-1.499 m:** Alternancia de conglomerado poligénico (elementos de micaesquistos, cuarzo y caliza), de arenisca fina, gris parda, localmente glauconítica, con cemento calizo arcillosa gris a

gris parda, de aspecto brechoide (en particular de 1.416 a 1.441 m). Intercalaciones de arcilla blanca a gris localmente dolomítica, más abundantes hacia la base del intervalo. Calcita, pirita y restos lignitosos.

**1.499-1.614 m:** Alternancia de arcilla finamente limosa, violácea, de arcilla gris a verdosa localmente yesosa y dolomítica, de anhidrita blanca y de dolomía gris verde a gris oscuro brechoide a microcristalina. Dolomías dominantes entre 1.499 y 1.523 m. Pasadas areniscosas a cuarcíticas, grises, rojizas o verdosas, que se hacen más abundantes hacia la parte inferior.

**1.614-1.648,5 m:** Alternancia de arcilla gris a gris verde clara, limosa, localmente dolomítica, de anhidrita, de arenisca más o menos cuarcítica blanca a parda, de limolita roja y de micaesquisto blanco a gris verdoso; (los micaesquistos dominan en la zona inferior).

### **Interpretación y síntesis del sondeo Benejúzar-1:**

Según el informe final del sondeo y el análisis de las diagráfias digitalizadas, realizamos la descripción detallada del sondeo Benejúzar-1, considerando los niveles almacén-sello más importantes.

En el caso del sondeo Benejúzar-1 contamos con información de las diagráfias a partir de los 250 metros, y los tipos de registro son: gamma ray (Gr), caliper, sónico (DT), densidad (RHOB), potencial espontáneo (SP) y resistivos (LLD).

De los 250 a 370 metros tenemos margas con ligeras pasadas de arcilla arenosa, observando la geometría del sondeo se observan varios derrumbes a 255 m, 280 m y 325 m.

A partir de 370 m seguimos con margas pero estas presentan más pasadas de arcilla arenosa, a los 600 metros comienzan las areniscas finas hasta los 650 metros, a partir de aquí volvemos a encontrar margas arenosas

En este sondeo consideramos niveles sellantes hasta los 600 metros de profundidad, teniendo en cuenta que las margas o mudstone impermeables de la Formación Torremendo se disponen inmediatamente sobre los niveles calcareníticos de la Formación Pujálvarez y Columbares. Del tramo, detrítico-carbonatado, considerando las diagráfias se ve en principio más favorable como almacén desde los 1.200 m hasta los 1.450 m, ya que el contenido arcilloso es menor.

Vemos como la formación almacén es más heterogénea que en el borde norte al poseer a techo de los niveles calcareníticos y de conglomerados considerados como Fm. Columbares otros niveles margosos y de areniscas de grano fino. Ello es consecuencia de la evolución litológica de la cuenca desde el borde hacia el centro según se esquematiza en la figura 30.

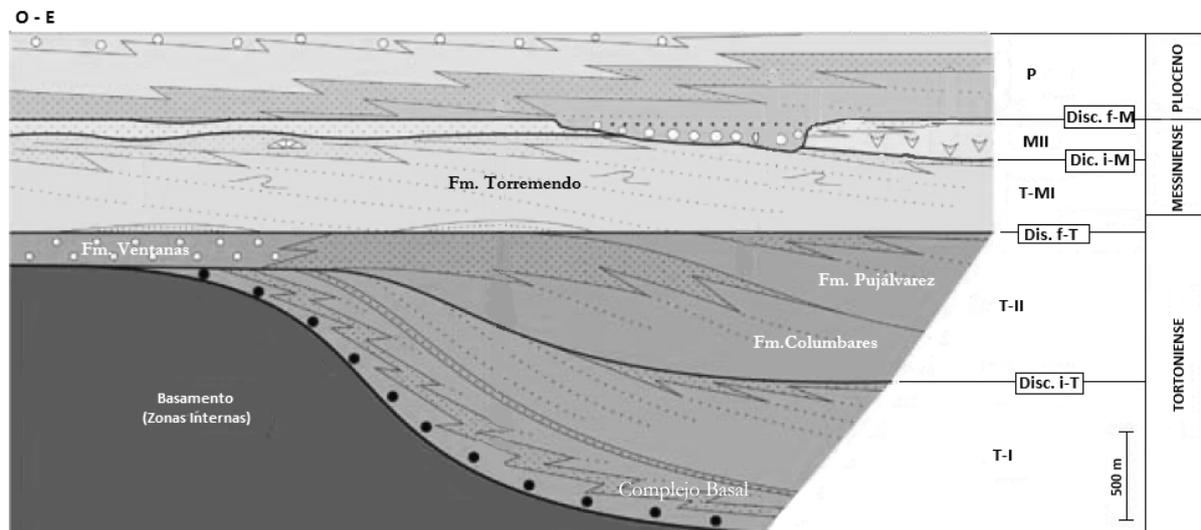


Figura 30. Esquema de la evolución litológica de la Cuenca del Bajo Segura en el sector sur.

La denominada como Formación Pujálvarez del sector sur se considera equivalente en el sector norte de la cuenca a la Formación de las Calcarenitas de Las Ventanas (Corbí, H. 2010).

Y por último consideramos en principio como almacén el tramo de dolomías triásicas del basamento, a partir de los 1.510 metros.

En primer lugar se diferencian los tramos que se consideran más interesantes como formaciones almacén-sello, más adelante se detallan las características petrofísicas de cada tramo y se seleccionan los más favorables según los resultados obtenidos.

Desde el comienzo del sondeo hasta los 608 metros: denominado como Sello-1, los primeros 83 metros de yeso masivo y a continuación margas grises plásticas con intercalaciones arenosas de la Formación Torremendo.

De 608 a 655 m: nivel de areniscas finas Tortonienenses. Almacén-1. A partir de 655 hasta los 916 m, nuevamente margas grises y areniscas finas con intercalaciones conglomeráticas. Este tramo está constituido por la Formación Pujálvarez considerada como almacén, equivalente en el sector

norte a las calcarenitas de las Ventanas, aunque en este sondeo se encuentra constituida principalmente por margas, salvo el tramo de areniscas finas superior.

De 916 a 1.261 m: denominado Almacén-2, Formación Columbares. Constituido por areniscas finas y conglomerados poligénicos. Este tramo formado por alternancia de areniscas fina con cemento calizo arcilloso es considerado en principio como almacén, si bien el cemento arcilloso carbonatado altera las posibilidades y perturba la interpretación cuantitativa de las diagrfias. Dentro de este tramo se considera como semipermeable hasta los 1.100 metros, a partir de esta profundidad hasta los 1.261 metros se trata de una formación acuífera no explotada, entre los 1.130 y 1.261 m, formada por conglomerados poligénicos con alternancia de arenisca fina de cemento calizo arcilloso que pueden presentar valores más altos de permeabilidad.

De 1.261 a 1.499 m: Denominado Complejo Basal o Almacén-3 constituido por arenisca fina, con pasadas de conglomerado poligénico. Formación semipermeable.

A partir de 1.499 m hasta el final del sondeo, 1.648,5 m: Denominado Almacén-4, formado por calizas, dolomías y arcillas. Las dolomías se encuentran principalmente entre los 1.500 a 1.530 m, después le sigue alternancia de arcillas, dolomías, anhidrita y arenisca.

Los carbonatos triásicos presentan en este sondeo una alta resistividad, enmascarada en la diagrfia por la presencia de fluido salino, lo que indica su falta de karstificación y por tanto su dudoso interés como buen almacén.

La figura 31 muestra la columna litológica sintética del sondeo Bnejúzar-1, indicando el nombre de las formaciones consideradas en este estudio más importantes en cuanto a formaciones almacén/sello.

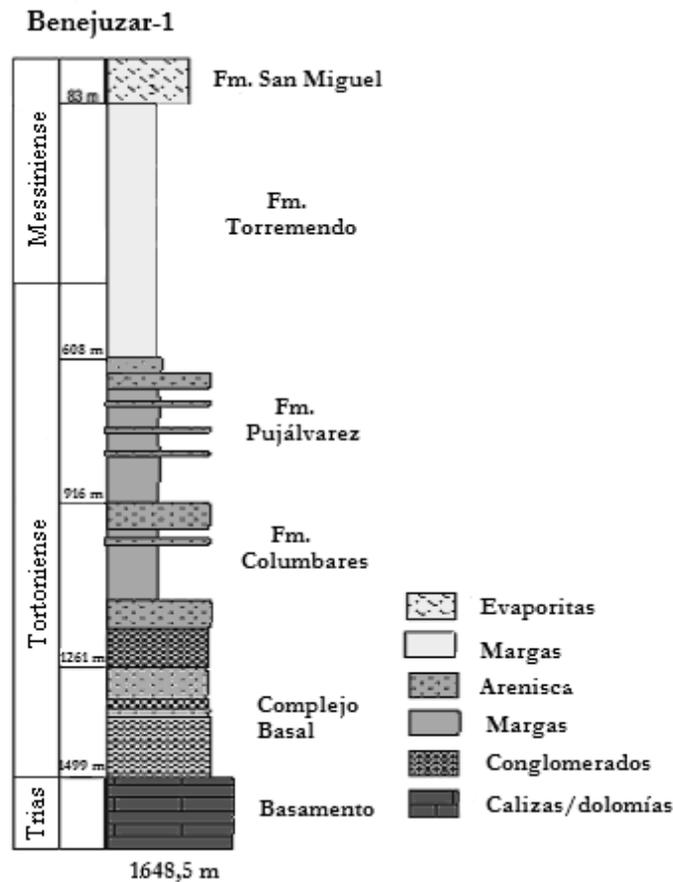


Figura 31. Columna litológica sintética del sondeo Benejuzar-1.

## Resultados

Dentro de lo que hemos definido en general como tramos almacén-sello por su litología descrita en el informe final, en esta tesis mediante el análisis y reinterpretación de las diagráfias del sondeo se aportan diferentes valores petrofísicos como porosidad a partir del sónico ( $\Phi_{\text{Sónico}}$ ), porosidad de densidad ( $\Phi_{\text{Densidad}}$ ), resistividad ( $R_w$ ), porcentaje de arcillas ( $V_{\text{sh}}$ ), densidad, temperatura ( $T^a$ ), salinidad, potencial espontáneo (SP) y valores de porosidad de neutrón ( $\Phi_N$ ) (Tabla 10).

Los valores obtenidos, permiten detallar los metros de las formaciones consideradas como almacén y sello.

Tramos(m)	Litología	ΦSónico (%)			ΦDensidad (%)			Rw (Ωm)			Rt (Ωm)	Vsh (%)	ΦN (%)	T <sup>a</sup> (°C)	Salinidad (g/l)	SP (mV)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
		Media	Mín	Máx	Media	Mín	Máx	Media	Mín	Máx							
<b>Sello 1</b> 250-608	Margas	54	23	74	17	5	34					45		45			2,51
<b>Almacén-1</b> 608-655	Areniscas	17	3	34	8	3	14	0,07	0,01	0,24	5	26	7-22	51	40	-25	2,51
<b>Almacén-2</b> 916-1.189 1.189-1.261	Areniscas y conglomerados	15	3	31	$\frac{2}{6}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{10}{12}$	0,02	0	0,06	10	51	23-34	$\frac{60}{63}$	$\frac{45}{60}$	-30	2,62
<b>Almacén-3</b> 1261-1340 1340-1450 1450-1500	Areniscas y conglomerados	12	8	21	$\frac{2}{2}$ $\frac{2}{5}$	$\frac{0}{0}$ $\frac{0}{0}$	$\frac{5}{12}$ $\frac{31}{31}$	0,03	0	0,11	10	56	16-26	$\frac{66}{70}$ $\frac{71}{71}$	48		2,58
<b>Almacén-4</b> 1514-1530	Calizas y dolomías	8	2	15	1	0	28	0,08	0	0,31	60-80	46	5-12	72	65	-35	2,62

Tabla 10. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo Benejúzar-1

En el análisis de las diagráfias obtenemos valores muy buenos de porosidad para el primer tramo del denominado como Almacén-1, constituido por areniscas, comprendido entre los 608 y 655 metros. Se trata de arenisca fina, con cemento calizo-arcilloso y con porosidades calculadas con el registro sísmico del 17% de media y con el de densidad del 8% de media, presenta un 26 % de volumen de arcilla y  $2,51 \text{ g/c}^3$  de densidad. La salinidad es del orden de 40 g/l. La porosidad neutrón está estimada entre el 7-22% para este tramo.

El segundo almacén estudiado en este sondeo, y denominado Almacén-2, entre los 916 y 1.261 m, compuesto de alternancia de arenisca fina, localmente micácea con cemento calizo arcilloso, para su mejor estudio lo dividimos en varios tramos, un primer tramo más areniscoso y un segundo tramo conglomerático entre los 1.189 y 1.261 m. Las porosidades obtenidas son de valores del 15% de media de porosidad sísmica. Con salinidades del orden de 45 g/l,  $60^\circ\text{C}$  y porosidad neutrón estimada del 23 al 34%. El porcentaje de arcillas calculado a partir del registro de gamma ray es del 51 %.

A partir de 1.261 metros en el sondeo, cortamos el denominado Complejo Basal (Almacén-3), formado por areniscas finas, conglomerados poligénicos e intercalaciones de arcilla, este almacén también es dividido en varios tramos, resultando que de 1.261 a 1.340 m la porosidad sísmica es más elevada, del orden del 12%. La densidad es de  $2,58 \text{ g/c}^3$  y presenta un 56% de volumen de arcillas.

El almacén de dolomías triásicas (Almacén-4) entre los 1.514 y 1.530 metros la porosidad sísmica es del 8% y de porosidad medida con el registro de densidad del 1%, este último es un valor muy bajo según los parámetros necesarios, en cuanto a esta propiedad, que debe de cumplir un buen almacén. En cuanto al porcentaje de arcillas es del 46%, la densidad  $2,62 \text{ g/c}^3$ , presenta una temperatura de  $72^\circ\text{C}$  y una salinidad de 65 g/l.

Para el cálculo del gradiente geotérmico del sondeo Benejúzar-1, dividimos los datos en dos tramos, como se observa en la figura 32.

El valor del gradiente para el primer grupo de valores, G1, (color azul) es de  $4,78^\circ / 100 \text{ m}$ , para el segundo tramo, G2, (color rojo), el valor es de  $1,88^\circ / 100 \text{ m}$ .

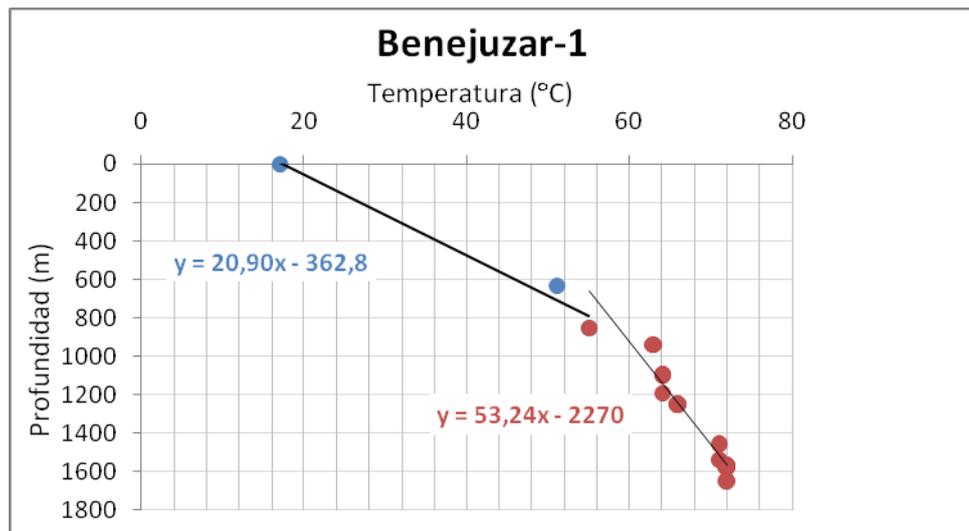


Figura 32. Gráfico  $T^\circ/\text{Prof.}$  del sondeo Benejúzar-1.

El motivo por el que se dividen los tramos es obtener el valor del gradiente más fiable teniendo en cuenta que no disponemos de datos corregidos. Si con todos los datos del sondeo elaboramos una ecuación lineal (Fig. 33) el resultado del gradiente es de  $3,2^\circ / 100 \text{ m}$ , pero se observa que los datos no se ajustan lo suficiente y la extrapolación a la temperatura de superficie daría un valor mucho más elevado que el valor medio de  $17^\circ\text{C}$ .

En el caso de la representación mediante una ecuación polinómica (Fig. 34) la curva de distribución de la temperatura en función de la profundidad (considerando que la temperatura media del aire es de  $17^\circ\text{C}$  en la superficie) corresponde con una situación de circulación de agua. Por esta razón, es más exacto decir que hay dos gradientes geotérmicos como resultado del régimen hidrodinámico dentro de la perforación. De hecho, si la variación de la temperatura con la profundidad en el sondeo fuera lineal, la extrapolación de la temperatura de la superficie debería ser aproximadamente de  $17^\circ\text{C}$ , sin embargo, utilizando únicamente los datos de temperatura (BHT), la extrapolación de la recta de regresión lineal a la superficie da una

temperatura de aproximadamente 42°C, este es un valor extremadamente elevado para la temperatura media en superficie en la región donde los sondeos están localizados.

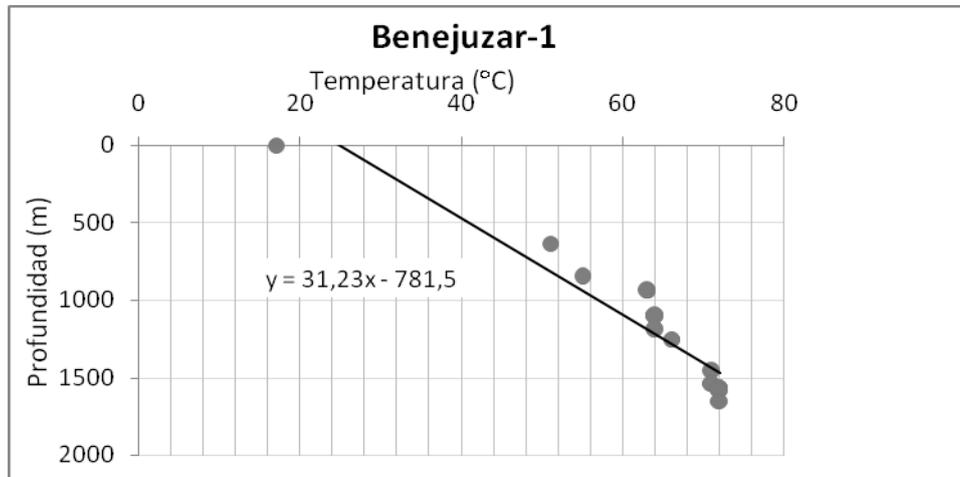


Figura 33. Gráfica T<sup>a</sup>/Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo Benejúzar-1.

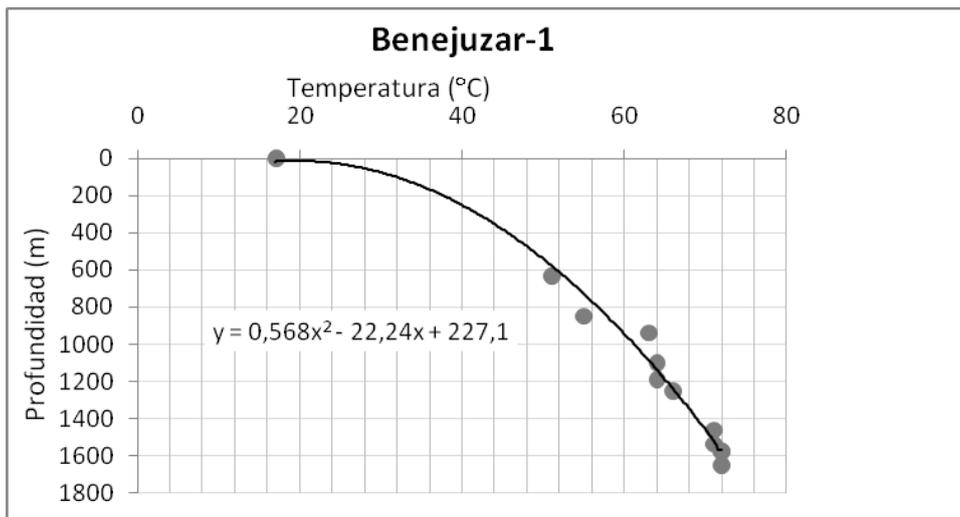


Figura 34. Gráfica T<sup>a</sup>/Prof., caso de ecuación polinómica. Sondeo Benejúzar-1.

#### 4.1.3.2. Sondeo La Marina-1

El sondeo La Marina-1, se encuentra ubicado en el municipio de San Fulgencio (Alicante). Se sitúa en las proximidades del eje anticlinal de Las Planas, de dirección E-W. Es una trampa estructural cerrada de entre 15-20 km<sup>2</sup>.

Las coordenadas de posición del sondeo son:

Latitud: 38° 08' 44,60" N            X: 705187,95            UTM HUSO 30

Longitud: 0° 39' 30,80"W            Y: 4224644,92

Cotas:  $Z_m$  (mesa de rotación)=74,5 m

$Z_s$  (cota del terreno)= 72 m

Posee una profundidad total de 1.610 metros. Operado por la Compañía de Investigación y Explotaciones Petrolíferas, S.A (CIEPSA) en el año 1951.

La columna litológica del sondeo, según la información obtenida de las microfichas escaneadas es la siguiente:

**0-10 m:** Calizas y margas arenosas.

**10-54 m:** Arenisca de cemento calizo y caliza arenosa. Pasadas de margas arenosas.

**54-230 m:** Marga ligeramente micácea y arenosa.

**230-275 m:** Marga arenosa y anhidrita. Pasadas de carbonatos.

**275-408 m:** Anhidritas con pasadas de margas

**408-449 m:** Arcillas margosas calcáreas.

**449-554 m:** Margas con pasadas de areniscas hacia la base.

**554-660 m:** Arcilla calcárea con trazas de anhidrita y areniscas

**660-735 m:** Arcillas calcáreas y areniscas.

**735-880 m:** Arcillas calcáreas con pasadas calizo-dolomíticas en la base.

**880-925 m:** Areniscas, micritas y conglomerados.

**925-1.130 m:** A techo brecha calizo-dolomítica (925-1.100 m). Calizas e intercalaciones de arcillas.

**1.130-1.507 m:** Caliza dolomítica gris a gris-negra con intercalaciones arcillosas.

**1.507-1.544 m:** Conglomerados calcáreos abigarrados, con pasadas arcillosas.

**1.544-1.596 m:** Calizo-dolomía azulada y margosa.

**1.596-1.610 m:** Ofitas.

### **Interpretación y síntesis del sondeo La Marina-1:**

De este sondeo contamos con poca información en cuanto a registros. Disponemos del SP y de resistividad (log eléctricos), de los cuales se pueden estimar valores de porosidad y salinidad de las aguas de formación.

La columna litológica del sondeo (Fig. 35) comienza con 50 metros de arenisca calcárea, seguidos de margas grises, que podrían corresponder a la Formación Rojas y Hurchillo del Plioceno.

Bajo estas margas se encuentra, hasta los 450 metros, la Formación San Miguel constituida por los yesos cristalizados con intercalaciones de margas arcillosas.

La Formación de Margas de Torremendo alcanza en este sondeo un espesor de 430 m, antes de la discontinuidad basal se encuentran 45 m de areniscas que se corresponden con la Formación Columbares, éste sería el almacén más importante definido en este sondeo, corresponde con el Almacén-2 del sondeo Benejúzar-1, sobre él se dispone un sello de más de 800 m de margas y yesos, que sería correlacionable con el Sello-1 formado por anhidritas y margas del sondeo Benejúzar-1.

En el sondeo La Marina-1 no existe el Almacén-1 como se encuentra en el sondeo Benejúzar-1. Tampoco contamos con el denominado como Complejo Basal (Almacén-3), pero sí se perfora una potente sucesión de calizo-dolomías correspondientes al denominado Almacén-4, Triásico, desde los 925 m hasta prácticamente el final del sondeo a los 1.596 m, entre ellas (a la profundidad de 1.507 m) se perfora un nivel de 40 m de conglomerados.

En resumen, contamos con la formación sello constituida por más de 800 metros de margas y yesos, sobre la formación almacén de areniscas con 45 m de espesor y bajo estas más de 600 m de calizas triásicas favorables en un principio también como almacén, y estudiadas como tal.

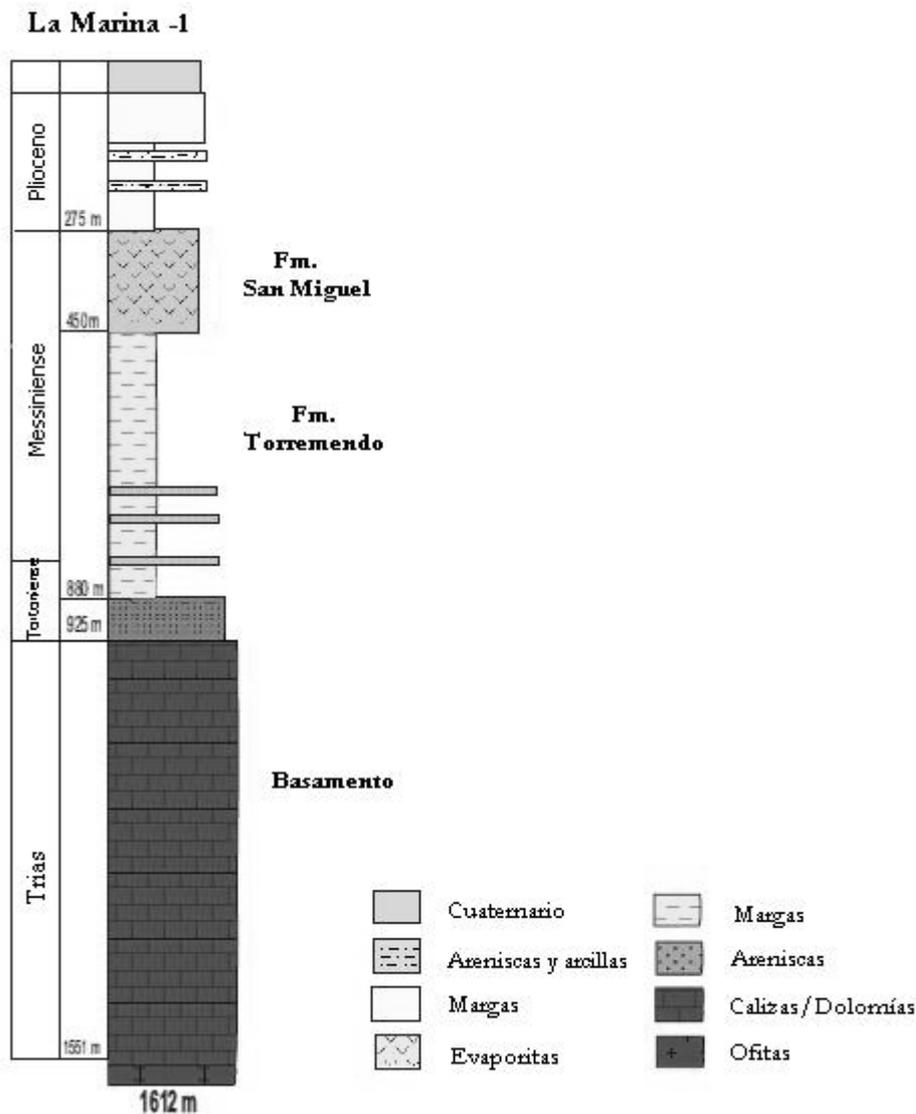


Figura 35. Columna litológica sintética del sondeo La Marina-1.

## Resultados

De este sondeo contamos con el registro de potencial espontáneo y de resistividad.

La información es mucho menor comparada con el sondeo descrito anteriormente. En este, del tramo almacén en principio más favorable por sus características litológicas, las areniscas y conglomerados perforados entre 880 m y 925 m, no disponemos de valores de porosidad ni permeabilidad. Contamos con el valor de salinidad de 35g/l, un valor adecuado ya que es mayor a

los 10g/l que indican las normas americanas como suficiente para considerar el acuífero como no recurso.

En el tramo del Almacén-4 entre 925 m y 1.000 m el valor de salinidad también es el adecuado, con 20 g/l, y al ser un valor más bajo resulta más conveniente para el proceso de almacenamiento ya que la solubilidad del CO<sub>2</sub> disminuye al aumentar la salinidad. En este mismo almacén, entre 1.140 m y 1.330 m aumenta la salinidad hasta los 40 g/l (Tabla 11).

Tramos (m)	Litología	T <sup>a</sup> (°C)	Salinidad (g/l)	SP (mV)	Rw (Ωm)	Rt (Ωm)
<b>Almacén-2</b> 880-925 m	Areniscas	52	35	-60	0,12	10-18
<b>Almacén-4</b> 925-1.000	Calizo-dolomías brechoides	54	20	-30	0,17	
1.140-1.330	Calizo-dolomías	65	40	-50	0,08	

Tabla 11. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo La Marina-1.

El gradiente geotérmico del sondeo es de 3,66 °C/100 m, es el valor más bajo de los sondeos en los cuales se ha calculado el gradiente, si descartamos el valor del sondeo Benejúzar-1. En la figura 36 se ilustra la ecuación lineal obtenida para los datos de temperatura-profundidad del sondeo La Marina-1.

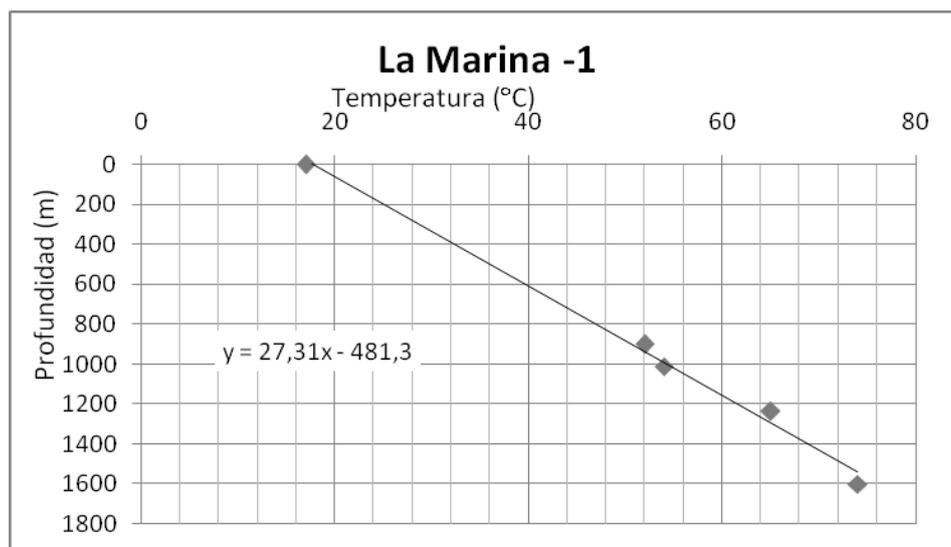


Figura 36. Gráfica T<sup>a</sup>/Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo La Marina-1.

#### 4.1.3.3. Sondeo La Mata-1

El sondeo La Mata-1 está ubicado a menos de 1 km en dirección N-NW, de Torrelamata (Alicante). Las coordenadas de posición del sondeo son:

Latitud: 38° 02' 4,60"N      X: 705499,01      UTM HUSO 30

Longitud: 0° 39' 30,80"W      Y: 4212312,98

Cotas:  $Z_m$  (mesa de rotación) = 11,6 m

$Z_s$  (cota del terreno) = 8,6 m

El sondeo tiene una profundidad total de 829 metros. Operado por la Compañía COPAREX en el año 1970.

Está situado en el flanco sur de una estructura sinclinal, situada al norte de la cubeta de Torreveja, en una zona de zócalo elevado.

Se describe a continuación los materiales atravesados por el sondeo, según la información obtenida en las dependencias del IGME:

**0-23 m:** Arenas y calizas arenosas.

**23-58 m:** Areniscas con pasadas de calizas arenosas

**58-449 m:** Margas con pasadas areniscosas.

**449-549 m:** Anhidritas y margas

**549-618 m:** Margas y areniscas en la base

**618-657 m:** Margas con pasadas calizas.

**657-759 m:** Conglomerados de elementos dolomíticos, anhidríticos y ofíticos, areniscas. Cemento arcillo-anhidrítico.

**759-779 m:** Dolomías y anhidritas.

**779-812 m:** Anhidritas.

**812-829 m:** Dolomías.

### Interpretación y síntesis del sondeo La Mata-1:

En este sondeo (Fig. 37) hasta los 657 m de profundidad se cortan materiales sellantes, margas y anhidritas. El primer tramo almacén se considera desde los 657 m hasta los 759 m. Se trata del denominado Almacén-2, el cual comienza con areniscas calcáreas seguidas de conglomerados con cemento arcilloso, intercalados con niveles de margas areniscosas.

Como segundo almacén definimos las dolomías del Triásico (Almacén-4) intercaladas con anhidritas que se encuentran a partir de los 759 m hasta el final del sondeo.



Figura 37. Columna litológica sintética del sondeo La Mata-1.

### Resultados

Se corta un potente sello de prácticamente 657 m de materiales margosos y anhidríticos. El primer almacén considerado, desde los 657 m hasta los 685 m está compuesto por areniscas calcáreas beige seguidas de conglomerados y areniscas arcillo calcáreas, con valores de porosidad, calculados a partir del registro de densidad, del 13%, un valor favorable para considerarlo almacén. Le sigue un espesor de unos 28 m de margas y a continuación unos 30 m de conglomerado poligénico con elementos de dolomía cristalina, con valores obtenidos del 7% de porosidad, y por último las dolomías triásicas (Almacén-4) donde la porosidad se ve incrementada hasta el 13% en el tramo de 760 a 775 m (Tabla 12).

Tramos (m)	Litología	Φ Densidad (%)			Rw (Ωm)			Densidad (g/c³)	Vsh (%)	Tª (°C)	Salinidad (g/l)	SP (mV)
		Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.					
<b>Sello 1</b> 280-657	Margas y evaporita	21	0	34						45		
<b>Almacén-2</b> 657-710 ----- 710-740	Areniscas y conglomerados	13 ----- 7	4 ----- 4	20 ----- 34	0,04 ----- 0,02	0 ----- 0	0,11 ----- 0,22	2,25-2,35 ----- 2,6	25-30 ----- 20	47 ----- 48	17 ----- 35	-10 ----- -25
<b>Almacén-4</b> 760-775 ----- 812-829	Dolomías	13 ----- 4	0 ----- 0	21 ----- 15	0,14	0	0,34	2,8	20	50 ----- 52	30	-20

Tabla 12. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo La Mata-1.

El gradiente geotérmico del sondeo es de 4,41 °C/100 m, es un valor parecido al del sondeo de San Miguel de Salinas-1, como en los casos anteriores, este valor de gradiente asegura que a 800 m de profundidad el CO<sub>2</sub> podrá encontrarse en estado supercrítico,. En la figura 38 se ilustra la ecuación lineal obtenida del sondeo La Mata-1.

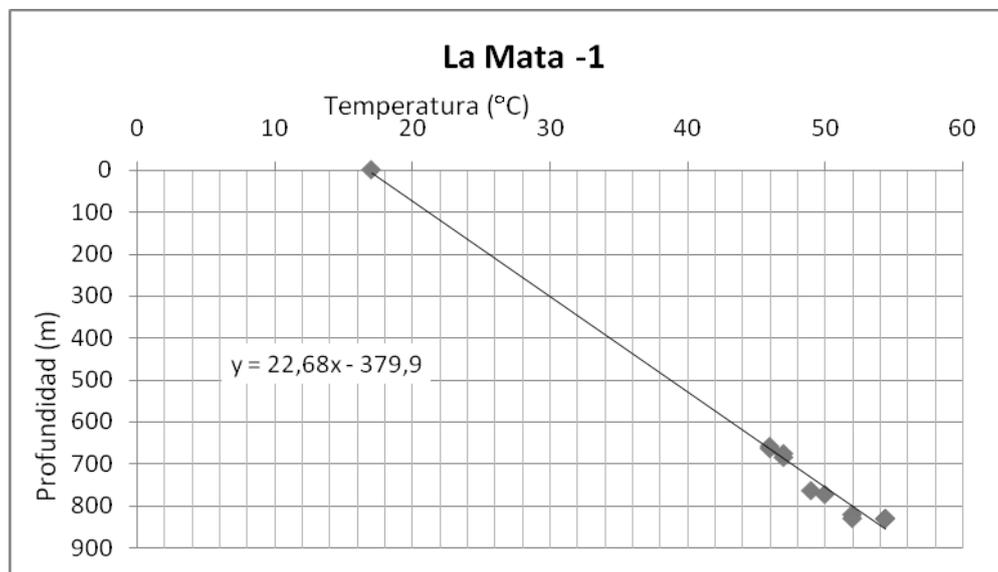


Figura 38. Gráfica Tª/Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo La Mata-1.

#### 4.1.3.4. Sondeo Rojas-1

El sondeo se perforó en las proximidades de la localidad de Rojas.

Las coordenadas de posición del sondeo son:

Latitud: 38° 4' 34,60" N    X: 700459,69    UTM HUSO 30

Longitud: 0° 42' 52,80"W    Y: 4216815,99

Cotas:  $Z_m$  (mesa de rotación)= 82,5 m

$Z_s$  (cota del terreno)= 80 m

Esta perforación alcanzó una profundidad de 1.582 m. Operado por la Compañía CIEPSA en el año 1952.

El sondeo tenía como objetivo principal reconocer una trampa anticlinal de dirección estructural ENE-ONO alineada con la estructura de Benejúzar.

La serie cortada durante la perforación según la bibliografía obtenida:

**0-54 m:** Caliza arenosa y arenisca calcárea amarillentas.

**54-387 m:** Arcilla gris calcárea y arenosa.

**387-505 m:** Anhidrita con intercalaciones margosas.

**505-630 m:** Marga calcárea gris oscura .Lechos de lignito.

**630-1.225 m:** Margas grises variablemente calcáreas y arenosas. Intercalaciones de niveles calizos y de yeso.

**1.225-1.437 m:** Caliza dolomítica gris oscuro, compacta y cristalina. Intercalaciones arcillosas finas y trazas de yeso.

**1.437-1.582 m:** Pizarras metamórficas.

### Interpretación y síntesis del sondeo Rojas-1:

Contamos con un espesor de material sellante de más de 1.220 metros, compuesto de arcillas, anhidritas y margas principalmente. La Formación Columbares considerada como almacén en los sondeos anteriores en este sondeo no se encuentra como un nivel arenoso significativo si no como margas calcáreas con intercalaciones de caliza localmente arenosa.

A partir de 1.221 m de profundidad se cortan las calizas dolomíticas con intercalaciones de margas pardas hasta los 1.440 m, esta formación almacén triásica no es posible caracterizarla debido a la falta de registros (Fig. 39).

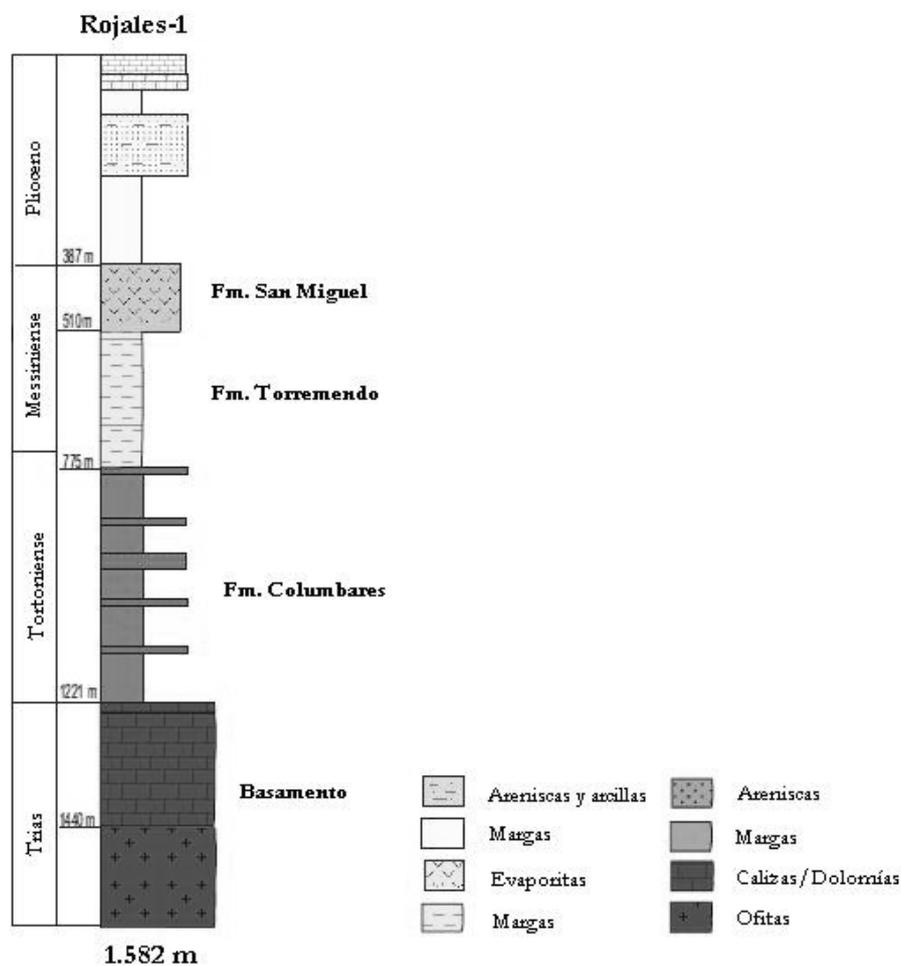


Figura 39. Columna litológica sintética del sondeo Rojas-1.

De este sondeo no contamos con información de diagráfias, no se realizó testificación geofísica por la falta de indicios e interés petrolero.

#### 4.1.3.5. Sondeo San Miguel de Salinas-1

El sondeo San Miguel de Salinas -1 se emplazó sobre una anomalía gravimétrica positiva que coincide con un anticlinal visible en los niveles miocenos, pliocenos y cuaternarios, 5 kilómetros al SW de Torrevieja (Alicante).

Las coordenadas de posición del sondeo son:

Latitud: 37° 56' 47,70"N      X: 700667,23      UTM HUSO 30

Longitud: 0° 42' 58,80"W      Y: 4202417,78

Cotas:  $Z_m$  (mesa rotatoria)= 31 m

$Z_s$  (cota del terreno)= 28 m

El sondeo tiene una profundidad total de 805 metros. Operado por la Compañía COPAREX en el año 1967

La perforación está ubicada sobre el anticlinal de San Miguel, situado entre las cubetas de Torrevieja y San Pedro del Pinatar. Se atribuye a esta estructura una superficie cerrada de aproximadamente 15 km<sup>2</sup>.

La columna litoestratigráfica del sondeo es la siguiente:

**0-16 m:** Arenisca caliza o caliza arenosa fina a media, beige.

**16-21 m:** Arcilla limosa beige, plástica

**21-51 m:** Arenisca fina a media, con cemento calizo, a veces arcilloso, beige. Niveles de caliza arenosa. Foraminíferos abundantes.

**51-412 m:** Margas limosas o finamente arenosas, beige, plásticas más carbonatadas y dolomíticas en un intervalo situado aproximadamente entre 100 y 200 m. En la base intercalaciones de arenisca fina, beige, con cemento calizo.

**412-511 m:** Yeso masivo, pulverulento o cristalino, alternando con niveles de arcilla caliza limosa gris claro.

**511-568 m:** Marga gris, plástica.

**568-657 m:** Arcilla caliza gris, a veces limosa, más dura. Presencia de glauconita.

**657-740 m:** Arenisca microconglomerática poligénica, fina a media: arenisca conglomerática y conglomerado poligénico, con elementos de caliza amarilla o gris, de cuarcita y de micasquitos. Pasadas arcillosas abundantes, visibles sobre todo en las diagráfias, en la parte alta y baja. Niveles más cementados, con toda probabilidad carbonatada. Elementos calizos dominan hacia abajo.

**740-772 m:** Caliza bréchica amarillo-beige, microcristalina a cristalina.

**772-788 m:** La misma caliza con intercalaciones de arcilla dura roja o amarilla, a veces sericítica.

**788-805 m:** Caliza microcristalina a cristalina gris a gris azulado, frecuentemente bréchica. Abundantes fracturas, fisuras y vacuolas generalmente rellenas de arcilla.

### **Interpretación y síntesis del sondeo San Miguel de Salinas-1:**

A partir del estudio de las diagráfias establecemos los siguientes tramos (Fig. 40):

Hasta los 657 m contamos con un potente nivel sellante constituido por margas limosas, yeso, arcillas y areniscas arcillosas. Los niveles almacén se presentan desde los 657 m hasta los 740 m (Almacén-2). En este caso este almacén es más heterogéneo que el equivalente delimitado en otras perforaciones, ya que comienza con areniscas arcillosas con baja porosidad y permeabilidad y continúa con litologías más favorables como areniscas y conglomerados. En cualquier caso la heterogeneidad en la porosidad-permeabilidad es un factor favorable a considerar en la selección de almacenes. A partir de los 740 m se perforan las calizas bréchicas, muy fracturadas con intercalaciones de arcillas, consideradas también como formación almacén, basamento de las Zonas Internas (Almacén-4).

**San Miguel de Salinas-1**

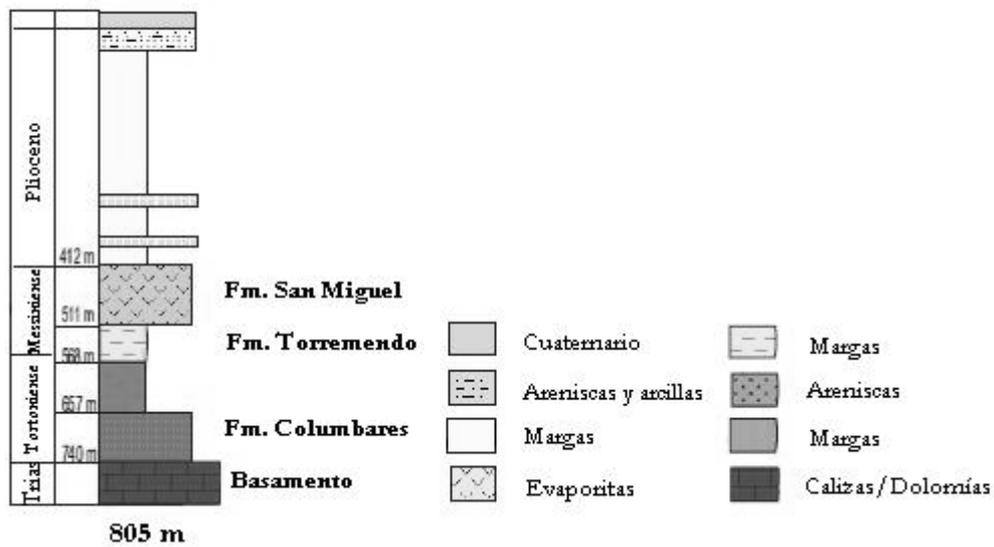


Figura 40. Columna litológica sintética del sondeo San Miguel de Salinas-1

**Resultados**

Hasta los 657 m, formación sellante compuesta de margas, evaporitas masivas, y arcillas. El primer almacén lo definimos desde los 657 m hasta los 740 m (Almacén-2), formado por arenisca microconglomerática poligénica con pasadas arcillosas, este presenta unos valores de porosidad calculados a partir del registro del sónico del 27%, el valor más elevado de todos los valores obtenidos anteriormente en los otros sondeos, aunque el valor calculado con el registro de densidad varía mucho, bajando al 8%. Seguidamente el almacén de las calizas del Triásico (Almacén-4) calculado desde 740 m hasta los 805 m, da un valor de porosidad con el registro sónico del 11% y con el registro de densidad del 2% (Tabla 13).

Tramos (m)	Litología	$\Phi$ Sónico (%)			$\Phi$ Densidad (%)			Rw ( $\Omega$ /m)			Rt ( $\Omega$ /m)	Densidad (g/c <sup>3</sup> )	Vsh (%)	T <sup>a</sup> (°C)	Salinidad (g/l)	SP (mV)	
		Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max							
<b>Sello 1</b> 410-510	Evaporitas	10	2	48	10	1	30	0,41	0,01	2,5	1-2					43	
551-568	Margas y arcillas	45	37	52	20	12	28	0,99	0,23	7,20	2-10					48	
<b>Almacén-2</b> 657-740	Areniscas	27	8	48	8	5	33	0,13	0	0,80	30-50	2,3-2,5	25	50	45-60	-35	
<b>Almacén-4</b> 740-805	Calizas	11	2	37	2	0	13	0	0	0,06	30-100	2,70	10	54	70	-55	

Tabla 13. Parámetros de las dualidades almacén-sello en el sondeo San Miguel de Salinas-1.

El gradiente geotérmico del sondeo es de  $4,64^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , es un gradiente que asegura que a 800 m de profundidad el  $\text{CO}_2$  podrá encontrarse en estado supercrítico. En la figura 41 se ilustra la ecuación lineal obtenida, para este sondeo los datos se ajustan mejor que en el caso del sondeo Benejúzar-1.

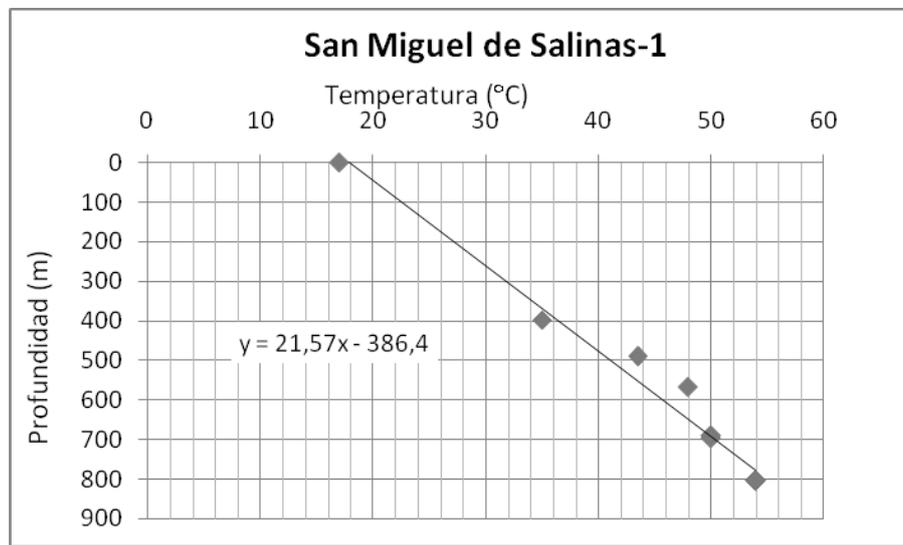


Figura 41. Gráfica  $T^a/\text{Prof.}$ , caso de ecuación lineal. Sondeo San Miguel de Salinas-1.

#### 4.1.3.6. Sondeo San Miguel de Salinas-2

Este sondeo está situado en las inmediaciones de San Miguel de Salinas (Alicante), al borde de la carretera que enlaza este pueblo con la Dehesa de Campoamor.

Las coordenadas de posición del sondeo son:

Latitud:  $37^{\circ} 58' 26,70''\text{N}$     X: 694774.53    UTM HUSO 30

Longitud:  $0^{\circ} 47' 21,80''\text{W}$     Y: 4205314.67

Cotas:  $Z_m$  (mesa rotatoria) = 53,6 m.

$Z_s$ :(cota del terreno)= 50 m

La perforación tiene una profundidad total de 1.134,5 metros. Operado por la Compañía COPAREX en el año 1970.

Está ubicado en el anticlinal de San Miguel de Salinas. El eje San Miguel corresponde a un alineamiento gravimétrico positivo existente entre las cubetas de Torrevieja y San Pedro del Pinatar.

Presenta dirección ONO-ESE, coincidiendo con una estructura observable en superficie, en los términos más elevados estratigráficamente de la serie.

Descripción detallada de la serie que cortó el sondeo:

**0-141 m:** Alternancia de yeso masivo, cristalino, translúcido, gris y blanco, de yeso sacaroide formado por agregados de granos muy finos, y de marga gris.

**141-160 m:** Marga gris plástica, localmente endurecida, pasando localmente a caliza arcillosa, débilmente limosa, gris.

**160-176 m:** Yeso masivo cristalino.

**176-204 m:** Marga gris clara, plástica, débilmente limosa.

**204-220 m:** Yeso masivo cristalino. Pasadas decimétricas a centimétricas de caliza arcillo –arenosa con inclusiones de materia orgánica negra.

**220-247 m:** Marga gris plástica, débilmente yesífera; restos de materia orgánica negra.

**247-254 m:** Yeso masivo cristalino.

**254-320 m:** Marga gris plástica con numerosas inclusiones lignitíferas; yeso cristalino difuso. Intercalaciones decimétricas de caliza arcillosa gris dura con inclusiones de materia orgánica negra.

**320-449,5 m:** Marga gris plástica con numerosas inclusiones lignitíferas e intercalaciones de caliza arcillo-arenosa gris pasando localmente a arenisca fina argilo-calcárea, con inclusiones de materia orgánica negra.

**449,5-563 m:** Marga gris, tierna, endurecida hacia la base, localmente algo limosa y piritosa, a veces glauconífera; raras pasadas decimétricas de caliza arcillosa beige. Microfauna abundante.

**563-628 m:** Marga limosa pasando a arcillosa-calcárea; gris y beige. Pasadas decimétricas de caliza bioclástica, cristalina, blanca, con abundante microfauna; inclusiones microconglomeráticas de

micaesquistos verdes, cuarzo translúcido, arenisca gris verdosa fina de cemento calcáreo y glauconífero; pirita diseminada en la caliza.

**628-724 m:** Marga limosa a finamente arenosa, gris y beige, endurecida, con pasadas decimétricas de caliza cristalina idéntica a la precedente. En el tramo de 686,3 a 695,3 m, pequeños niveles microconglomeráticos con electos centimétricos de micaesquistos verdes y blancos, cuarzo y glauconita en un cemento margoso abundante.

**724-961 m:** Limo margoso beige con granos de cuarzo translúcidos muy finos, glauconífero y piritoso, pasando localmente a arenisca muy fina micácea, piritosa y glauconífera de cemento argilo-calcáreo. Pasadas decimétricas de marga limosa, gris, plástica. Esta sección es compacta y muy homogénea.

**961-995 m:** Marga débilmente limosa, gris y beige, endurecida, con numerosos filoncillos de calcita; intercalaciones decimétricas a métricas de caliza arcillosa, gris oscura.

**995-1.012 m:** Conglomerado poligénico de cemento margo arenoso abundante y mal consolidado. Elementos centimétricos a decimétricos del cuarzo translúcido abundante. Caliza cristalina blanca. Micaesquistos blancos-grisáceos. Micaesquistos verdes. Arcilla negra, hojosa.

Caliza margosa beige-amarillenta. Arenisca fina rojiza de cemento calizo.

**1.012-1.023 m:** Conglomerado con iguales elementos pero con predominio de la arenisca rojiza de cemento calizo y del cuarzo translúcido.

**1.025-1.030,5 m:** Arcillas ligeramente dolomítica, gris azulada.

**1.030,5-1.044 m:** Marga pasando a arcilla caliza, gris oscura, endurecida, con venas y filoncillos de calcita. Pirita difusa. Laminaciones milimétricas de arcilla negra.

**1.044-1.051 m:** Conglomerado poligénico de cemento margoso abundante.

**1.051-1.053 m:** Marga gris oscura, endurecida.

**1.053-1.056 m:** Conglomerado poligénico de cemento margoso abundante, idéntico al precedente.

**1.056-1.070 m:** Marga gris.

**1.070-1.096 m:** Marga gris y marga limosa gris endurecida con intercalaciones decimétricas a métricas de arenisca de cemento calizo.

**1.096-1.105,5 m:** Caliza margosa, con nódulos de caliza cristalina, gris y blanca, masiva; venas y nódulos de calcita cristalina blanca; filoncillos de pirita.

**1.105,5-1.109 m:** Brecha de cemento argilo-calcareo, gris oscura, abundante pirita; elementos centimétricos de calcita cristalina blanca y de calcita margosa gris; filoncillos de calcita, pirita difusa y rellenando pequeñas fisuras.

**1.109-1.120 m:** Arcilla débilmente calcárea, gris a verdosa y arcilla débilmente calcárea, negra, con numeroso filoncillos de calcita. Pasadas decimétricas a métricas de caliza cristalina blanca y de caliza dolomítica gris oscura.

**1.120-1.129 m:** Arcilla calcárea gris, con nódulos de caliza cristalina blanca y de caliza dolomítica gris.

**1.129-1.134,5 m:** Caliza dolomítica gris, bréchica, con inclusiones de calcita cristalina blanca y de arcilla dolomítica negra que se desarrolla en pasadas decimétricas mostrando superficies de deslizamiento. La caliza dolomítica contiene localmente vacuolas centimétricas parcialmente rellenas de calcita cristalina.

### **Interpretación y síntesis del sondeo San Miguel de Salinas-2:**

Si exceptuamos los metros superiores, desde la superficie hasta los 563 m aproximadamente, que pueden asignarse al Plioceno, con tramos evaporíticos predominantes, el resto de la columna (Fig. 42) presenta una gran heterogeneidad litológica con elementos margosos de carbonatos cristalinos, microconglomerados, micaesquistos y abundancia de pirita, todo ello unido a la presencia, en varios niveles, de elementos silíceos, recristalizaciones de carbonatos, margas y calizas oscuras, argilitas laminadas negras, arcillas, brechas y superficies de slicken side, nos hace interpretar que este sondeo atravesó una zona de fractura, a partir de los 563 m y hasta el final, fosilizada por los tramos pliocenos anteriormente citados.

Su situación, avala lo anteriormente expuesto ya que la perforación se ubica muy próxima a la banda de cizalla dextrosa NO-SE de San Miguel (Falla de San Miguel).

**San Miguel de Salinas-2**

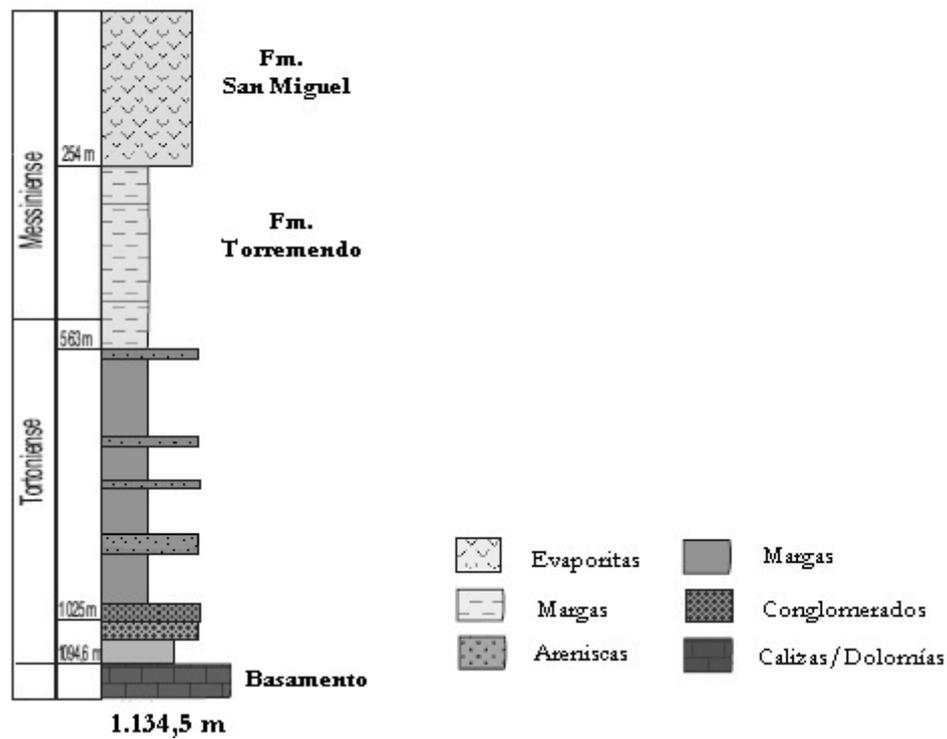


Figura 42. Columna litológica sintética del sondeo San Miguel de Salinas-2.

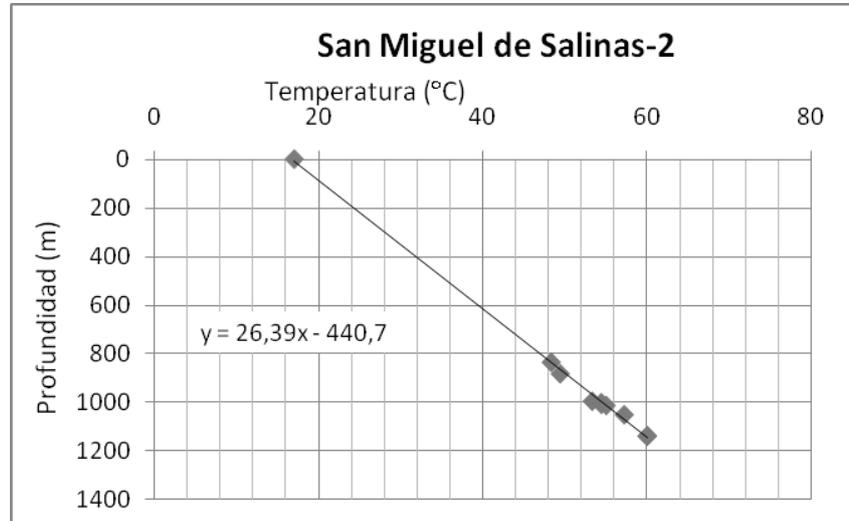
**Resultados**

Los resultados obtenidos en cuanto a porosidad con el registro de densidad y tal como puede observarse en la tabla 14 son muy bajos, tanto en las areniscas como en los conglomerados, del orden del 3%. Asimismo los carbonatos triásicos tampoco poseen una porosidad favorable, por debajo del 3%.

El gradiente geotérmico del sondeo es de 3,79°C/100 m, es un valor ligeramente menor que el sondeo de San Miguel de Salinas-1, este valor igualmente asegura que a 800 m de profundidad el CO<sub>2</sub> podrá encontrarse en estado supercrítico. En la figura 43 se ilustra la ecuación lineal obtenida.

Tramos (m)	Litología	Φ Densidad (%)			Rw (Ω/m)			Rt (Ω/m)	Densidad (g/c3)	Vsh (%)	T <sup>a</sup> (°C)	Salinidad (g/l)	SP (mV)
		Media	Min	Max	Media	Min	Max						
<b>Sello 1</b> 0-831	Margas y evaporita	11	0	27	4	0	16						
<b>Almacén-2</b> 831-961 995-1.025	Arenisca y margas	$\frac{3}{3}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{12}{1}$	$\frac{0,01}{0,06}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,07}{0,64}$	$\frac{10}{20}$	2,6-2,7	35	$\frac{50}{54}$	37	-25
<b>Almacén-3</b> 1.025-1.095	Arenisca y conglomerado	1	0	10	0,05	0	0,6			34	57		
<b>Almacén-4</b> 1.095-1.134,5	Calizas	3	0	20	0,23	0	1,24		2,65-2,75	20-35	60	70	-45

Tabla 14. Parámetros obtenidos en el sondeo San Miguel de Salinas-2

Figura 43. Gráfica T<sup>a</sup>/Prof., caso de ecuación lineal. Sondeo San Miguel de Salinas-2.

#### 4.1.3.7. Sondeo Torrevieja Marino C-1

Torrevieja Marino C-1 está situado en el Mar Mediterráneo a 25 km al E de Torrevieja.

Las coordenadas de posición del sondeo son:

Latitud: 37° 58' 20,58" N    X: 728520,58    UTM HUSO 30

Longitud: 0° 23' 54,57"E    Y: 4206013,85

Cotas: Metros sobre nivel del mar (msnm) a la mesa de rotación (Zm) = 25,6 m.

    Metros sobre nivel del mar (msnm). a fondo del mar = 118,40 m.

    Zm. a fondo del mar = 144 m.

    Columna de agua = 118,4 m.

El sondeo tiene una profundidad total de 722 metros (desde Zm). Operado por la Compañía ENIEPSA en el año 1978.

Columna litológica del sondeo, valores en metros referidos desde msnm:

**0-118,4 m:** Columna de agua.

**118,4-504,4 m:** Arcilla más o menos calcárea gris a gris clara, limosa, plástica, con puntos de pirita. Finas pasadas de arena gris fina a muy fina con puntos de glauconita. Presencia de cuarzos redondeados de hasta 2 mm. Abundantes foraminíferos. Cuaternario.

**504,4-613,4 m:** Arcilla gris plástica, con presencia de arena muy fina y caliza amarilla. Puntos de pirita y glauconita. Foraminíferos muy abundantes. Plioceno superior-Cuaternario.

**613,4-696,4 m:** Caliza dolomítica a dolomía calcárea gris-claro a gris-marrón, microcristalina. Presencia de caliza bioclástica a veces lumaquéllica, fuertemente porosa. Al techo intercalaciones de arcilla ligeramente calcárea rojiza a marrón. Plioceno superior.

#### Interpretación y síntesis del sondeo Torrevieja Marino C-1:

Se encuentra localizado en el PT (Shot point) 456 del perfil sísmico B-16 y en el PT 875 de la línea 1\_11\_72.

El sondeo tuvo que ser abandonado antes de alcanzar la profundidad final prevista (1.000 m) por razones de seguridad debido a que las calizas de base del Plioceno dieron lugar a varias erupciones de gas constituido casi exclusivamente por CO<sub>2</sub>. Por este motivo tampoco se realizaron diagráfias.

Hipotéticamente, de acuerdo a las previsiones, esta perforación debería de haber alcanzado el sustrato bético bajo el Plioceno carbonatado a unos 60 metros por debajo de la profundidad a la que finalizó (696,4 m). Esta hipótesis no concuerda con la profundidad a la que se encuentra el basamento interpretando las líneas sísmicas que son atravesadas por el sondeo ya que se encuentra un reflector muy marcado que podría corresponder con la discontinuidad basal aproximadamente a 1.000 metros de profundidad. El sondeo fue abandonado sin haber podido reconocer todos los objetivos previstos, parado en los carbonatos del Plioceno.

En nuestro criterio pensamos que el tramo definido como caliza dolomítica calcárea con calizas bioclásticas lumaquéllicas fuertemente porosa y que posiblemente fuese el que dio el aporte de gases, es el equivalente lateral hacia el centro de la cuenca de la formación de calcarenitas de la Virgen si bien no tenemos datos consistentes para confirmar esta hipótesis. Estas calizas dolomíticas de tipo arrecifal, presentan zonas de alta permeabilidad y porosidad, irregularmente repartidas (Informe final sondeo Torre vieja Marino C-1).

En la figura 44 se representa una síntesis de la columna litológica del sondeo Torre vieja marino.

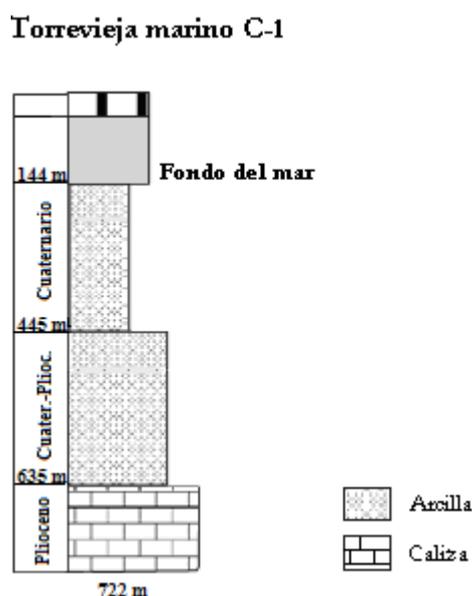


Figura 44. Columna litológica sintética del sondeo Torre vieja Marino C-1.

#### **4.2. Horizontes de interés en los sondeos profundos**

El horizonte más claramente detectado en seis sondeos perforados en la zona es el substrato, que a su vez constituye el basamento de la cuenca, está constituido principalmente por calizas y dolomías triásicas. El único sondeo donde no se llega a perforar, es en el sondeo Torrevieja Marino C-1, ya que se tuvo que detener a una profundidad antes de la prevista.

El basamento de las Zonas Internas es asignado al Complejo Alpujárride, en la zona estudiada aflora en la Sierra de Orihuela y Callosa del Segura.

Perforado por los sondeos, se encuentra a profundidades entre los 740 m y 1.499 m, en el sondeo San Miguel de Salinas-1 y Benejúzar-1, respectivamente. En la figura 45 se ilustra la correlación de los sondeos profundos estudiados en la zona y los horizontes y discontinuidades más importantes.

Las diferencias de profundidad a las que se encuentra el basamento, nos pueden indicar estructuralmente la compartimentación de la cuenca, donde se alternan umbrales y surcos. Como resultado de esto, en la bibliografía se individualiza la Cuenca del Bajo Segura en varias subcuencas neógenas con diferentes denominaciones.

Como se ha mencionado, en el sondeo Benejúzar-1 se corta el basamento triásico a 1.499 m, estando constituido principalmente por dolomía brechoide a microcristalina con alternancia de arcilla. El buzamiento medio es de 31° con cierta tendencia al sur, este valor es tomado del informe final del sondeo.

En el sondeo San Miguel de Salinas-2 el basamento se corta a una profundidad de 1.096 m y está constituido por caliza margosa, arcilla y caliza dolomítica. En los testigos realizados durante la perforación del sondeo se indica la ausencia de fracturas abiertas en los niveles carbonatados, por lo que en principio este nivel carece de interés como potencial almacén. Al contrario que en San Miguel de Salinas-1 donde el substrato constituido por caliza brechoide y microcristalina cortado a 740 m presenta mejores condiciones de almacén con valores más favorables de porosidad y una salinidad de 70g/l indicativa de que la estructura está bien cerrada y no ha sido lavada por las aguas meteóricas. En este sondeo se encuentra la profundidad mínima a la que se perfora el basamento en la zona estudiada.

En el sondeo La Mata-1 se perfora el basamento a 759 m, constituido por dolomías y evaporitas, en Rojas-1 situado a 6,8 km al noroeste del anterior se localiza el basamento a 1.221 m en el que

predominan las calizas dolomíticas, en el último sondeo mencionado donde se perfora el basamento es en La Marina-1, a 925 m y constituido principalmente por caliza dolomítica, como en el sondeo anterior.

Si las rocas carbonatadas alpujárrides presentaran parámetros hidrogeológicos y físico-químicos favorables como niveles almacén, las profundidades a que se encuentran así como su extensión serían óptimas, ya que se sitúan entre los 800 y 2.000 m, desarrollándose en todo el subsuelo de la cuenca, al menos desde el eje de Orihuela-Callosa de Segura hacia el sur y sureste, así como posiblemente bajo los sedimentos neógenos marinos.

Estos materiales, calizas y dolomías esencialmente, los consideramos, en principio, como posible Almacén-4 o bien como soportes y continuación en la vertical de los almacenes 2 y/o 3.

Los sondeos San Miguel de Salinas-1, La Mata-1 y La Marina-1 detectan como el substrato conforma un alto más o menos paralelo a la costa de manera que se dispone en dirección SO-NE girando al norte en proximidad a la perforación La Mata-1. Entre este alto o seno y el que constituye el de Callosa, también en dirección SO-NE, el substrato presenta una subcuenca o depresión que va a constituir la zona más interesante como posible almacén. Depresión o surco que denominamos Benejúzar-Rojales.

Otro horizonte de interés estudiado en los sondeos se encuentra por debajo de la discordancia intra-Tortonense, localizada en el sondeo Benejúzar-1 y San Miguel de Salinas-2. Por debajo de esta discontinuidad se disponen los materiales denominados como Complejo Basal (Almacén-3) constituido principalmente por conglomerados, areniscas y margas pertenecientes al Tortonense inferior. En el sondeo Benejúzar-1 se encuentra la discontinuidad a 1.261 metros llegando el Complejo Basal hasta los 1.499 metros, en los niveles margo arenosos inferiores aumenta el buzamiento hasta los 25° con una orientación media sur-suroeste. En el sondeo San Miguel de Salinas-2 esta discontinuidad aparece a los 1.025 metros llegando el Almacén-2 hasta los 1.094,6 metros.

El siguiente horizonte con mayor importancia es el marcado por la discontinuidad finitortonense por debajo de la cual se encuentran los materiales tortonienses con a priori más posibilidades para albergar un almacén de CO<sub>2</sub>. Dicha discontinuidad se marca en los seis sondeos profundos con testificación geofísica estudiados en tierra, la menor profundidad a la que se encuentra es a 563 m (en el sondeo San Miguel de Salinas-2) y la mayor a 880 m (en el sondeo La Marina-1).

La siguiente discontinuidad que se distingue con mayor claridad en los sondeos es la denominada discontinuidad intra-Messiniense, se encuentra siempre en la base de la unidad evaporítica Messiniense denominada Formación San Miguel en el sector sur de la cuenca.

La importancia de la localización de esta discontinuidad reside en la posible identificación con mayor seguridad de los metros de material sellante que se encuentran en la cuenca para poder asegurar el confinamiento del CO<sub>2</sub> en profundidad.

Además de contar con el espesor de la unidad evaporítica, que varía en los sondeos desde los 83 m hasta los 254 m, hay que tener en cuenta que por debajo de dicha unidad se encuentran las denominadas Margas de Torremendo con espesores de hasta 525 m en el caso del sondeo Benejúzar-1, igualmente como se detallará más adelante hay que sumar el espesor, para la mayoría de los sondeos, de los materiales margosos pliocenos.

En resumen, podemos decir que en el caso del sondeo Benejúzar-1, se identifican cuatro discontinuidades: discontinuidad basal, discontinuidad intra-Tortonense, discontinuidad finitortonense y discontinuidad intra-Messiniense. En San Miguel de Salinas-2 se localizan los mismos horizontes que para Benejúzar-1, en San Miguel de Salinas-1 se localizan tres de las discontinuidades ya que no se distingue la discontinuidad intra-Tortonense, y en los sondeos La Mata-1, Rojas-1 y La Marina-1 ocurre igual que para San Miguel de Salinas-1, se identifican tres discontinuidades, las anteriormente dichas salvo la discontinuidad intra-Tortonense.



### **4.3. Horizontes de interés en los perfiles sísmicos**

Haber contado con sondeos en la zona es muy importante para realizar el calado en las líneas sísmicas a partir de la elaboración de gráficos tiempo/profundidad o de sismogramas sintéticos y así poder identificar la profundidad en la que se encuentran los horizontes de interés.

Se ha identificado el substrato en las líneas sísmicas interpretadas, de las cuales, 8 poseen un sondeo profundo cercano. Entre ellas hay varias líneas que podemos 'calar' con dos sondeos, lo cual aumenta la precisión de la interpretación, así por ejemplo la línea S-84-68 está cercana al sondeo Rojas-1 y es cortada por el sondeo La Mata-1; en el caso de la línea S-84-66 S podemos 'calar' el sondeo San Miguel de Salinas-2 y San Miguel de Salinas-1. Y para el estudio de las líneas sísmicas marinas, el sondeo Torre Vieja Marino C-1 es utilizado para el calado de dos líneas, la línea 1\_11-72 y la 52-74\_B16.

Una vez identificadas las discontinuidades y los horizontes de interés en los sondeos, estos se 'calan' en las líneas sísmicas y se procede a la interpretación de las mismas, teniendo en cuenta la geología de la zona, estructuras y fallas más importantes.

A continuación se describe cada línea y los rasgos más importantes encontrados durante la interpretación.

#### **Campaña Onshore:**

##### **S-84-72-N**

Realizada en la campaña S-84 de Chevron del año 1984. Esta línea tiene una longitud de 16 km, se extiende desde Sierra Gorda hasta la Sierra de Santa Pola. El perfil es de calidad muy baja, los reflectores que aparecen son muy difusos. La discontinuidad que se observa en el perfil a una profundidad aproximada de 1.000 metros, probablemente está ligada al evento tectónico intra-Tortonense (Alfaro, 1995). No se puede reconocer la geometría del substrato por la escasa nitidez del reflector, únicamente se distingue como alcanza la mayor profundidad, más de 1000 m, en la parte central de la línea y asciende el basamento a ambos lados por el efecto de varias fallas, en definitiva el sector central constituye un graben o fosa tectónica.

Esta línea nos limita, por el NE, el área de interés a seleccionar ya que gran parte de los niveles favorables no estarían a profundidades adecuadas, llegando incluso el basamento a aflorar en la conocida como isla de Tabarca.

### **S-84-70-N y S-84-70-S**

Son dos tramos de líneas de la campaña realizada en el año 1984.

El tramo S-84-70-N, con una longitud de 9 km se extiende desde la presa del embalse de Crevillente hasta la laguna de El Hondo. Cercano a la presa del embalse el substrato se encuentra próximo a la superficie, este daría paso al substrato bético a partir de la banda de deformación de Crevillente próxima al borde la cuenca. A medida que nos acercamos al centro de la cuenca el substrato se profundiza, en la vertical del pueblo de Pusol se localiza a una profundidad de 900 m aproximadamente, y a partir de ahí va ascendiendo hasta los 800 m en su parte final, en proximidad a la laguna de El Hondo.

El tramo S-84-70-S (Fig. 46) presenta una longitud de 14 km, comienza en la laguna de El Hondo y continúa hasta la Sierra de La Marina, esta línea es atravesada por el sondeo La Marina-1, en el cual se corta el substrato a 925 m de profundidad. En general a lo largo del perfil no se encuentran irregularidades significativas en el substrato, se dispone entre profundidades de 750 a 950 metros.

Gracias al sondeo también podemos identificar las diferentes discontinuidades, la llamada discontinuidad intra-Messiniense (situada por debajo de las evaporitas) y continuarla a lo largo de la línea ya que no existen grandes cambios, se presenta bastante horizontalizada a lo largo de toda la línea, salvo en los alrededores del sondeo.

La discontinuidad fini-Tortonense definida en el sondeo sobre las margas y areniscas de la Formación Columbares, se continúa como la discontinuidad anterior a lo largo de todo el perfil, encontrándose en el sondeo La Marina-1 a una profundidad de 745 m.

### **S-84-68**

Realizada en el año 1984, se extiende desde El Realengo hasta Torrelamata, con una longitud de 21 km, atraviesa la zona central y es una línea muy representativa de la geometría de la cuenca (Fig. 46). El sondeo Rojas-1 y La Mata se encuentran cercanos al perfil. El sondeo Rojas -1 corta el substrato a 1.221 m, La Mata a 759 m.

Desde la parte norte del perfil el substrato se encuentra a unos 800 m y va progresivamente aumentando su profundidad hasta encontrarse incluso a más de 1.400 metros, pasa por un alto en la estructura de Rojas y desciende hasta nuevamente ascender y alcanzar en el sondeo La Mata-1 la profundidad de 759 m.

El basamento está afectado por fracturas por las cuales se conforma un sistema de surcos y umbrales sucesivos.

Gracias a los sondeos y los reflectores de la línea se puede identificar la posición de varias discontinuidades, en concreto la fini-Tortonense y la intra-Messiniense, además de la discontinuidad basal.

### **S-84-66-N y S-84-66-S**

Se efectúan en el año 1984. El primer trazado, S-84-66-N (Fig. 47), con 15 km de longitud, comienza en el Rafal y continua hasta el norte de San Miguel de Salinas, se instala en ella el sondeo Benejúzar-1, en la sierra del mismo nombre, en dicho sondeo se corta el basamento triásico a 1.499 metros de profundidad, a partir del sondeo el substrato asciende por la acción de varias fallas.

El siguiente tramo, S-84-66-S (Fig. 47), comienza donde prácticamente termina el anterior y se extiende hasta Punta Prima, se encuentran muy cercano al perfil el sondeo San Miguel de Salinas-1, en el caso del sondeo San Miguel de Salinas-2 se encuentra algo más alejado que el anterior tomando la información de este sondeo con prudencia ya que se encuentra en la zona afectada por la falla de San Miguel. En la línea podemos observar como el substrato va ascendiendo progresivamente hasta alcanzar en el sondeo San Miguel de Salinas-1 la profundidad de 740 m. En San Miguel de Salinas-2 se corta el basamento triásico a 1.095 m. También se delimita la discontinuidad intra-Tortonense, localizada en el sondeo Benejúzar-1 a 1.261 metros de profundidad, hacia el extremo norte de la línea aumenta y disminuye su profundidad afectado por

varias fallas llegando a alcanzar los 1.300 metros para acabar ascendiendo hasta a encontrarse a profundidades de aproximadamente 1.000 metros, y hacia la parte sur desde la posición del sondeo se encuentran más altos y bajos, sigue prácticamente la misma estructura que el basamento hasta acuñarse en el extremo contra la discontinuidad basal.

### **S-85-61-E**

Realizada en el año 1985. No tienen buena calidad los reflectores (Fig. 48).

Se localiza al sur de la zona de estudio cercana al pueblo de San Miguel de Salinas, con dirección SW-NE, cercano a la línea se encuentra el sondeo San Miguel de Salinas-2, el sondeo se encuentra en un alto, y se encuentra el basamento a una profundidad de 1.095 m, a ambos lados del alto de San Miguel el basamento aumenta su profundidad por lo que es frecuente encontrar el basamento en esta línea a una profundidad mayor de 1.200 metros.

### **S-82-51**

Realizada en el año 1982. Se encuentran más cercana a la costa, prácticamente paralela a la anterior, y es atravesada en su extremo norte por el sondeo San Miguel de Salinas-1, donde se atraviesa el basamento a una profundidad de 740 metros pero hacia el extremo sur el basamento se profundiza considerablemente afectado por fallas, alcanzando profundidades mayores a los 2.000 metros, llegando a estas profundidades a chocar con varias fallas y posteriormente comienza a ascender bruscamente el basamento llegando hasta los 700 m de profundidad en la parte sur del perfil sísmico. Por la calidad de la línea (Fig. 48) no se posicionan con seguridad las distintas discontinuidades.

### **Campaña offshore:**

Por general las líneas interpretadas en mar tienen mejor calidad que la campaña estudiada en Tierra. Presentan el inconveniente de que solo contamos con la información de un sondeo incompleto ya que se trata del sondeo Torrevieja marino C1 que tuvo que ser abandonado antes de terminar la perforación.

Por esto los sondeos más cercanos a la costa y a la posición de las líneas estudiadas, como el sondeo La Mata-1 y La Marina-1, se utilizan también para la interpretación de las líneas.

### **S-81B-04**

Realizada en el año 1981 con una longitud de 12,87 km. Esta línea nos permite unir la línea en tierra en la que se encuentra calado el sondeo La Marina-1 con la línea offshore 52\_74\_B-16 en la que se encuentra el sondeo Torrevieja marino C1. Cercano a la costa el basamento se encuentra a una profundidad de unos 500 m, va ascendiendo por la acción de varias fallas y en el extremo E de la línea desciende bruscamente hasta llegar a los 870 m de profundidad, este descenso también se observa en la línea sísmica 52\_74\_B-16 en la cual podemos continuar el reflector.

### **S-81B-02**

Paralela a la anterior, con una longitud de 11,26 km.

Se identifica el basamento a una profundidad desde los 650 m hasta los 1.300 m, realizando un pequeño alto en la parte central de la línea donde alcanza los 1.000 m de profundidad. Por encima de este reflector se encuentran los materiales pliocenos que muestran una geometría progradante.

### **52\_74\_B-12**

Esta línea (Fig. 49) se dispone en posición prácticamente paralela a la línea 52\_74\_B-16, comienza el basamento con un alto en la parte más cercana a la costa con profundidades del orden de 1.000 m y progresivamente va aumentando su profundidad hasta superar los 2.600 m de

profundidad. Por encima del reflector correspondiente al basamento se encuentran igualmente los materiales pliocenos y cuaternarios, y en esta línea igualmente se observa la geometría progradante que caracteriza a los materiales pliocenos.

### **52\_74\_B-16**

Esta línea (Fig. 49) es atravesada en la vertical por el sondeo Torrevieja Marino C-1, se identifica claramente la posición del basamento, encontrándose en la parte más cercana a la costa un alto, donde ronda los 350 m y bruscamente desciende hasta encontrarse a profundidades de 1.500 m, este vuelve a ascender en el alto donde está situado el sondeo, donde se perforaría el basamento (si el sondeo hubiera continuado) a 1.000 m aproximadamente, dando lugar a un nuevo aumento de la profundidad del basamento hasta el final de la línea llegando a superar los 2.000 m de profundidad.

Según las hipótesis planteadas en el punto del sondeo los niveles y tramos tortonienses así como gran parte de los messinienses presentan poco o nulo espesor. La geometría de los materiales pliocenos es progradante como se puede observar en otras líneas, como por ejemplo en la línea S-81B-02.

### **1\_11-72**

Es también atravesada por el sondeo Torrevieja Marino C-1, en la parte más al sur de la línea se puede distinguir el basamento a una profundidad de 1.100 m, este va aumentando su profundidad llegando a los 2.000 m y asciende en el alto donde se posiciona el sondeo donde se hubiera cortado aproximadamente a los 1.000 m para de nuevo descender llegando a alcanzar los 2.200 m de profundidad (Fig. 50).

### **ALC-1**

En la parte sur de la línea (Fig. 50) se dispone el basamento a una profundidad mayor a los 1.300 m y va ascendiendo hasta encontrarse a 300 m en la zona más al norte de la línea, este alto corresponde a la estructura conocida como Anticlinal de Tabarca de dirección ENE-OSO, el cual

es prolongación en mar de la estructura observada en la Cuenca del Bajo Segura. Este anticlinal tiene de 20-30 km de ancho y se extiende por lo menos a 80 km de la costa, muestra pequeños anticlinales y sinclinales, uno de esos sinclinales secundarios es el canal del río Segura (Alfaro, 2002).

De la interpretación de las líneas sísmicas marinas podemos reconocer varias unidades, las cuales se han correlacionado con el sondeo Torre Vieja marino C1 y las líneas onshore. La unidad más baja corresponde al basamento, en todas las líneas presenta un reflector bien marcado, a continuación la unidad asignada al Mioceno superior, que se correlaciona onshore con las unidades TII, T-MI y M-II, el top de la unidad MII está representado por un reflector causado por el contraste litológico entre las evaporitas y areniscas de la parte superior de la unidad y los sedimentos margosos de la base de la unidad P.

En cuanto a la disposición del basamento, podemos concluir que se encuentran tanto en tierra como en mar frecuentes altos y bajos, acentuándose con mayor profundidad en mar, comparado con la profundidad que alcanza el basamento en tierra, llegando a encontrarse a profundidades superiores a los 2.500 m por lo que estimamos la presencia de potentes rellenos sedimentarios de materiales miocenos y pliocenos.

De manera general se encuentran muchas similitudes respecto a la geometría y disposición del substrato entre la geología en tierra y la geología marina, conformados ambos por surcos y umbrales, hundiéndose progresivamente cada vez más según nos alejamos de la costa.

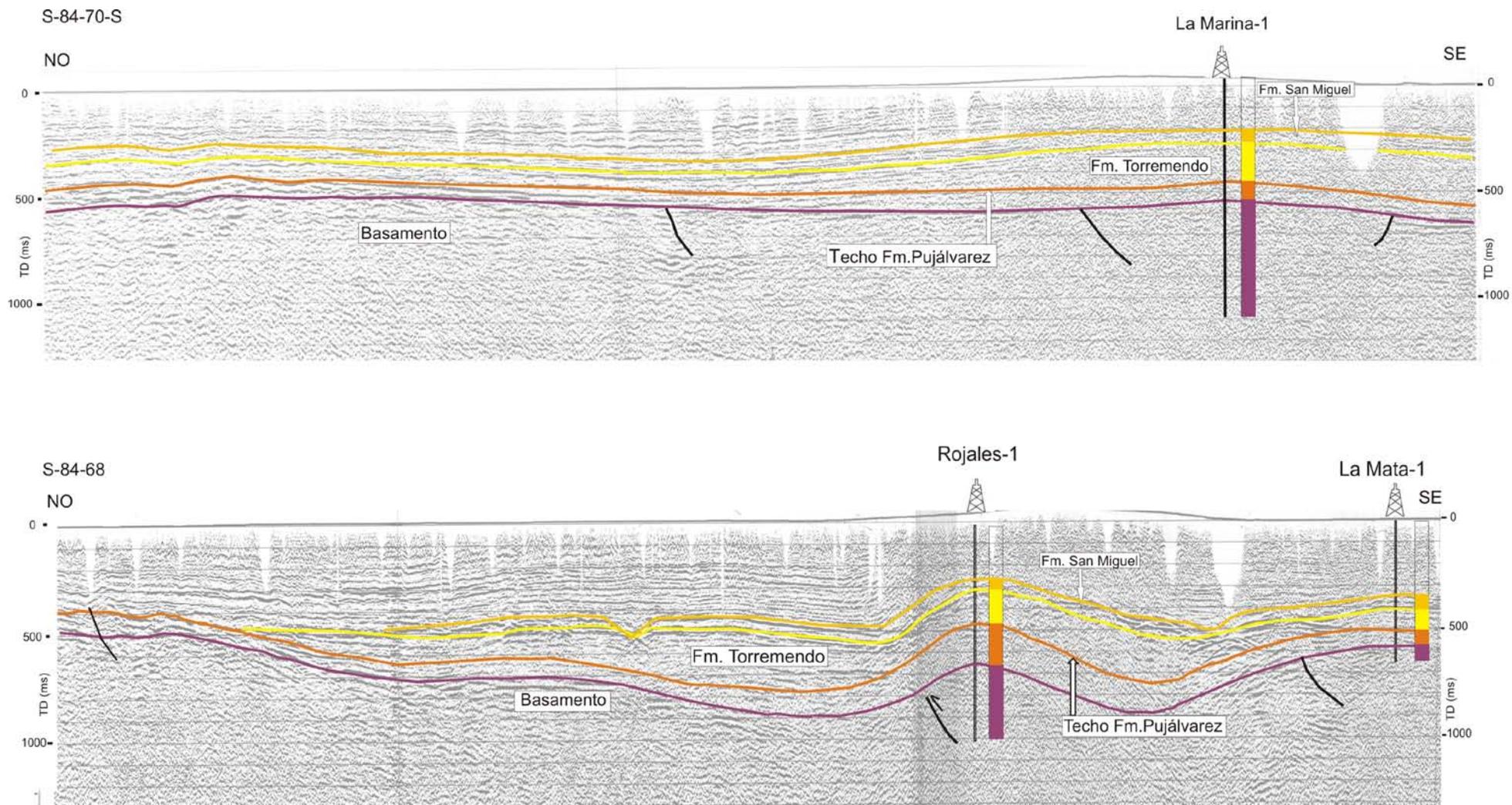


Figura 46. Interpretación de las líneas sísmicas S-84-70-S (arriba) y S-84-68 (abajo).

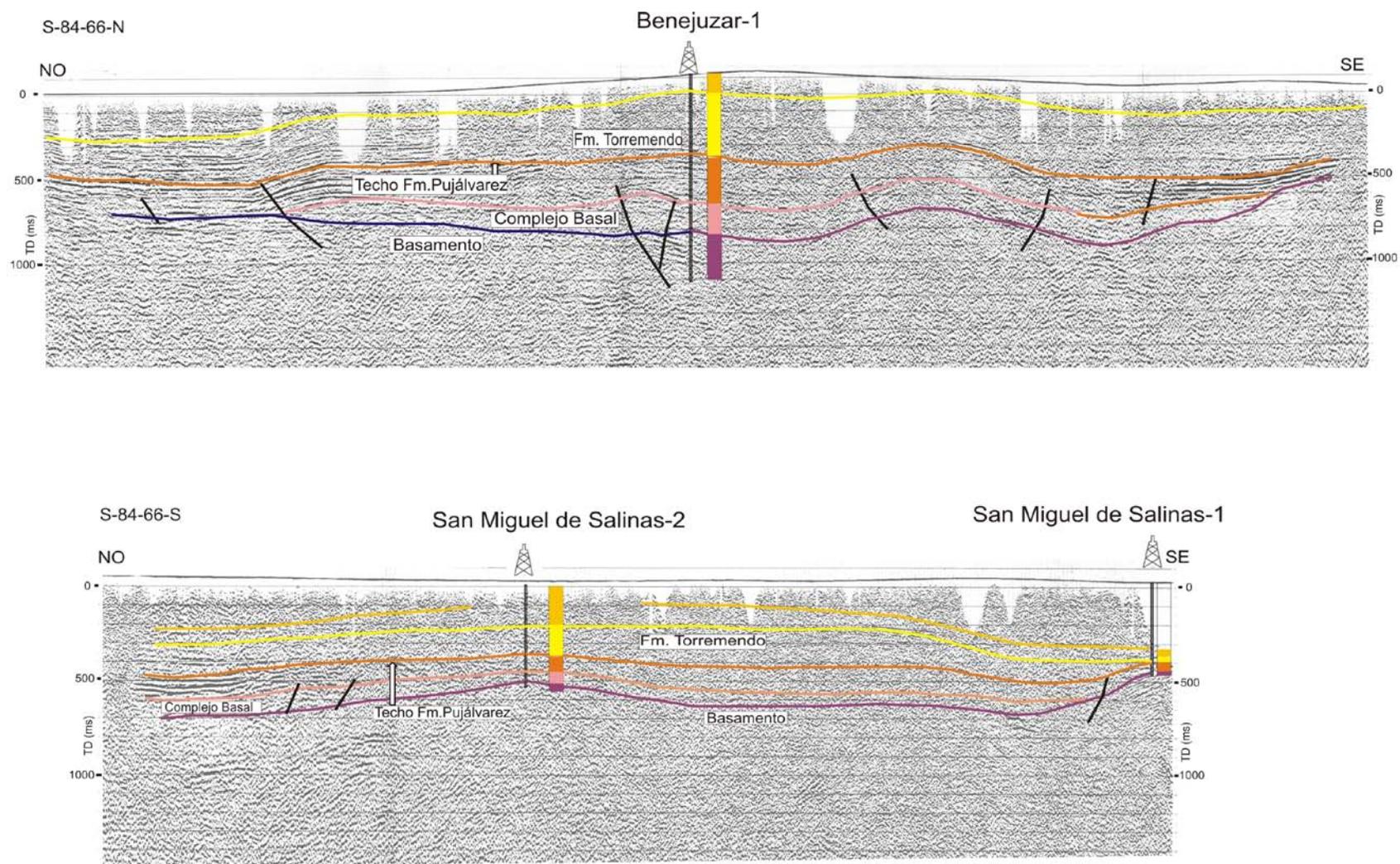


Figura 47. Interpretación de las líneas sísmicas S-84-66-N (arriba) y S-84-66-S (abajo).

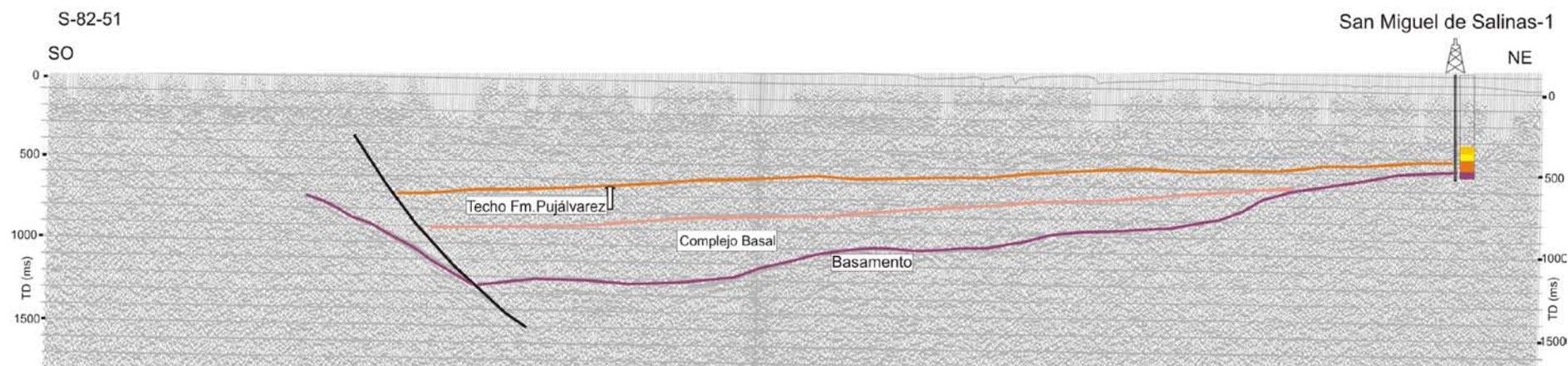
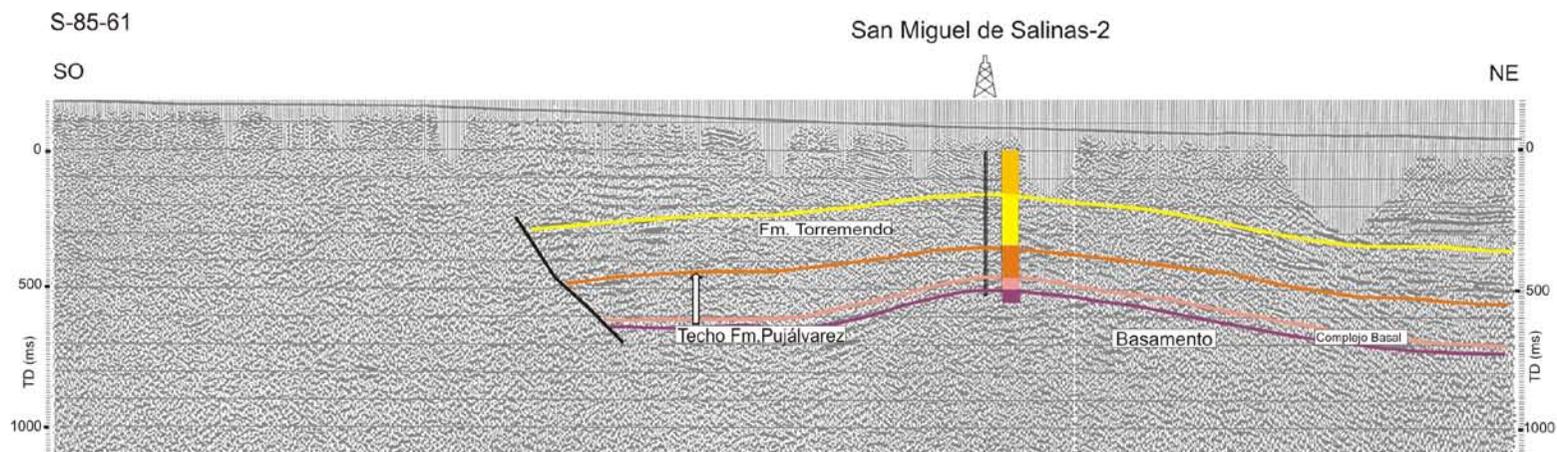


Figura 48. Interpretación de las líneas sísmicas S-85-61 (arriba) y S-82-51 (abajo).

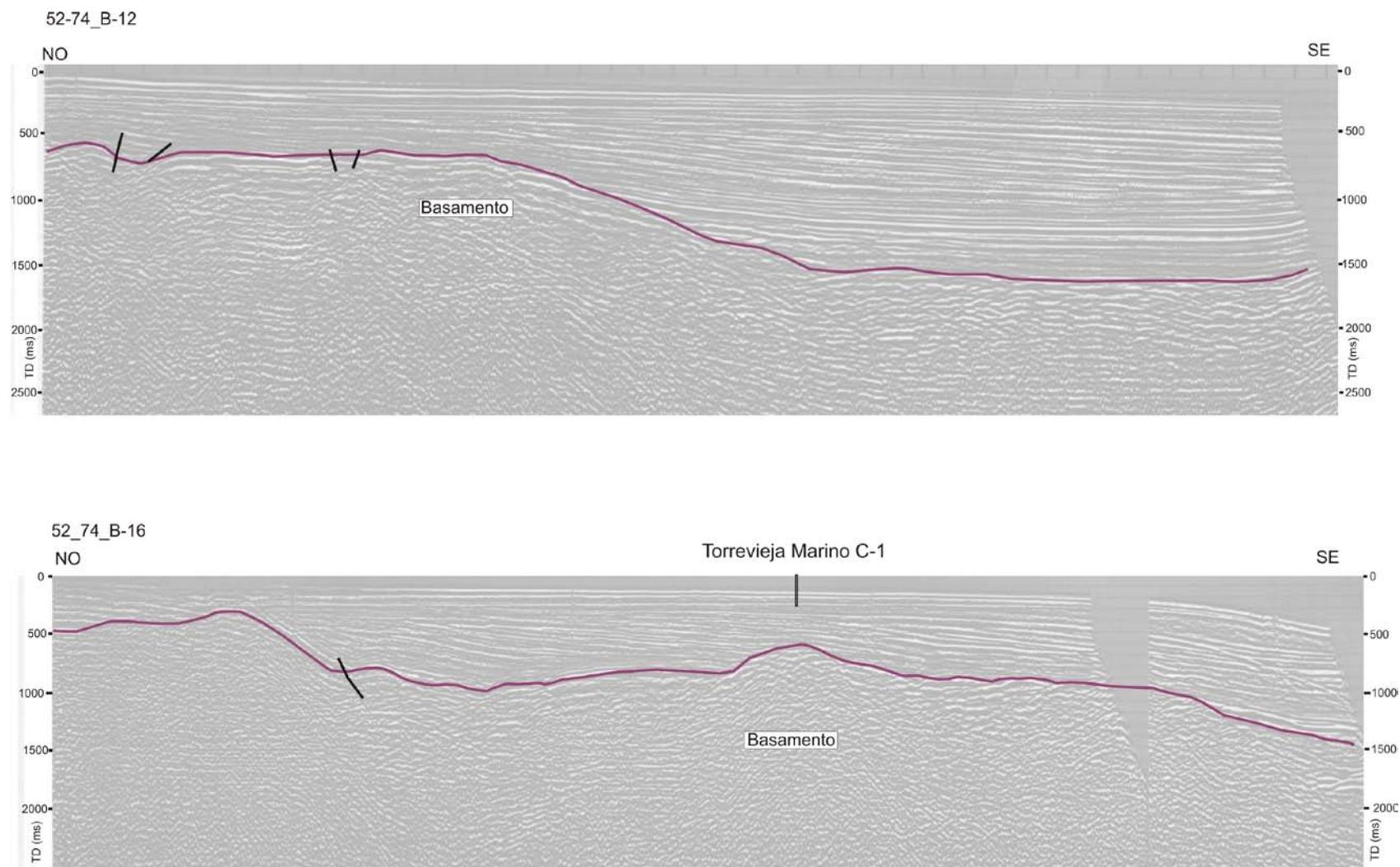


Figura 49. Interpretación de las líneas sísmicas 52\_74\_B-12 (arriba) y 52\_74\_B-16 (abajo)

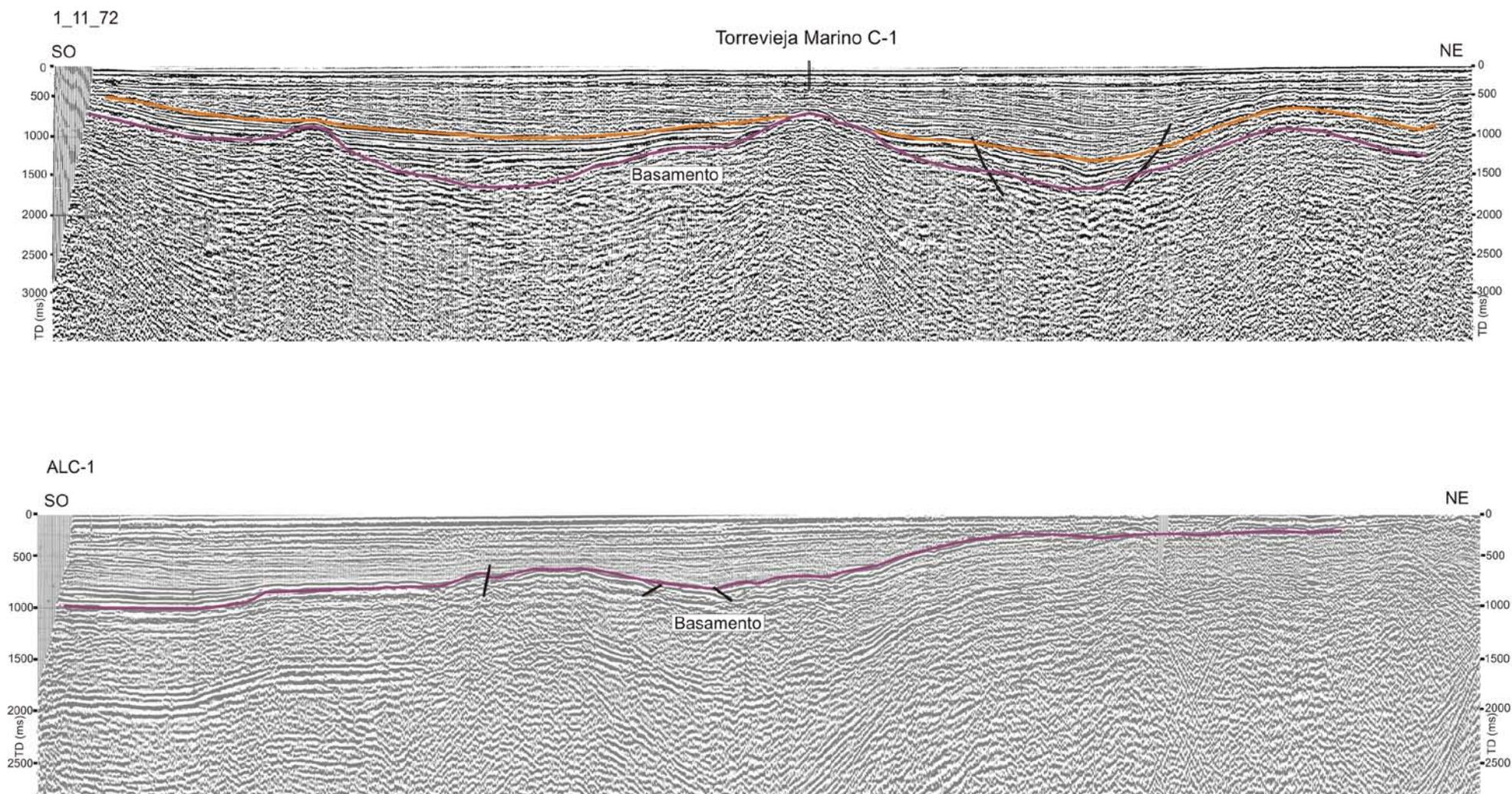


Figura 50. Interpretación de las líneas sísmicas 1\_11\_72 (arriba) y ALC-1 (abajo)

#### **4.4. Mapas de isocronas e isobatas de los horizontes de interés**

Una vez finalizada la interpretación de las líneas sísmicas, es decir, la identificación de horizontes sísmicos, estructuras y fallas, se procede a realizar los mapas de isocronas y posteriormente de isobatas. En nuestro caso los hemos realizado de la discontinuidad basal, y de la discontinuidad fini-Tortonense, ya que entre ambas se encuentran los niveles terciarios de interés como posibles almacenes.

La discontinuidad basal limita el sector de interés con respecto a los materiales neógenos, la discontinuidad fini-Tortonense nos define la formación neógena y nos limita el sector donde encontrar la formación de interés a la profundidad adecuada.

Conviene señalar que contamos con varias campañas sísmicas diferentes, la campaña en tierra y la campaña marina, a la hora de correlacionar la geología y los reflectores más importantes se han tenido en cuenta las variaciones que conlleva una campaña de otra, siendo necesario realizar la extrapolación de los datos de las líneas en tierra con las de mar.

Se presentan a continuación los mapas en tiempo y profundidad producto de la interpolación de las líneas interpretadas y su posterior suavizado. La conversión a profundidad fue realizada mediante el software Geographix, el cual contiene un módulo de interpretación sísmica, llamado Seisvision que nos permite la interpretación de líneas sísmicas y la creación de los mapas en tiempo y profundidad de los horizontes interpretados, para este último fin se utiliza el módulo GeoAtlas del mismo software el cual nos permite generar los mapas de isobatas a partir de los mapas generados de isocronas.

Se han generado los mapas de isocronas del techo del Trías (techo del basamento de la cuenca) (Fig. 51) y el mapa de isocronas la discontinuidad fini-Tortonense, correspondiente al techo de la Formación Pujálvarez (Fig. 52).

El basamento de la cuenca se ha identificado en todas las líneas sísmicas estudiadas, no ocurre lo mismo con la discontinuidad fini-Tortonense, ésta no se interpreta en las líneas sísmicas offshore.

Los mapas resultantes se presentan a continuación:

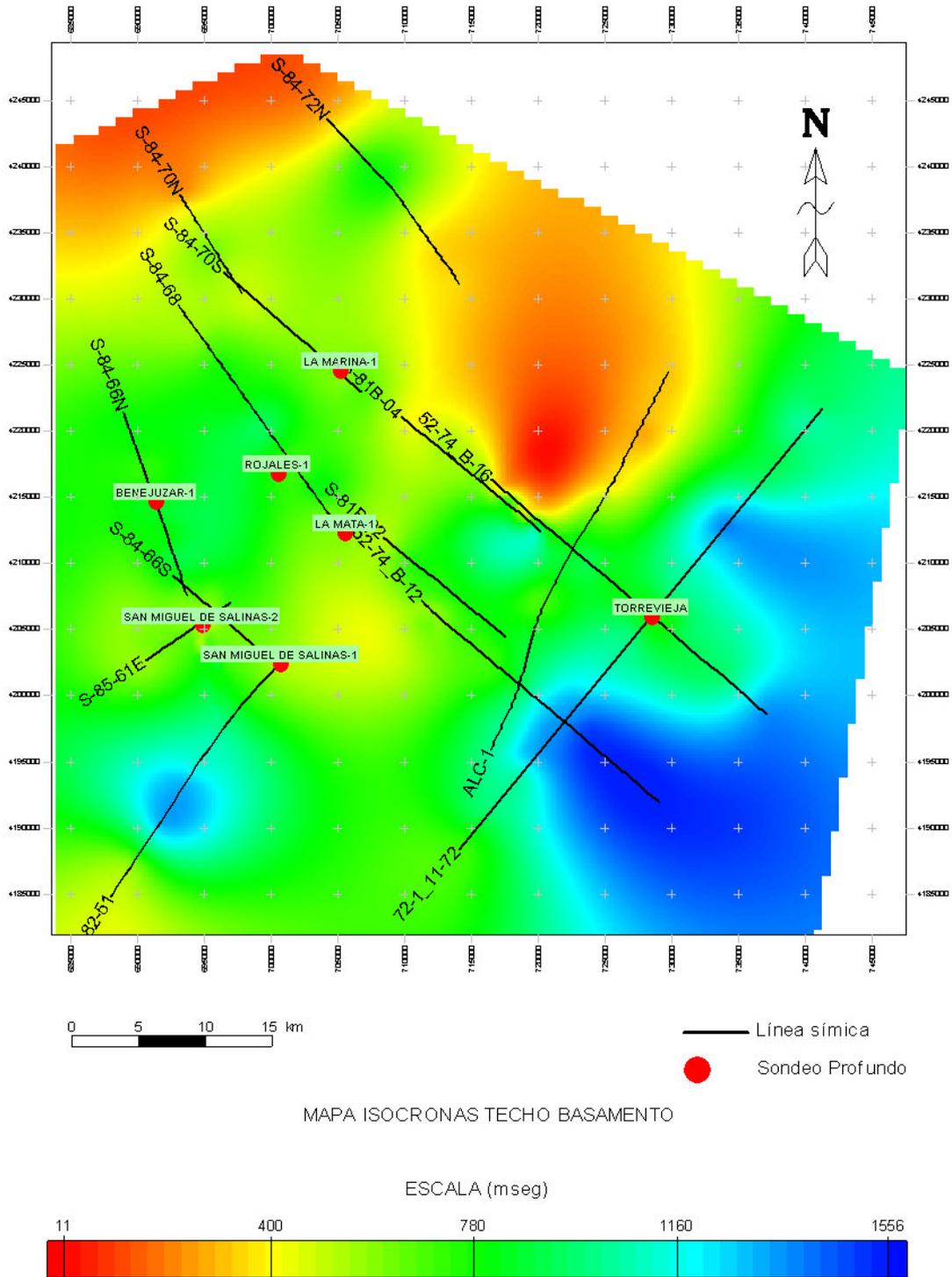


Figura 51. Mapa de isocronas del techo del basamento.

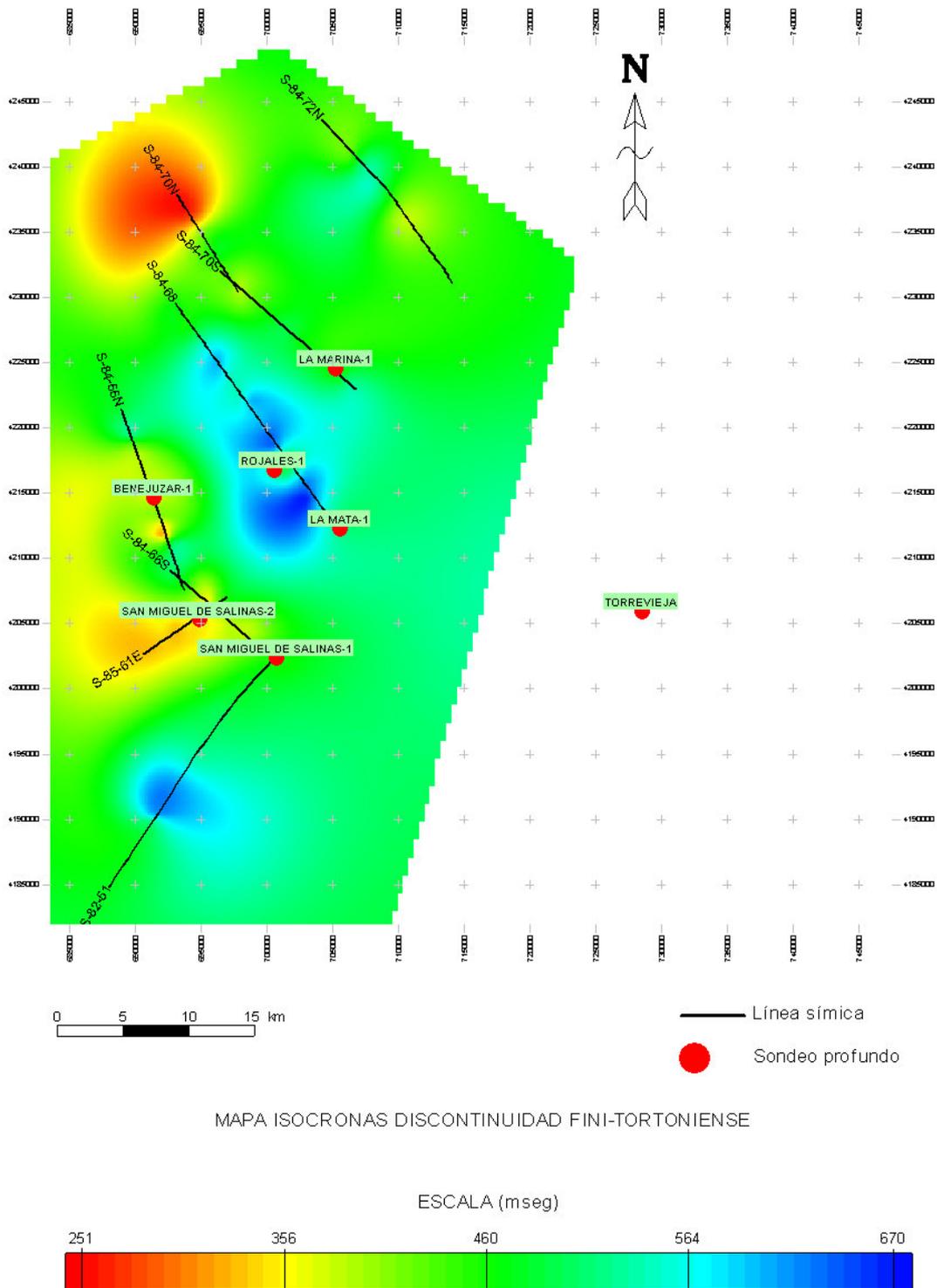


Figura 52. Mapa de isocronas de la discontinuidad fini-Tortonense.

Hay que tener en cuenta que estos mapas están realizados con la precisión que permiten los datos de los cuales obtenemos la información, siendo datos antiguos y escasos para lo que sería necesario en una investigación de este tipo.

El mapa de isobatas del basamento (Fig. 53) nos indica la profundidad a la que encontramos el techo de las calizas triásicas, esto sería un criterio excluyente para ubicar un almacén de CO<sub>2</sub> ya que si la zona se encuentra a una profundidad aproximada o menor de 800 m no sería adecuada para ubicar dicho almacén. Tenemos que buscar zonas en las que el techo del basamento se encuentre con suficiente profundidad como para que por encima de él se disponga los materiales adecuados con suficiente espesor y profundidad para inyectar el CO<sub>2</sub>.

El mapa de isobatas de la discontinuidad fini-Tortonense (Fig. 54) igualmente nos sirve para descartar zonas por la profundidad a la que se puedan encontrar los materiales miocenos, esta discontinuidad la tomamos como referencia para indicar el límite por debajo del cual podríamos encontrar los materiales miocenos adecuados para constituir un almacén de CO<sub>2</sub>.

Los mapas de isobatas obtenidos son los siguientes:

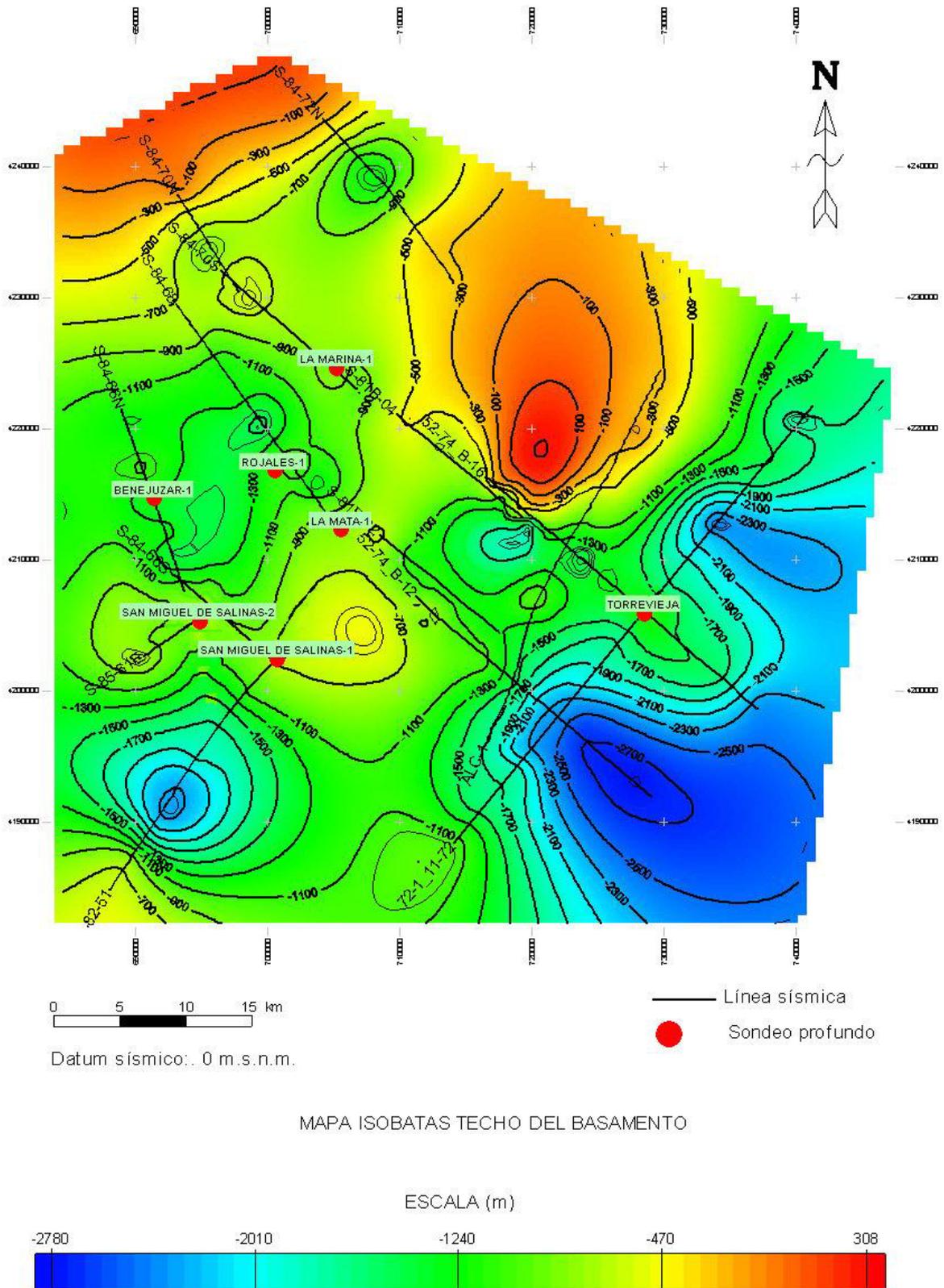


Figura 53. Mapa de isobatas del techo del basamento.

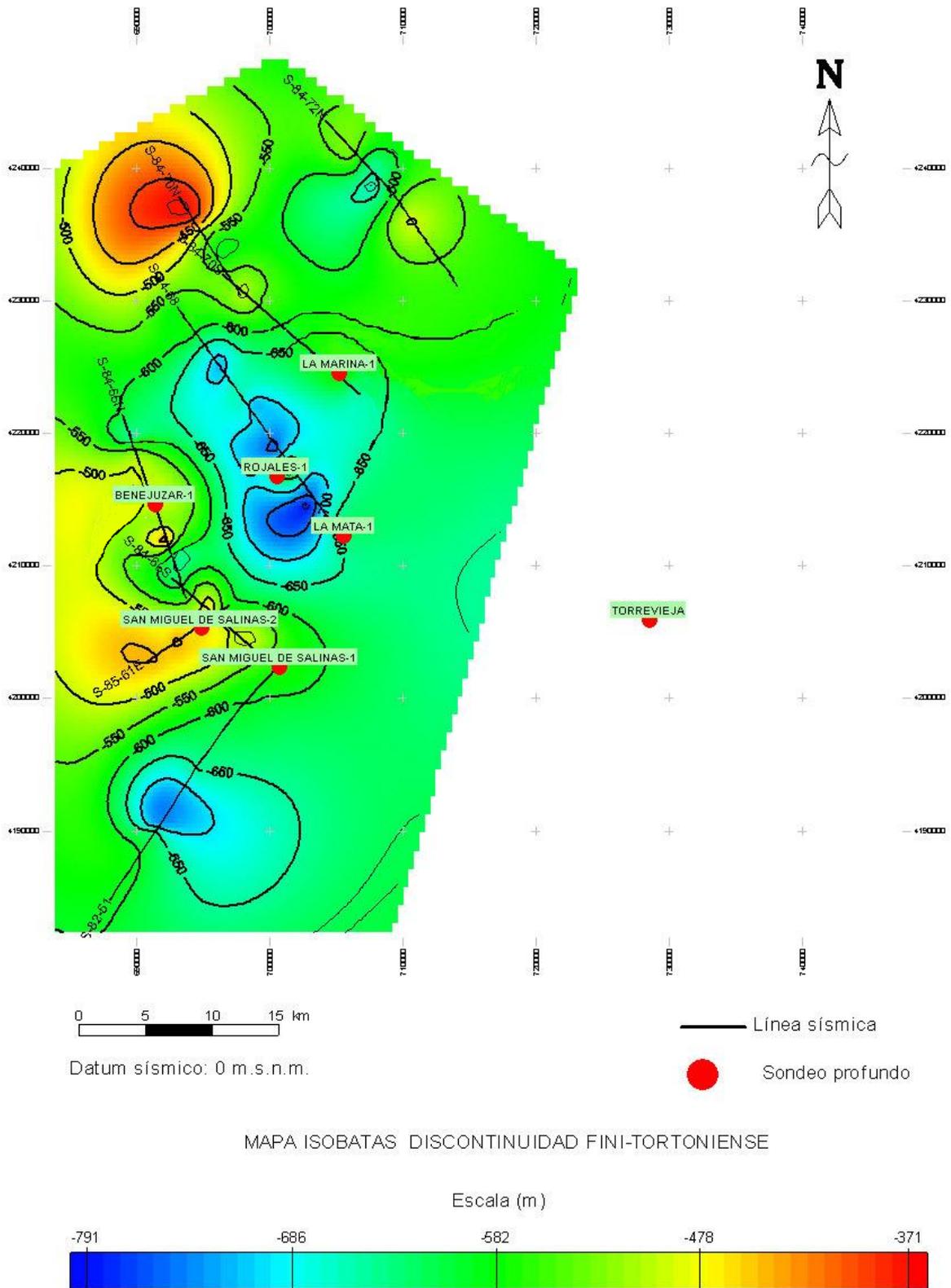


Figura 54. Mapa de isobatas de la discontinuidad fini-Tortoniense.

## **CAPÍTULO 5**

### **INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS DEL SONDEO BACAROT**

---

### 5.1. Sondeo Bacarot

Se perforó un sondeo mecánico con recuperación de testigo continuo, en la localidad de Bacarot (Alicante), ubicado en la hoja del Mapa Topográfico Nacional nº 893 (Elche). Las coordenadas UTM del sondeo son las siguientes: X: 710.619; Y: 4.243.236. Z = 140 msnm.

El sondeo se denominó Bacarot, en adelante, SB. Estratigráficamente se localiza sobre sedimentos neógenos, atraviesa las margas del Messiniense, conocidas como Margas de Torremendo y a continuación las calcarenitas con algas del Tortoniense superior (Calcarenitas de las Ventanas).

La perforación se inició el día 02/02/2010 y finalizó el 23/02/2010. Operado por la empresa CGS, S.A., fue realizada mediante el método convencional y wire-line, con la sonda Christensen-Boyles CS-2000 montada sobre camión (Fig. 55). Se utilizó agua como fluido de perforación, sin adición de lodos bentoníticos o polímeros. El sondeo alcanzó una profundidad de 170 m.



Figura 55. Camión operando en el sondeo de Bacarot.

Este sondeo se realizó dentro del proyecto dirigido por el IGME denominado “Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>” con el objetivo de estudiar las características de los niveles basales de la formación sello, Fm Torremendo y la formación almacén denominada en este trabajo como Fm las Ventanas.

Fue testificado geológicamente, realizando un reportaje fotográfico, y estudiado mediante métodos geofísicos, ensayos de Lugeon, ensayos UHM y diversos ensayos de laboratorio a los testigos.

Los resultados de la testificación geofísica (Tabla 15) incluyen valores de: litología, arcillosidad, porosidad, velocidad longitudinal ( $V_p$ ), velocidad transversal ( $V_s$ ), densidad, coeficiente de Poisson, módulo de cizalladura o rigidez, módulo de Young y módulo de compresibilidad.

Los ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas del sondeo han sido: porosidad total, densidad real, porosidad por inyección de Hg, difracción de rayos-X, cálculo de velocidad de propagación, y láminas delgadas.

Todos estos datos nos han permitido caracterizar la formación almacén (Fm las Ventanas) en sus niveles de techo y la formación sello (Fm Torremendo) en sus niveles de muro. Algunos de los resultados de los ensayos realizados nos han servido para compararlos con los datos obtenidos mediante la testificación geofísica de los sondeos profundos.

## **5.2. Columna geológica y de litofacies del sondeo Bacarot**

Las rocas carbonáticas pueden clasificarse según distintos criterios.

Se adopta en el presente apartado, para el sondeo Bacarot, la clasificación basada en criterios descriptivos y genéticos como la clasificación de Dunham (1962) y la clasificación textural de Embry & Klován (1971) utilizada para arrecifes calizos.

Se realizó la descripción con las muestras de mano obtenidas de los testigos de la perforación del sondeo SB y utilizando el microscopio electrónico en 33 láminas delgadas.

En los primeros diecinueve metros se perforan margas beigeas con óxidos de Fe y bioturbación, de textura granular, algo bioclásticas, con intercalaciones centimétricas a decimétricas más arcillosas, a partir de los 18 m se presentan, en tránsito gradual, las margas de color gris.

Continúa con 88 m de margas grises homogéneas en las que se observan bioclastos dispersos (ostreidos y equinidos), bioturbación y fragmentos de materia orgánica carbonosa. A continuación, y dentro de las litofacies micríticas, se observan 17 m de calcarenitas con algas, en las muestras SB-93 (108, 3 m-108, 4 m), SB- 94 (109, 5 m-109, 6 m) y SB-95 (110, 63 m-110, 75 m) se testifican bancos de algas. Intercalados en estos 17 m observamos, en varias muestras, litofacies calcareníticas, tipo floatstones en las muestras numeradas: SB-106 (121, 90 m-121, 96

m), SB-107 (123, 56 m-123, 65 m) y SB-108 (124, 15 m-124, 21 m) y litofacies rudstones en las muestras: SB-114 (132, 0 m-132, 05 m) y SB-115 (132, 45 m-132, 50 m).

Cerca de los 135 m de profundidad, en la muestra SB-117 (134, 7 m-134, 75 m), se perforan las calcarenitas con algas, las cuales se presentan hasta el final del sondeo en litofacies tipo grainstones, floatstone y rudstone, predominando la litofacies floatstone.

En la muestra SB-113 (130, 59 m-130, 65 m) y SB-116 (134, 06 m-134, 10 m) se observan algunos centímetros, de arcilla plástica verdosa.

A 168,42 m, en la muestra SB-148, encontramos un espejo de falla con relleno arcilloso, es una microfalla normal que buza 30°.

En la figura 56 se ilustra la columna del sondeo SB con la posición de las muestras estudiadas y las diferentes litofacies.

En la figura 57 se muestra la imagen de todas las muestras recogidas del sondeo pertenecientes al tramo almacén de las calcarenitas con algas.

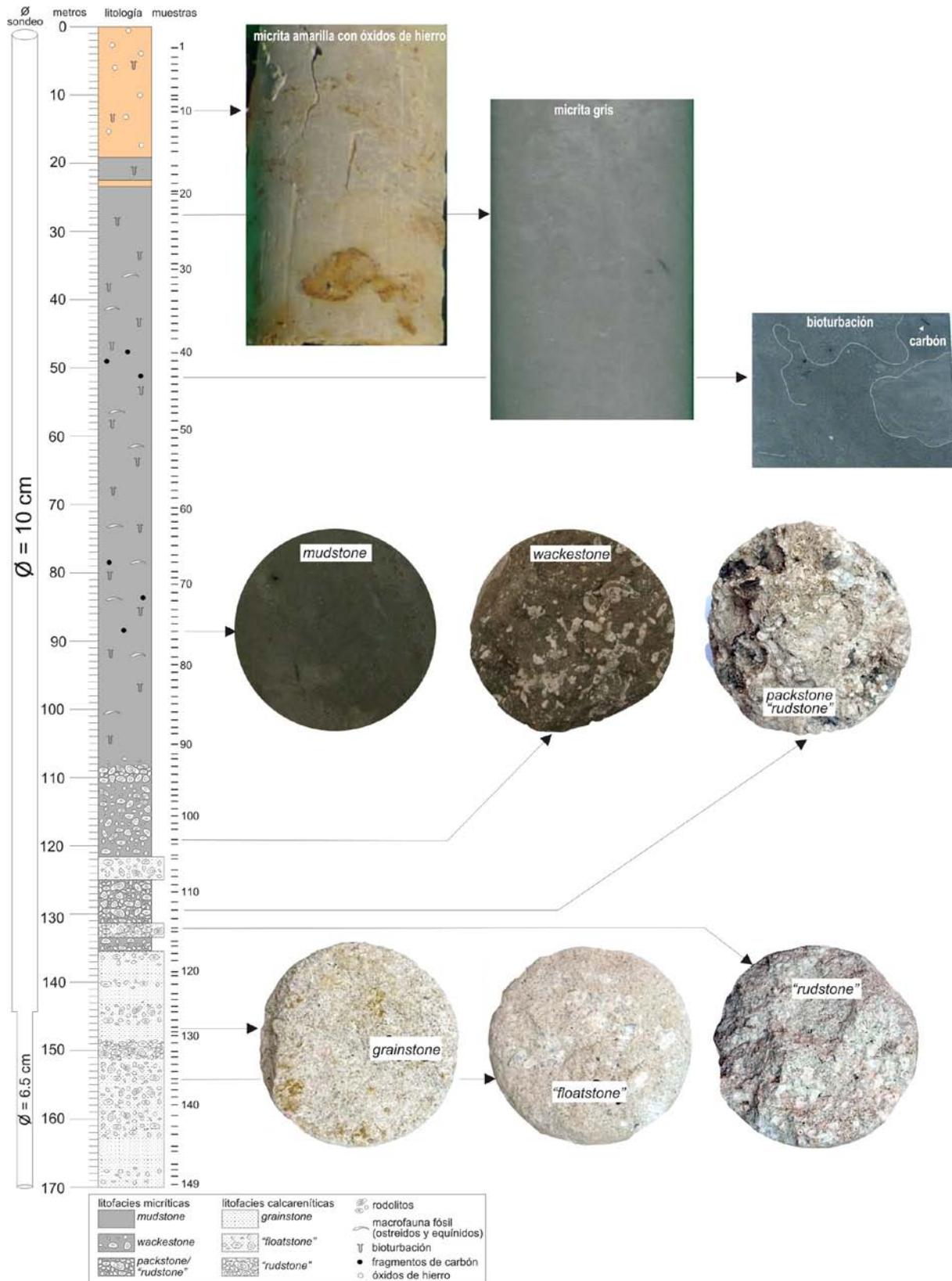


Figura 56. Columna de litofacies del sondeo Bacarot.

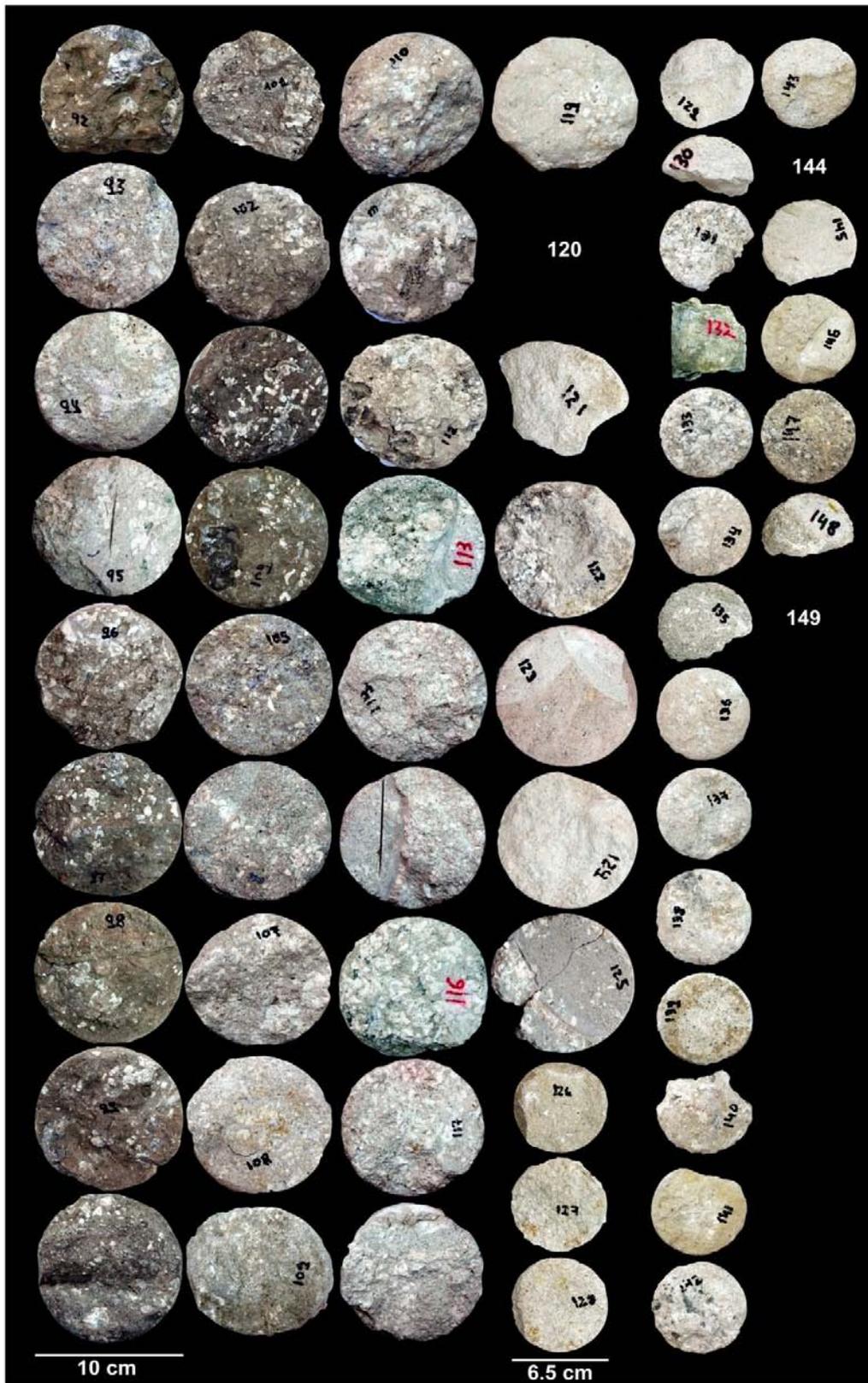


Figura 57. Imagen de las muestras del sondeo SB pertenecientes a las Calcarenitas de las Ventanas.

Muestras numeradas de la 92-149.

El sondeo Bacarot ha permitido reconocer con detalle los casi 100 m de muro del posible conjunto sellante de Margas de Torremendo así como algunas de sus características hidrogeológicas y petrofísicas más importantes. Asimismo nos ha permitido caracterizar el techo de los posibles tramos almacén de Calcarenitas de las Ventanas y determinar su densidad, porosidad y permeabilidad, entre otras características.

### 5.3. Testificación geofísica y ensayos hidráulicos

#### Testificación geofísica

Se efectuó una completa testificación geofísica del sondeo SB; fue realizada por la empresa CGS, S.A., y supervisada por Roberto Martínez, del IGME. Se utilizó el equipo de testificación de última generación CENTURY SYSTEM VI, con las sondas 8044, 9804, 9320 y 7201.

Se registraron los parámetros de: gamma natural (GAM, NAT), potencial espontáneo (SP), resistividad del fluido (RES), resistividad normal corta (RES, 16N), resistividad normal larga (RES, 64N), resistividad lateral (LATERAL), temperatura (SPECTRUM), televiwer acústico (AMPL) y gamma espectral (POTASIAM, THORIUM, URANIUM). En el Anexo IV se adjuntan los registros geofísicos del sondeo Bacarot.

Tras el procesado de los registros se obtienen los parámetros que se indican en la tabla 15.

Tramo Prof. (m)	Arcillosidad %	Porosidad (sonico) %	Vp m/s	Vs m/s	Densidad g/cc	Coefficiente de Poisson	Módulo de cizalladura (G) Mpa	Módulo de Young (E) Mpa	Módulo de compresibilidad (K) Mpa	Litología
2-22	27									Marga
22-55	23	45	2365	1300	2.58	0.20	5875	12125	7200	Marga
55-107	23	30	2975	1700	2.58	0.23	7950	17510	12850	Marga
107-111	6	29	3075	1640	2.58	0.25	7900	17265	13225	Calcarenita
111-120	20	26	3225	1740	2.58	0.27	8325	18850	16400	Calcarenita
120-144	5	30	3000	1650	2.58	0.26	7950	17050	13960	Calcarenita

Tabla 15. Resultados obtenidos del procesado de las diagrfias del sondeo SB (IGME, 2010).

De 2 a 22 metros de profundidad no se registran datos ya que en el momento de la testificación se encontraba ese tramo sin agua.

La porosidad con el registro sísmico en los tramos del almacén da valores muy optimistas, si comparamos estos resultados de porosidad con los obtenidos mediante los ensayos de laboratorio observamos como la porosidad calculada con el registro sísmico es menor a la media de la porosidad total obtenida para cada tramo, en esta obtenemos valores del orden del 40% para el tramo de 111 m a 120 m, y del 34 % para el tramo de 120 m a 144 m. Equiparándolos a los resultados obtenidos con los ensayos de porosimetría de Hg da valores muy parecidos, salvo con el dato de porosidad de la muestra número SB-149 que corresponde con el final del sondeo que es de aproximadamente 16%, en el caso del tramo de 120 m a 144 m con la porosimetría de Hg tenemos valores del 29%.

Para la formación sello ocurre lo contrario, con el registro sísmico se obtienen valores más altos de porosidad que los que se obtienen con la porosidad total en laboratorio, del orden del 27 %.

También podemos comparar la velocidad sísmica, obtenida en laboratorio mediante el osciloscopio digital y la velocidad  $V_p$  obtenida durante la testificación geofísica. Para el caso del sello y del almacén los valores de velocidad, para todos los tramos ensayados salvo para el último correspondiente al almacén de 120 m a 144 m, la media de la velocidad obtenida en laboratorio es mayor a la obtenida mediante la testificación.

### Ensayos Lugeon

Por la misma empresa, C.G.S. S.A, fueron realizados varios ensayos de permeabilidad en los niveles almacén, ensayos Lugeon, según ASTM D4630-96. Para determinar los resultados se utiliza la clasificación de macizos rocosos en función de su permeabilidad (Tabla 16).

Tipo de macizo	Unidades Lugeon	Presión (Kpa)
Muy impermeable	0-1	1000
Prácticamente impermeable	1-3	1000
Permeable	>3	1000
	1.5-6	500
Muy permeable	>3	1000
	>6	500
Olalla y Sopena, 1991		

Tabla 16. Clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad (González *et al.*, 2002).

Este tipo de ensayos se utilizan para determinar la permeabilidad de las rocas o terrenos consolidados. La permeabilidad obtenida se expresa en unidades Lugeon (U.L).

Los resultados permiten calcular el coeficiente de permeabilidad (k) de la roca en m/s a partir de la unidad de inyectabilidad denominada Lugeon, que vale 1 l/min·m bajo una presión de 10 kg/cm<sup>2</sup>; esto equivale aproximadamente  $1 \times 10^{-7}$  m/s.

En la tabla 17 se muestran los valores obtenidos para cada tramo ensayado:

Profundidad tramo (m)	Profundidad media (m)	Litología	Permeabilidad (U.L)	Resultado
105-110	107,5	Margas grises	0.24	Muy impermeable
115-120	117,5	Margocalizas bioclásticas	0.36	Muy impermeable
135-140	137,5	Calcarenitas con algas	3.92	Permeable
145-150	147,5	Calcarenitas con algas	Posible >6	Muy permeable
155-160	157,5	Calcarenitas con algas	Posible >6	Muy permeable
165-170	167,5	Calcarenitas con algas	Posible > 6	Muy permeable

Tabla 17. Resultados de ensayos Lugeon en el sondeo SB (IGME, 2010).

Para los tramos ensayados de los niveles sello, la formación Margas de Torremendo, entre los 105 m y 120 m, se obtienen valores de permeabilidad muy bajos. Las calcarenitas correspondientes al almacén, la Formación de las Ventanas, ensayada en los tramos desde los 135 m hasta los 170 m, presenta una permeabilidad muy alta, hay que tener en cuenta que estas calizas presentan diaclasas y microfallas por donde el fluido es capaz de circular con bastante facilidad.

### Ensayos hidráulicos de baja permeabilidad

Los ensayos de baja permeabilidad se han llevado a cabo por medio de la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica del IGME (UMH) (Fig. 58). Constituida por dos camiones, el primero, denominado vehículo Base, incluye el sistema de adquisición e interpretación de datos. El segundo, vehículo de Descenso, tiene como misión el descenso del equipo de profundidad (Mejías *et al.*, 1998).



Figura 58. Equipo de la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica del IGME.

Los ensayos se han realizado en los tramos de la formación sello de las Margas de Torremendo (Messiniense).

En función del valor de conductividad hidráulica ( $K$ ), las formaciones geológicas se pueden subdividir según Mejías, M. y López-Geta, J. A. 2003, en:

- formación de muy baja permeabilidad:  $K < 1 \times 10^{-12}$  m/s
- formación de baja permeabilidad:  $1 \times 10^{-12}$  m/s  $< K < 1 \times 10^{-9}$  m/s
- formación poco permeable:  $1 \times 10^{-9}$  m/s  $< K < 1 \times 10^{-7}$  m/s
- formación algo permeable:  $1 \times 10^{-7}$  m/s  $< K < 1 \times 10^{-5}$  m/s

Se llevaron a cabo dos tipos de ensayos hidráulicos diferentes, los resultados se ilustran en la tabla 18.

Techo (m)	Base (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)	Tipo de ensayo	Edad/Formación
41,35	43,14	3,10e-08	1,70e-08	Recuperación después de fase Slug	Messiniense/ Fm Torremendo
41,35	43,14	4,50e-08	2,50e-08	Ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario	Messiniense/ Fm Torremendo

T = Transmisividad. K = Conductividad hidráulica.

Tabla 18. Resultados de los ensayos hidráulicos de la UMH en el sondeo SB (IGME, 2010).

Los valores obtenidos para la formación sello de conductividad hidráulica son del orden de  $10^{-8}$  m/s, corresponde a una formación poco permeable, según la clasificación anteriormente citada.

#### **5.4. Ensayos de laboratorio**

Además del estudio litológico y geofísico se realizaron diversos ensayos de laboratorio para caracterizar la formación almacén/sello. Las 149 muestras que fueron recogidas directamente en el lugar donde se realizó la perforación han sido utilizadas para efectuar los diversos ensayos, éstos se realizaron en el laboratorio del Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Alicante, en el laboratorio de Petrología Aplicada de la misma universidad y en el laboratorio del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en Tres Cantos, Madrid.

El motivo principal por el que se realizan los diversos ensayos en laboratorio es caracterizar en todo lo posible la formación sello/almacén y obtener la máxima cantidad de propiedades petrofísicas y datos necesarios para definir las particularidades de las formaciones estudiadas. Además de poder comparar los resultados obtenidos en laboratorio con los conseguidos mediante la interpretación de los registros geofísicos del sondeo Bacarot y de los sondeos profundos.

En la figura 59 se ilustran las 33 muestras del sondeo SB utilizadas en la mayoría de los ensayos realizados, salvo para los ensayos del cálculo de velocidad sónica y calcimetrías en las cuales se emplearon más muestras obtenidas del sondeo.

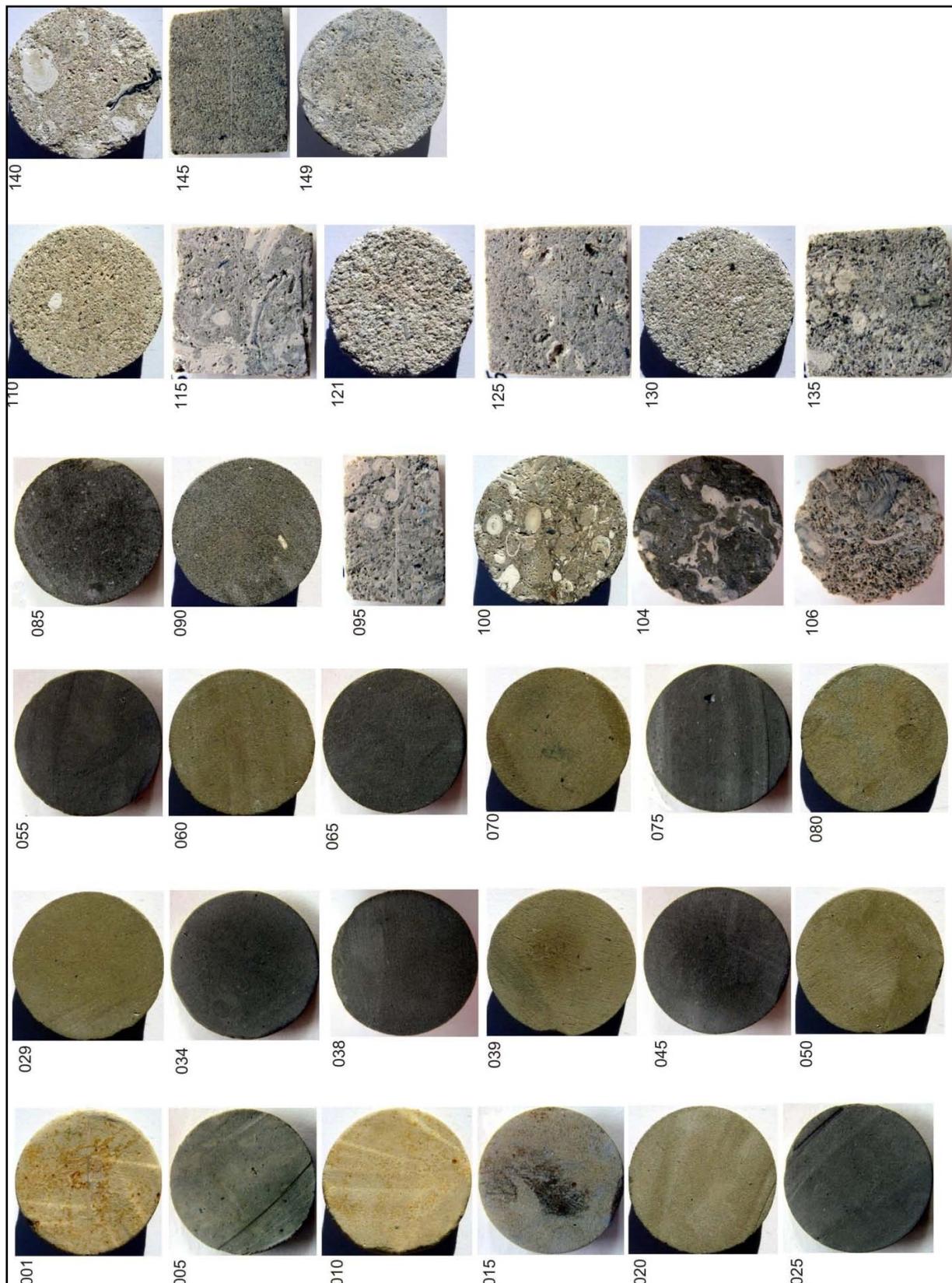


Figura 59. Imagen de las muestras tomadas en el sondeo SB.

### 5.4.1. Densidad real y porosidad total

#### Objetivo

Calcular la densidad real y a partir de ella la porosidad total.

#### Metodología

La densidad real ( $\rho_R$ ), conocida también como densidad de la fracción sólida o densidad verdadera (IUPAC, 1994), excluye la porosidad, y se define como el cociente entre la masa de la roca en seco,  $m$ , y el volumen de sólido,  $V_S$ , es decir:

$$\rho_R = \frac{m}{V_S} \quad (5.1)$$

Experimentalmente su valor puede obtenerse mediante el método del picnómetro de Helio.

La densidad real también se la conoce como densidad de grano ( $\rho_g$ ) y se puede obtener conociendo la fracción de cada mineral,  $X_i$ , que constituye la roca, es decir:

$$\rho_g = \sum_i X_i \rho_i = \frac{m}{V_S} = \rho_R \quad (5.2)$$

Donde  $\rho_i$  es la densidad de cada mineral, esta densidad se la denomina densidad de grano, aunque en esencia es la densidad real (Benavente, 2006).

Por el contrario, la densidad de conjunto o bulk,  $\rho_b$ , incluye la porosidad total (conectada y no conectada), y se define como el cociente entre la masa de la roca en seco,  $m$ , y el volumen de la probeta,  $V_{prob}$ , es decir:

$$\rho_b = \frac{m}{V_{prob}} = \frac{m}{V_S + V_A + V_C} \quad (5.3)$$

La porosidad total ( $P_T$ ) de una roca se puede calcular por medio de la combinación de la densidad real (o de grano) y la densidad de conjunto o bulk, es decir:

$$P_T [\%] = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_R}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_g}\right) \cdot 100 \quad (5.4)$$

La densidad se puede expresar en  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{kg/m}^3$ .

La porosidad total es el máximo valor de porosidad que presenta un material.

El helio es un gas que tiene una gran capacidad de penetración en la gran mayoría de los poros de la roca. Por ello, este gas permite evaluar de forma precisa el volumen total del sólido (excluyendo la porosidad) y, por lo tanto, la densidad real de la roca.

La cámara del picnómetro tiene un volumen conocido. La cámara está conectada a otra que tiene igual volumen y contiene el helio a una presión inicial conocida. Cuando se comunican las cámaras la presión inicial disminuye. Cuando se alcanza el equilibrio, se mide la presión final de la cámara. De esta forma, el volumen del sólido se puede obtener por la diferencia de presiones.

El picnómetro repite de forma automática este procedimiento un mínimo de 5 veces. A partir del valor medio de estas medidas, se calcula el valor de la densidad real usando el valor de la masa inicial previamente introducida como dato.

### **Material**

Para el cálculo de la densidad se utiliza el picnómetro de helio AccuPyc 1330 Micromeritics. Del laboratorio de Petrología Aplicada de la Universidad de Alicante.

Se realizó el ensayo a 33 muestras pertenecientes al sondeo SB.

### **Resultados**

En la tabla 19 se indican los valores obtenidos de densidad real y porosidad total para las 33 muestras del sondeo Bacarot.

Muestra sondeo SB	Profundidad (m)	Porosidad total (%)	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )	
SB-1	3,15-3,20	32,25	2,77	Nivel Sellante. Formación Torremendo
SB-5	7,68-7,75	31,17	2,75	
SB-10	12,55-12,60	35,09	2,78	
SB-15	18,30-18,35	29,78	2,73	
SB-20	24,15-24,20	25,68	2,72	
SB-25	30-30,5	30,24	2,72	
SB-29	34,95-35,05	26,66	2,73	
SB-34	40,10-40,15	31,34	2,72	
SB-38	44,60-44,65	22,77	2,70	
SB-39	45,75-45,80	24,55	2,75	
SB-45	53,45-53,50	26,64	2,73	
SB-50	59,05-59,10	23,34	2,74	
SB-55	64,65-64,70	31,14	2,72	
SB-60	70,25-70,30	21,69	2,71	
SB-65	76,05-76,10	26,54	2,72	
SB-70	81,80-81,85	19,71	2,74	
SB-75	87,55-87,60	27,70	2,69	
SB-85	99,16-99,25	22,98	2,70	
SB-90	105,03-105,08	22,35	2,74	
SB-95	110,63-110,75	37,65	2,74	
SB-100	115,72-115,79	29,47	2,75	Zona de transición
SB-104	119,70-119,76	20,26	2,75	
SB-106	121,90-121,96	38,53	2,77	Nivel Almacén. Formación las Ventanas
SB-110	126,95-127,03	36,33	2,76	
SB-115	132,45-132,50	37,93	2,75	
SB-121	139,04-139,10	47,15	2,78	
SB-125	143,55-143,64	30,26	2,72	
SB-130	147,85-147,90	43,45	2,80	
SB-135	153,10-153,15	35,05	2,72	
SB-140	157,97-158,02	32,93	2,77	
SB-145	164,85-164,92	35,06	2,75	
SB-149	169,74-169,80	27,83	2,80	

Tabla 19 .Valores de densidad real y porosidad total de las muestras del sondeo SB.

Despreciando las muestras más superficiales (SB-1, SB-5 y SB-10) cuyo resultado puede estar alterado por los procesos de meteorización y alteración de la roca, la porosidad en las margas presenta un valor medio de 25,7%. En el tramo transicional de margas y calcarenitas la porosidad es mayor que en el tramo de las margas, con una media del 33,3 % y en los últimos metros, ya en niveles netamente calcareníticos la porosidad aumenta obteniendo de media el 35,96 %.

#### 5.4.2. Porosimetría por inyección de Hg

##### Objetivo

Calcular la porosidad abierta, ( $\phi_o$ ) se conoce también como porosidad efectiva y se define de la misma forma como el volumen de poros abiertos ( $V_a$ ) o comunicados entre sí y con el exterior (accesibles al agua normalmente) por unidad de volumen total de roca ( $V$ ):

$$\phi_o = (V_a / V_t) \times 100 \quad (5.5)$$

##### Metodología

Esta porosidad se determina normalmente mediante técnicas experimentales, basadas en introducir un fluido en los poros y cuantificar su volumen. El cálculo de la porosidad abierta o efectiva por medio de un instrumento de laboratorio, denominado “Porosímetro de Hg”, es resultado de la búsqueda de valores confiables para uno de los parámetros importantes de la roca almacén. En el campo del almacenamiento de CO<sub>2</sub> es primordial tener datos que permitan obtener de manera fiable las propiedades de la roca almacén, como en este caso la porosidad efectiva, pues ella nos brinda la capacidad volumétrica de la roca de contener fluidos.

La porosimetría por inyección de Hg es una técnica indirecta para la caracterización del sistema poroso de los materiales, obteniéndose a partir de ella la distribución de la porosidad en función del tamaño de los poros.

Es una técnica sencilla y rápida, que se basa en el hecho de que el mercurio es un metal líquido que no moja, y por lo tanto, necesita que se someta bajo presión para que penetre en el sistema poroso. A medida que la presión aumenta, el mercurio va introduciéndose en poros cada vez más pequeños. La relación entre la presión ejercida sobre el mercurio ( $p$ ), y el tamaño de los poros (radio,  $r$ ) está regulada por la ecuación de Washburn (1921) (5.6).

$$p = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (5.6)$$

Donde  $\sigma$  ( $480 \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) es la tensión superficial del mercurio y  $\theta$  ( $130^\circ$ ) es el ángulo de contacto entre el mercurio y la superficie del poro. Esta ecuación supone que el poro tiene una geometría cilíndrica (en esencia la ecuación de Washburn es un caso particular de la ecuación de Laplace) (Benavente, 2002).

La caracterización del sistema poroso con esta técnica se basa en aumentar la presión de inyección y medir el volumen (acumulado) de mercurio que entra en la roca, de esta forma se obtiene la curva de intrusión. Por otro lado, llegado al punto máximo de presión y volumen de mercurio intruido en la roca, se decrece gradualmente la presión (para forzar la salida del mercurio), registrando la curva de extrusión (Fig. 60A). La diferencia de volumen de los poros durante la curva de intrusión (entrada de mercurio en el material) y el ocupado durante la extrusión (salida de mercurio), para una misma presión, se debe a la dificultad que tiene el mercurio en abandonar los poros tipo cuello de botella o throat, y a la variación del ángulo de contacto del mercurio. Este fenómeno, denominado histéresis, da una idea de la porosidad atrapada, la cual es muy importante en la retención de fluidos, en la alteración de la roca, etc.

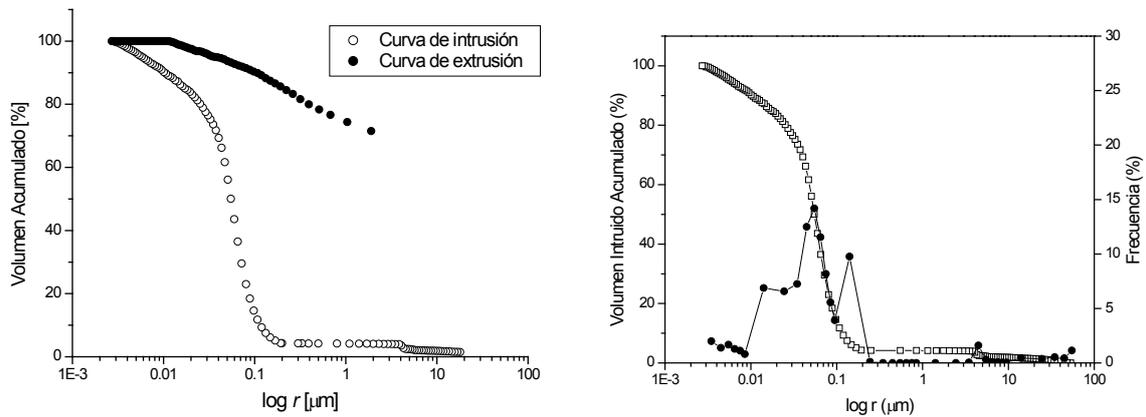


Figura 60. A) Curvas de intrusión-extrusión. B) Intrusión y distribución de tamaño de poros (Benavente, 2003).

De esta técnica se puede obtener información del volumen de mercurio intruido,  $V_{int}$ , y, por lo tanto, la porosidad conectada. Para ello, el porosímetro obtiene la densidad de conjunto,  $\rho_b$ , a una presión de mercurio de 0.003 MPa, y junto al volumen intruido por gramo de material calcula la porosidad como:

$$P = \rho_b[\text{g}/\text{cm}^3] \cdot V_{int}[\text{cm}^3/\text{g}] \quad (5.7)$$

El cálculo de la densidad de conjunto puede ser errónea si la muestra contiene poros de gran tamaño. De forma análoga se obtiene la densidad aparente, debido a que el volumen aparente se obtiene como la diferencia del volumen de la probeta (procedente de la densidad de conjunto) y el volumen intruido.

Además, se puede calcular la distribución de tamaños de poros derivando la curva acumulada de intrusión con respecto al radio (Fig. 60B). Si se considera que el sistema poroso está formado por poros tipo chamber situados entre los poros tipos throat, la porosimetría de intrusión de mercurio proporciona principalmente información acerca de los poros tipo throat.

Debido a la relevancia de este tipo de poros en los fenómenos de transporte de fluidos en la roca, su durabilidad, etc, la caracterización del sistema poroso con porosimetría de mercurio es básica y necesaria. El intervalo de radios de poros que se puede determinar a partir de esta técnica comprende desde 0.002 a 100  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, la densidad obtenida con esta técnica corresponde a una densidad aparente, la cual solo tiene en cuenta los poros que están en este rango, y los no conectados.

El área superficial,  $S$  [ $\text{m}^2/\text{g}$ ], de todos los poros se puede obtener aplicando la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1}{\sigma |\cos \theta|} \int_0^{V_{\text{tot}}} p dV \quad (5.8)$$

Donde  $p$  es la presión a la que se intruye un incremento de volumen de mercurio  $dV$ , y  $V_{\text{tot}}$  es el volumen total intruido.

La mayor limitación de la porosimetría de mercurio se debe a la propia complejidad del sistema poroso de la gran mayoría de los sólidos naturales. En primer lugar, la técnica está basada en el modelo de tubos capilares, hecho que no se cumple en este tipo de rocas. En segundo lugar, la geometría de las conexiones entre poros de diferente dimensión (throat y chamber) provoca que los poros tipo chamber se caractericen incompletamente y, que los poros tipo throat (menor sección) se sobreestimen (Fig. 61). Además, las presiones empleadas en el desarrollo de un ensayo de porosimetría son tan elevadas que puede surgir la cuestión de si la estructura porosa natural puede ser dañada y modificada durante el mismo. Sin embargo, no hay que olvidar que el daño producido por la presión dependerá de la calidad del material.

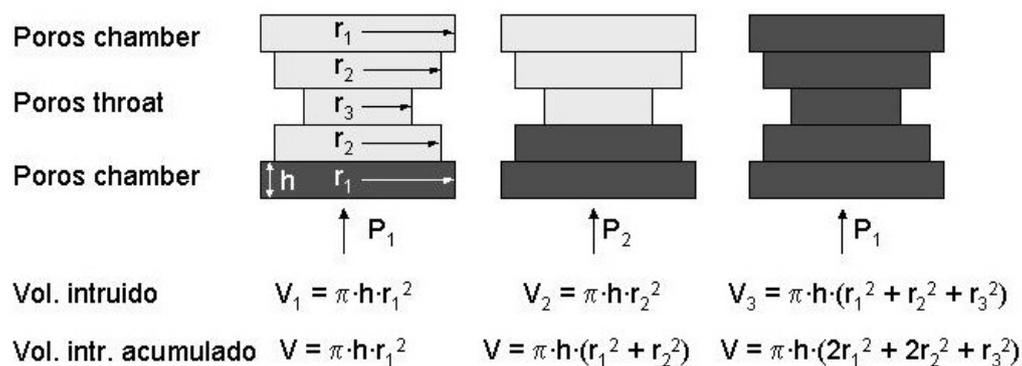


Figura 61. Relación entre la presión ejercida sobre el mercurio y el volumen intruido en la roca (Benavente, 2008).

Todas estas limitaciones, no significan que la utilización de esta técnica no sea adecuada para el estudio del sistema poroso. Por el contrario, es una técnica utilizada ampliamente y muy resolutiva, siempre que se lleve a cabo combinada con otras técnicas adicionales que permitan obviar las limitaciones anteriormente señaladas.

**Material**

Porosímetro de mercurio Autopore IV 9510 de Micromertics. Del laboratorio de Petrología Aplicada de la Universidad de Alicante.

Se realizó el ensayo a 4 muestras pertenecientes al sondeo SB.

**Resultados**

Se realizaron varias medidas, una al material sellante y tres al almacén, en la tabla 20 se indica el número de las muestras a las que se hizo el ensayo y los resultados obtenidos.

Nº Muestra	Porosidad por inyección de Hg (%)
SB-45	20,18
SB-135	29,21
SB-145	29,98
SB-149	16,34

Tabla 20. Muestras y resultados obtenidos mediante porosimetría con inyección de Hg.

En la tabla 21 se indica la comparativa entre los valores de porosidad total (apartado 5.4.1.) y los obtenidos mediante porosimetría de Hg para las mismas muestras del sondeo Bacarot.

Muestra	Porosidad total (%)	Porosidad por inyección de Hg (%)	Diferencia
SB-45	26,64	20,18	-6,46
SB-135	35,05	29,21	-5,84
SB-145	35,06	29,98	-5,08
SB-149	27,83	16,34	-11,49

Tabla 21. Comparativa de los resultados de porosidad total y porosidad por inyección de Hg en las muestras del sondeo SB.

Existe una correspondencia cualitativa en cuanto a valores, a mayor porosidad según la densidad mayor también por inyección de Hg, sin embargo por el procedimiento de porosimetría de Hg se obtienen valores más bajos del orden de 5 a 7 unidades de porosidad (del orden del 15 al 25% menos de porosidad), despreciando el dato, quizás anómalo, de la muestra SB-149. Sin embargo los valores obtenidos por inyección de Hg son siempre más bajos que los obtenidos por densidad ya que esta técnica considera los poros abiertos, los accesibles al mercurio.

La curva de distribución del volumen de poros en la muestra SB-45 (Fig. 62) de las margas miocenas (sello), muestra que entre los valores de 0,04 y 0,4  $\mu\text{m}$  se encuentra el tamaño de los conductos con una frecuencia de 0,015 cc/g.

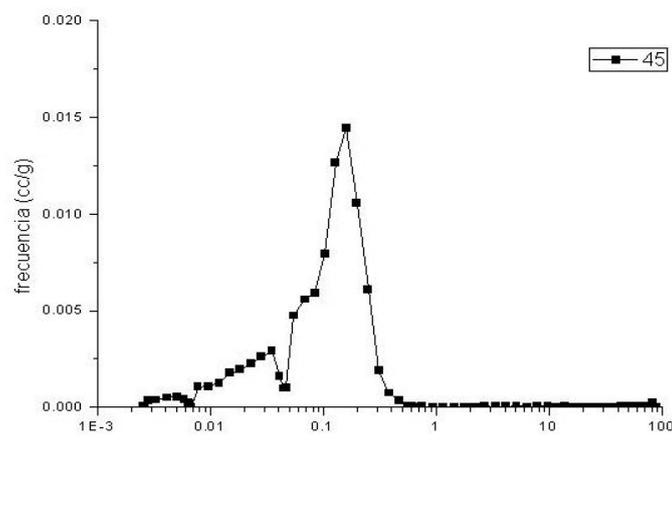


Figura 62. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB- 45. Margas de Torremendo.

La curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB-135 (Fig. 63) corresponde al nivel almacén, las calcarenitas de la Formación las Ventanas, esta muestra presenta principalmente tres tipos de distribución, la primera con valores desde 0,05 hasta 0,5  $\mu\text{m}$  y frecuencia de 0,010 cc/g, el segundo tipo de 0,5 a 2  $\mu\text{m}$  con menor frecuencia que la anterior, de 0,005 cc/g y una tercera distribución con valores de 2 a 15  $\mu\text{m}$  y frecuencia de 0,0125 cc/g.

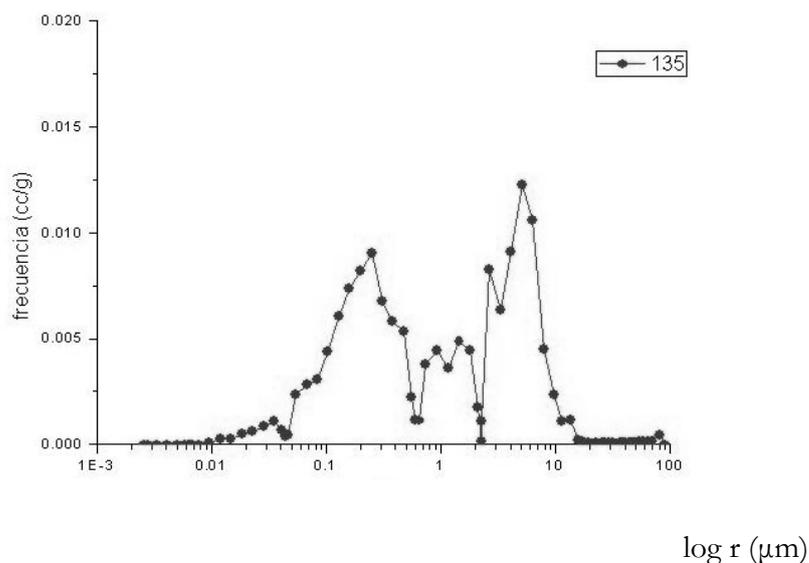


Figura 63. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB-135. Calcarenitas de las Ventanas.

La curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB-145 (Fig. 64) corresponde como la anterior al nivel almacén, las calcarenitas de la Formación las Ventanas, esta muestra presenta también tres tipos de distribución, la primera con valores desde 0,05 hasta 0,6  $\mu\text{m}$  y frecuencia de 0,010 cc/g, el segundo tipo de 0,6 a 2  $\mu\text{m}$  con mayor frecuencia que la anterior, de 0,012 cc/g y una tercera distribución con valores de 2 a 3  $\mu\text{m}$  y frecuencia de 0,015 cc/g.

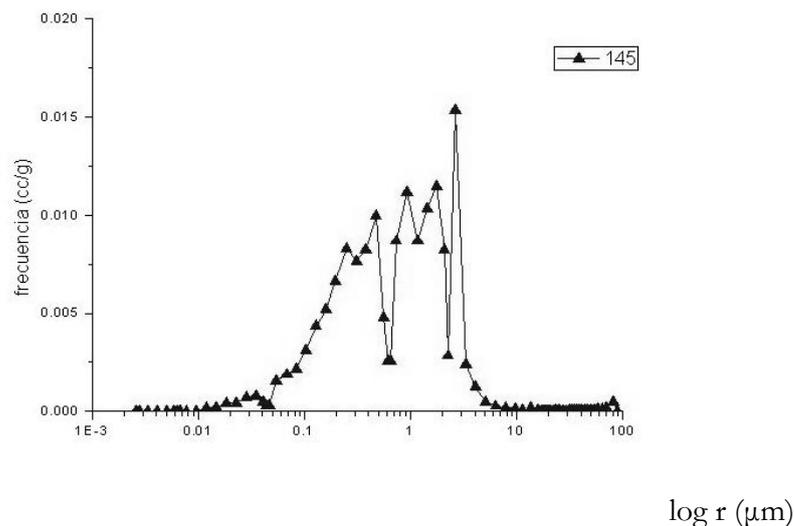


Figura 64. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB- 145. Calcarenitas de las Ventanas.

La curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB-149 (Fig. 65) las calcarenitas de la Formación las Ventanas, se distinguen tres tipos de distribución, la primera con valores desde 0,04 hasta 0,6  $\mu\text{m}$  y la frecuencia no llega a 0,005  $\text{cc/g}$ , el segundo tipo de 0,6 a 2  $\mu\text{m}$  con mayor frecuencia que la anterior, de 0,007  $\text{cc/g}$  y una tercera distribución con valores de 2 a 5  $\mu\text{m}$  y de frecuencia 0,003  $\text{cc/g}$ .

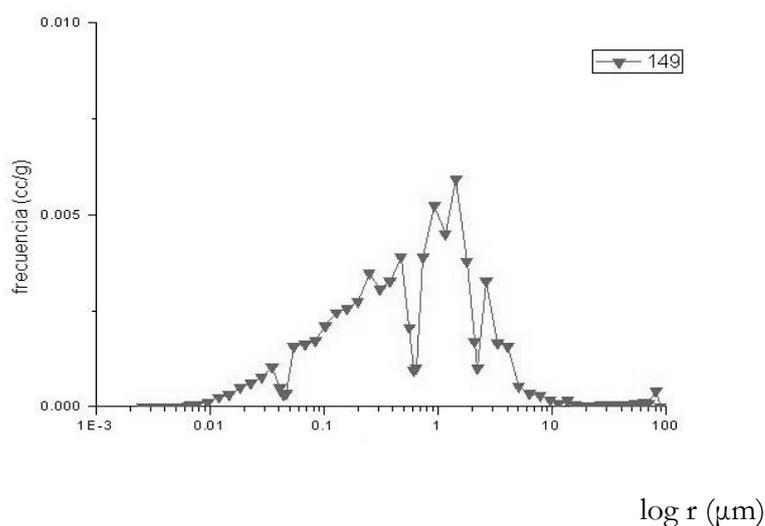


Figura 65. Curva de distribución del volumen de poros de la muestra SB- 149. Almacén Calcarenitas de las Ventanas.

En la figura 66 se muestra una comparativa de las cuatro curvas de distribución obtenidas de las muestras, se pone de manifiesto la gran diferencia de la muestra correspondiente a las margas, la formación sello, con las que pertenecen al almacén, las calcarenitas. Las muestras SB-135 y SB-145 presentan distribuciones parecidas en cuanto a tamaño y frecuencia, en la muestra SB-149 las frecuencias son menores.

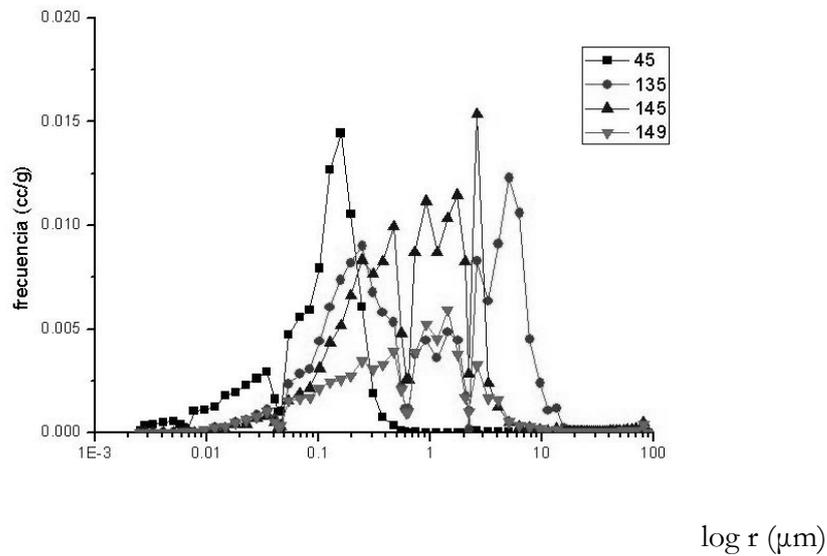


Figura 66. Comparativa de las curvas de distribución del volumen de poros.

Lo más importante de estos datos es el tamaño de poro, a menor tamaño y menor porosidad, menos permeabilidad. Esto se explica mediante la ecuación De Kozeny.

Kozeny derivó una de las relaciones más importantes que expresan la permeabilidad en función de la porosidad y el tamaño de poro.

La velocidad de flujo volumétrico o caudal,  $Q$ , en un tubo cilíndrico, de radio  $r$ , se puede expresar con la ecuación de Hagen-Poiseulle (5.9).

$$Q_{tubo} = \frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot r^4}{8\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (5.9)$$

Donde  $V$  es el volumen de fluido. Si se considera que el sistema poroso de las rocas está constituido en tubos capilares (cilíndricos), la ecuación anterior se puede escribir como:

$$Q = nQ_{tubo} = \frac{n\pi \cdot r^4}{8\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (5.10)$$

Teniendo en cuenta la ecuación de Darcy:

$$Q = -\frac{kA_{prob} \Delta p}{\mu L} \quad (5.11)$$

La permeabilidad se puede escribir como:

$$k = \frac{n \cdot \pi \cdot r^4}{8A_{prob}} \quad (5.12)$$

Por definición, la porosidad se puede escribir como:

$$P = \frac{V_{poro}}{V_{prob}} = \frac{n\pi r^2 L}{A_{prob} L} = \frac{n \pi r^2}{A_{prob}} \quad (5.13)$$

Por lo que la permeabilidad se puede escribir en función de la porosidad y el tamaño de tubo capilar como:

$$k = \frac{r^2}{8} P \quad (5.14)$$

La ecuación (5.14) es la ecuación genérica de Kozeny, muestra que la permeabilidad depende conjuntamente del tamaño de poro y de la porosidad. Con dicha ecuación se puede estimar de manera aproximada la permeabilidad.

Siendo:

$r$  = radio de poros. Se coge la familia de poros de mayor tamaño, que son las que más contribuyen al transporte de fluidos (Bourbié *et al.*, 1986; Benavente, 2006).

$P$  = Porosidad conectada.

Los resultados obtenidos para las muestras del sondeo SB son los siguientes:

Muestra SB-45:  $k = ((0,2 \mu\text{m})^2/8) \cdot (0.20) = 1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2 \approx 1 \text{ mD}$ . Esta muestra pertenece al tramo considerado como sello (Margas de Torremendo).

Muestra SB-145:  $k = ((3 \mu\text{m})^2/8) \cdot (0.30) = 0,337 \mu\text{m}^2 \approx 337 \text{ mD}$ . Esta muestra es del tramo almacén (Calcarenitas de las Ventanas).

### 5.4.3. Calcimetrías

#### Objetivo

Consiste en la cuantificación del contenido en carbonatos de la muestra de roca, tomando una cantidad inicial de muestra, de peso conocido, es completamente descarboxatada mediante ataque con ácido clorhídrico. El residuo resultante corresponde a los componentes insolubles, fundamentalmente cuarzo y otros minerales del grupo de los silicatos.

#### Metodología

Se realizaron los ensayos en el laboratorio del Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Alicante (Fig. 67).

El procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Secado previo de la muestra (24 horas en un horno a 60°C). Tomar una determinada cantidad de muestra (unos 2-5 gramos) y pesarla, peso de la muestra de roca (Mroc).
- Preparar un papel de filtro, secarle igualmente 24 horas en un horno a 60°C y pesarle, peso del papel de filtro (Mfil).
- Poner la muestra en el vaso de precipitado y añadir poco a poco ácido clorhídrico diluido y agitar ligeramente. Cuando disminuya la efervescencia añadir algo más de ácido, hasta que la reacción termine.
- Finalizada la reacción, filtrar la muestra, arrastrando con ayuda del frasco lavador todas las partículas sólidas del fondo o de las paredes del vaso al papel de filtro.
- Poner a secar el conjunto (papel de filtro con el residuo insoluble) en las mismas condiciones de secado (24 horas en el horno a 60°C). Dejar que enfríe en un desecador (para evitar la absorción de humedad) y pesarle, peso del conjunto papel de filtro con el residuo insoluble (Mfil+ins)

Y finalmente realizar los cálculos para obtener el contenido de material insoluble de la muestra, expresado en porcentaje:

$$\% \text{Residuo insoluble: } ((M_{\text{fil}} + \text{ins}) - M_{\text{fil}} / M_{\text{roc}}) \times 100 \quad (5.15)$$

Por lo tanto:

$$\% \text{CO}_3 = \% \text{Residuo insoluble} - 100.$$

### Material

- Vasos de precipitado, embudos y matraces erlenmeyer.
- Balanza de precisión (sensibilidad:  $\geq 0,01$  g).
- Papel de filtro (tamaño de poro medio).
- Ácido clorhídrico diluido (30 %).
- Frasco lavador.
- Muestra de roca (preferentemente en polvo).

Se realizó el ensayo a un total de 71 muestras pertenecientes al sondeo SB.



Figura 67. Laboratorio del Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Alicante.

### Resultados

El contenido en carbonatos en la formación de margas, salvo en aislados niveles, se mantiene constante, entre el 60 y 70% experimentando un importante aumento en proximidad al contacto con la Formación de Calcarenitas de las Ventanas y sobre todo en estas, a 110 m de profundidad en donde alcanza valores superiores al 85%. Estos valores permiten clasificar estas rocas como calizas-margosas, en el caso de las Margas de Torremendo y como calizas en el de la Formación de Calcarenitas de las Ventanas.

A escala de afloramientos continuaremos con la denominación tradicional de Margas de Torremendo y Calcarenitas de las Ventanas.

En la tabla 22 se indican los valores medios para la formación sello, la zona de transición y el nivel considerado como almacén.

Tramos sondeo Bacarot	% CO <sub>3</sub>
Sello. Fm Torremendo	65.6
Zona de transición	85.9
Almacén. Fm las Ventanas	94.5

Tabla 22. Valores medios de porcentaje de carbonatos en las muestras del sondeo SB.

Los valores obtenidos durante la realización de las calcimetrías para cada una de las muestras del sondeo SB se detallan en el Anexo V.

El alto contenido en carbonato de la formación puede ser un factor de favorabilidad de cara a constituir un almacén ya que su permeabilidad puede verse aumentada por una posible karstificación así como por mayor capacidad de atrapamiento del CO<sub>2</sub>, reaccionando más fácilmente con los componentes de la roca. El inconveniente serían los problemas de resedimentación del carbonato atacado y produciría la obstrucción de zonas que eran permeables inicialmente antes de la inyección.

Por otro lado la determinación de la composición mineralógica de la roca es fundamental para predecir las distintas posibilidades y potencialidad de atrapamiento del CO<sub>2</sub> en ella.

#### 5.4.4. Velocidad de propagación

##### Objetivo

Obtener el valor de la velocidad de propagación de la onda P para cada muestra (Vp).

##### Metodología

Las muestras fueron secadas 48 horas a 70°C.

Las condiciones estándar del osciloscopio digital de fosforo Tetronik TDS 3012B son:

Rep Rate: 20 Hz; Damping: 200 Ohmios; Pulse Height: 100; Phase: Normal; Gain: 40(dB);

Parámetros utilizados según el número de muestra:

**De la muestra SB-1 a la SB-100:** Transductor: 0,5 MHz/1.0`` Polarización 507637/507638. Rep Rate: 20 Hz; Damping 500 Ohmios; Pulse height: 100; Phase Normal; Gain: 60 (dB).

**De la muestra SB-101 a la SB-149:** Transductor: 1.0 MHz 10``. 510430/510442; Rep Rate: 20 Hz; Damping 500 Ohmios; Pulse Height: 200; Phase Normal; Gain: 60 (dB).

El aparato mide el tiempo de tránsito en microsegundos que tarda una onda en viajar a través de la muestra.

Tomando la longitud ( $l$ ) con un calibre para cada muestra y el valor obtenido con el osciloscopio, tiempo en segundos ( $t$ ), obtenemos el valor de la velocidad.

### Material

Equipo: Panametrics 5058 PR. Osciloscopio: TDS 3012 B. (Fig. 68)

Ensayo: Determinación de la velocidad de propagación del sonido. Normalizado según: UNE-EN14579. Gel de transmisión: EkoGel, marca: Lessa.

Ensayo realizado en el laboratorio de Petrología Aplicada de la Universidad de Alicante.

Se realizó el ensayo a 149 muestras tomadas del sondeo SB.



Figura 68. Osciloscopio digital y equipo usado para el cálculo de la velocidad de propagación del sonido.

## Resultados

La velocidad de propagación del sonido pone de manifiesto, al menos, cuatro tramos con diferentes valores (Tabla 23), el primer tramo de las margas beiges, comienza con velocidades bajas, entre 2.000 y 2.500 m/s, a continuación, en las margas grises, aumenta la velocidad hasta los 3.000 m/s, a partir de los 58 m de profundidad comienzan valores más altos entre 3.000 y 3.500 m/s llegando a los 90 m de profundidad donde disminuye la velocidad pero los cambios de velocidad se hacen más significativos entre muestras, llegando a tener valores desde los 2.500 m/s hasta valores de más de 4.000 m/s y a partir de los 115 m volvemos a tener de media menores velocidades pero igualmente con variaciones notables entre las muestras, rondando los valores entre 2.000 y 4.000 m/s.

Se podría concluir que el nivel sellante tiene valores de velocidad más uniformes, según aumenta la profundidad los valores de la velocidad van aumentando progresivamente, pero cuando comienza el tránsito a la formación de las calcarenitas las variaciones de velocidad se acentúan.

En el Anexo VI se adjuntan los resultados de velocidad obtenidos para cada muestra.

Tramos (m)	Litología	Intervalos velocidad (m/s)
0-20	Margas beiges	2.000-2.500
20-90	Margas grises	2.500- 3.500
90-115	Margas grises y zona de transición	2.500-4.000
115-170	Calcarenitas	2.000-4.000

Tabla 23. Valores medios de la velocidad de propagación del sonido para los tramos del sondeo Bacarot.

En una misma roca, con igual composición mineral y textural, se puede decir que cuanto mayor es la velocidad, la porosidad es menor, pero en nuestro caso cambia la composición mineralógica y en particular hay silicatos, los cuales bajan mucho la velocidad.

### **5.4.5. Difracción de rayos-X**

#### **Objetivo**

Determinar con el máximo detalle la composición mineralógica de las rocas almacén y sello.

#### **Metodología y material**

Se realizó el ensayo de difracción de rayos- X a 33 muestras pertenecientes al sondeo Bacarot, en el laboratorio del IGME en Tres Cantos. El procedimiento de ensayo fue el método de polvo cristalino. Las medidas se tomaron con el equipo Xpert Pro de Panalitical (PTE-RX-004) y se utilizó el software High Score de Panalytical y la Base de Datos de ICDD.

#### **Resultados**

En la tabla 24 se resumen los principales resultados obtenidos mediante los ensayos de difracción para cada muestra.

De las muestras SB-1 a SB-90, correspondientes a las Margas de Torremendo, se obtienen valores menores de calcita que los obtenidos en las Calcarenitas de las Ventanas, de SB-95 a SB-148. Los resultados obtenidos de dolomita y cuarzo son mayores en las margas que en las calcarenitas, al contrario pasa con la albita, las calcarenitas presentan porcentajes más elevados. La moscovita y microclina se presentan en las margas y no se detectan en las calcarenitas.

Siglas laboratorio	Muestras sondeo SB	Calcita %	Dolomita %	Ankerita %	Cuarzo %	Moscovita %	Albita %	Microclina %	Mg en calcita %
2990-01	SB-1	63,7	5,5	2,9	15,6	7,5	2,4	2,5	1,24
2990-02	SB-5	63,8	7,7	4,9	13,8	6,2	2,4	1,3	1,24
2990-03	SB-11	63,6	3,8	2,4	16,5	7,5	2,4	3,8	1,24
2990-04	SB-15	60,5	6,3	4,2	17,1	7,2	2,3	2,4	1,24
2990-05	SB-20	55,5	7,7	7,7	13,7	6,6	2,1	6,7	1,24
2990-06	SB-25	67,5	4,6	4,1	14,6	6,6	2,6		1,24
2990-07	SB-30	48,9	13,5	15,8	13,1	6,8	1,9		1,24
2990-08	SB-34	67,5	4,6	4,1	14,6	6,6	2,6		1,24
2990-09	SB-37	61,2	8,5	6,1	14,7	7,2	2,3		1,24
2990-10	SB-39	60,6	5,8	6,5	17,6	7,2	2,3		1,24
2990-11	SB-45	61,5	5,3	4,7	18,8	7,3	2,4		1,24
2990-12	SB-50	58	7	7,6	16	6,9	2,2	2,3	1,24
2990-13	SB-55	58	6,5	8,5	14,3	6,9	2,2	3,5	1,24
2990-14	SB-60	59,1	7,2	7,3	13,7	8,2	2,3	2,4	1,24
2990-15	SB-65	55,3	8,1	7,2	17,3	7,7	2,1	2,2	1,24
2990-16	SB-70	56,5	6,4	6,5	20,5	7,8		2,3	1,24
2990-17	SB-75	60,3	8,9	5,6	15,8	7,1		2,4	1,24
2990-18	SB-80	54,9	7,1	8	19,1	8,7	2,1		1,24
2990-19	SB-85	66,8	4	3,6	20,4	2,6	2,7		1,24
2990-20	SB-90	68,1	5,8	11,4	9,3		2,6	2,7	1,81
2990-21	SB-95	88,4	1,5	6,1	0,6		3,4		1,11
2990-22	SB-100	80,3	2,1	12,2	2,3		3,1		1,81
2990-23	SB-104	71,5	3,1	15,4	7,3		2,7		1,81
2990-24	SB-106	91	0,8	4,2	0,7		3,5		1,81
2990-25	SB-110	83,9	1,4	10,2	1,2		3,2		1,81
2990-26	SB-115	87,8	1,5	6,7	0,6		3,3		1,81
2990-27	SB-121	90,9	0,8	4,8			3,4		1,81
2990-28	SB-125	89,1	1,5	4,7	1,3		3,4		1,81
2990-29	SB-130	89,7	1,5	4,1	1,3		3,4		1,11
2990-30	SB-135	92,2	0,8	2,8	0,7		3,5		1,11
2990-31	SB-140	88,4	2,3	5,4	0,6		3,4		1,11
2990-32	SB-145	87,3	1,5	6,6	1,3		3,3		2,48
2990-33	SB-148	90,3	1,5	3,4	1,3		3,4		1,81

Tabla 24. Resultados de los análisis por difracción de rayos-X en las muestras del sondeo SB.

### 5.5. Comparativa de los resultados del sondeo SB

La perforación del sondeo Bacarot y el estudio detallado de los testigos extraídos, mediante visu, ensayos de laboratorio y testificación geofísica, nos ha permitido caracterizar y definir con gran detalle los niveles más interesantes de la dualidad almacén/sello constituida por las Calcarenitas de las Ventanas y Margas de Torremendo, especialmente de los niveles de muro del sello, inmediatamente en contacto con los de techo de la formación almacén.

De este estudio, además de haber determinado parámetros esenciales como porosidad y permeabilidad, se extraerán importantes conclusiones en cuanto al potencial de entrapamiento de CO<sub>2</sub>, en caso de futuras investigaciones, al determinar la composición mineralógica de la roca almacén, pero sobretodo nos permitirá establecer una comparativa, al menos relativa, de los cambios porcentuales que experimentan los parámetros de los niveles de interés con la profundidad, correlacionando y analizando las variaciones de los datos obtenidos mediante la realización y estudio de este sondeo y los calculados en los niveles equivalentes perforados por los sondeos profundos.

En el caso de la velocidad de propagación, las Margas de Torremendo presentan una línea bastante regular y uniforme delatando la homogeneidad de los niveles (Fig. 69), mientras que en las calcarenitas esta línea es una quebrada continua con notables diferencias entre unos puntos, definiendo la heterogeneidad de los niveles, posible heterometría, factor favorable que requiere una roca almacén.

También se ponen de manifiesto características diferenciables entre los niveles sello y almacén, algunas de ellas evidentes, como son los contenidos en carbonatos, en mayor cantidad en las calcarenitas que en las margas.

Sin embargo la porosidad total es muy similar en ambas litologías si bien los picos más altos se presentan en las rocas carbonatadas-detríticas. Lo anterior viene a confirmar que solo por una porosidad alta no podemos catalogar una litología como favorable para almacenar CO<sub>2</sub>. Al contrario, en caso de una porosidad baja, como pueden tener las rocas carbonatadas (calizodolomías), la roca puede ser favorable si posee una permeabilidad adecuada debida a la intensidad y frecuencia de las discontinuidades.

Continuando con el parámetro de porosidad, comparando los resultados obtenidos, en muestras de calcarenitas, en el sondeo Bacarot y en los sondeos profundos observamos como la porosidad de estas rocas disminuye con la profundidad hasta más de un 25%. En los testigos del sondeo SB

tomados a una profundidad comprendida entre los 100 y 170 m aproximadamente, la porosidad media obtenida es del 33,3 % al 35,96%, mientras que en los sondeos petrolíferos, estas rocas a profundidades superiores a los 600 m dieron valores medios de porosidad del 8 al 17%. Por lo anterior, cabe establecer la hipótesis de que ocurrirán fenómenos similares con otros parámetros, en especial con la permeabilidad, incluso cuando esta sea debida a la fracturación y discontinuidades en general.

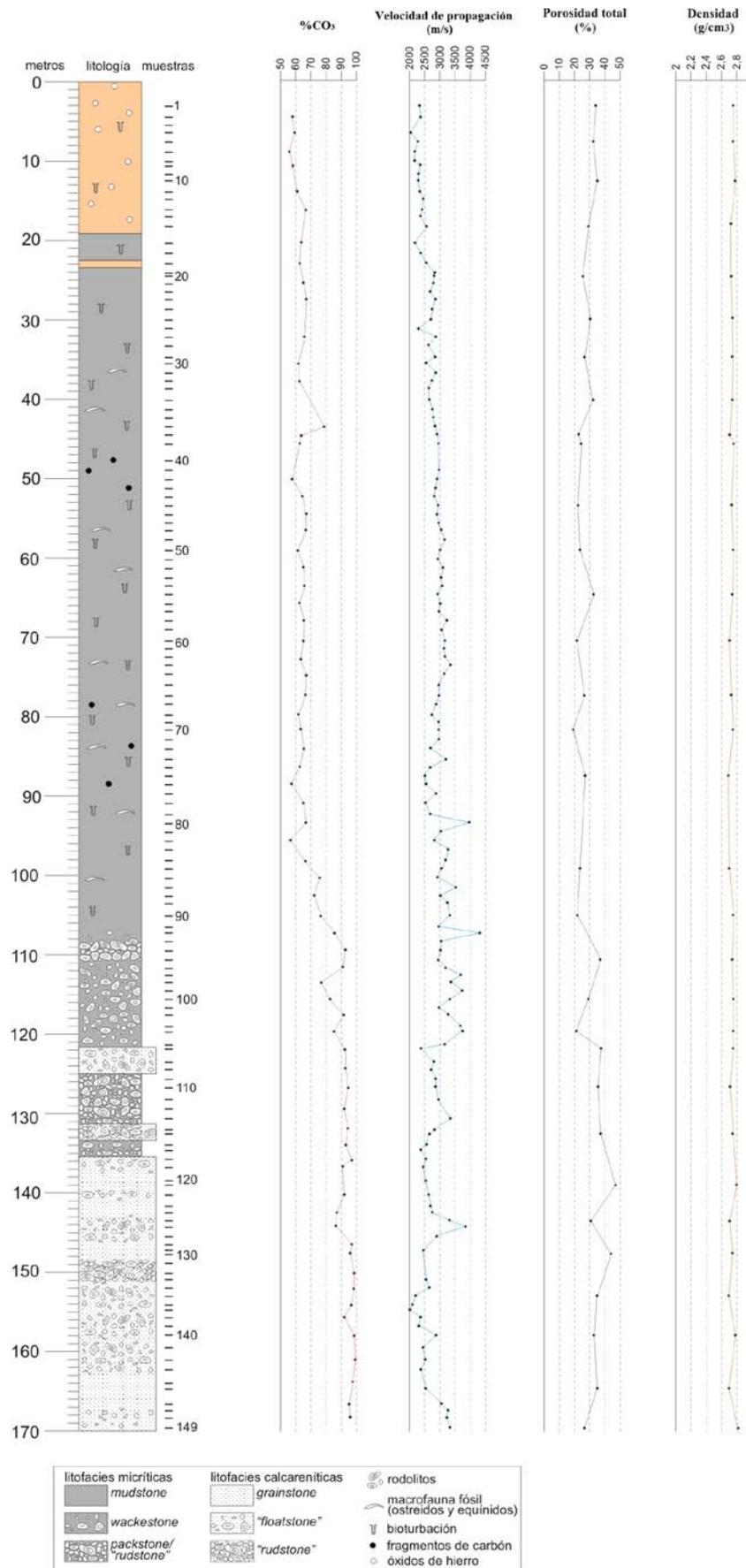


Figura 69. Comparativa de los resultados del sondeo Bacarot.

## **CAPÍTULO 6**

# **INTEGRACIÓN DE DATOS DE LA GEOLOGÍA DE SUPERFICIE CON LOS DATOS DEL SUBSUELO**

---

### **6.1. Pares almacén/sello seleccionados en la zona de estudio**

En este apartado se enumeran los tramos, formaciones o unidades interesantes que según sus características litológicas pueden considerarse con posibilidades para constituir almacenes de CO<sub>2</sub> en la zona estudiada.

Además de los tramos que a continuación se van a citar, hay que comentar que en el sector norte de la Cuenca del Bajo Segura la formación Calizas de la Virgen, de Montenat (1977), posee características petrofísicas y litológicas adecuadas para poder considerarse formación almacén. Dominada por areniscas calcáreas con bioconstrucciones arrecifales coralinas. Este conjunto posee una gran continuidad lateral en el borde septentrional de la zona de estudio, aflorando desde el embalse de Crevillente hasta el límite oriental del sector investigado.

Del estudio geológico, análisis de los sondeos petrolíferos y geofísica, los tramos o formaciones de interés son los siguientes:

#### **ALMACÉN-1:**

Litología: Areniscas.

Edad: Tortoniense superior.

En el caso de este almacén arenoso, perforado en el sondeo Benejúzar-1. Se encuentra por debajo de la discontinuidad fini-Tortoniense. En el sector norte de la cuenca se considera equivalente de la denominada como formación las Ventanas. No podemos asegurar que presente continuidad en el sector sur de la zona de estudio, en los demás sondeos estudiados se dispone constituyendo finas capas de areniscas alternando con margas.

#### **ALMACÉN-2:**

Litología: Alternancia de areniscas finas y conglomerados.

Edad: Tortoniense

Este almacén podría poseer variados cambios laterales de facies, así como geométricos, especialmente en cuanto a espesor. Se encuentra perforado en todos los sondeos onshore estudiados en la zona. Se denomina Formación Columbares.

### **ALMACÉN-3:**

Litología: Areniscas finas y conglomerados poligénicos con intercalaciones de arcilla.

Edad: Tortoniense inferior.

Este almacén corresponde a lo que se denomina como Complejo Basal, se dispone sobre el basamento triásico y es perforado en dos de los sondeos estudiados, en Benejúzar-1 y en el sondeo San Miguel de Salinas-2.

### **ALMACÉN-4:**

Litología: Calizas y dolomías.

Edad: Triásico

Corresponde al basamento de la Cuenca del Bajo Segura, compuesto por calizas y dolomías. Se alcanza en todos los sondeos profundos estudiados en tierra y se interpreta en todas las líneas sísmicas estudiadas.

### **Niveles sello:**

Igualmente se seleccionan mediante criterios geológicos y la información de los sondeos profundos los tramos, niveles o formaciones que pueden constituir el sello de los almacenes anteriormente descritos.

### **SELLO-1:**

Litología: Yesos y margas

Edad: Messiniense

El denominado como Sello-1, corresponde a las formaciones conocidas como Fm San Miguel y Margas de Torremendo.

Se encuentra con un espesor mínimo de 156 m en el sondeo San Miguel de Salinas-1 y máximo de 608 m en el sondeo Benejúzar-1. Además, en varios sondeos, por encima de esta formación que denominamos como sellante, se encuentran los materiales correspondientes al Plioceno, margas y areniscas.

## **6.2. Descripción de las características de cada formación, unidad o tramo seleccionado**

Se ha caracterizado cada unidad o tramo estudiado con el mayor detalle posible, especialmente en cuanto a litología, espesor, geometría, continuidad lateral y propiedades petrofísicas como porosidad, permeabilidad, salinidad y temperatura. Parámetros esenciales para definir sus posibilidades como almacén/sello. Sirviéndose para este fin de la información bibliográfica estudiada, trabajo de campo realizado en la zona de estudio, cortes geológicos, sondeos profundos, interpretación de las diagráfias, perfiles sísmicos y mapas de isobatas.

### **Formación la Virgen**

Esta formación posee una gran continuidad lateral en el borde septentrional de la zona de estudio, aflorando desde el embalse de Crevillente hasta el límite oriental del sector investigado. En general aparece como una banda estrecha y continua excepto entre los embalses de Crevillente y de Elche, en donde su espesor aparente es mucho mayor, debido, en esa zona, a una mayor influencia de aportes terrígenos provocados por la acción de un episodio deltaico submarino. La potencia media de este paquete es de 40 a 50 m.

Tiene su equivalente lateral en la formación de Yesos de San Miguel, por lo que no puede ser caracterizada en profundidad como almacén en el sector sur de la zona estudiada.

En principio es considerada como de interés para almacén de CO<sub>2</sub>, por su potencia, extensión y continuidad en afloramiento, y, por tener un origen en un medio de plataforma marina somera con crecimientos arrecifales.

De esta formación se realizaron ensayos de porosidad abierta y densidad aparente de varias muestras tomadas en afloramiento en un lugar cercano al sondeo perforado en Bacarot, obteniendo una porosidad abierta media de 25,7% y una densidad aparente media de 2.018 kg/m<sup>3</sup>. El valor de la velocidad de propagación del sonido obtenido para estas muestras es de 2,64 km/s.

Posee características petrofísicas adecuadas en afloramiento, al menos en cuanto a porosidad. Asimismo sobre ellos se depositan unos niveles regresivos, de carácter continental, constituidos por margas verdosas, grises o rosas con intercalaciones de areniscas poco cementadas y asociadas a episodios de calizas lacustres blancas nodulosas (Montenat, 1977), que pueden ejercer de sello inmediato de los niveles carbonatados-detriticos considerados almacén.

### **Almacén-1: Areniscas Tortonienses**

Este posible almacén se detecta en el sondeo Benejúzar- 1 con un espesor de 61 m, la porosidad media es del 8%, la porosidad a partir del registro neutrón es del orden del 7-24%, volumen de arcillas del 26%, 40°C de temperatura, una salinidad de 37,4 g/l y medidas de permeabilidad bajas, en el informe final se indica que se recogieron 8,77 g/l de lodo durante el test realizado a esta capa.

Con los datos de sísmica y sondeos de los que disponemos no podemos asegurar que este almacén se presente a profundidad y continuidad lateral deseable para considerarlo de interés.

Este almacén considerado dentro de la denominada como Formación Pujálvarez, equivalente lateral de la Formación las Ventanas, aflora prácticamente a todo lo largo del borde norte de la zona, desde el sur de la Sierra de Abanilla, hasta el límite oriental de la cuenca en la Sierra de Borbuño.

Así por ejemplo, al norte del embalse de Crevillente la Fm las Ventanas está constituida por casi 100 m de areniscas amarillentas sin aparente ordenación interna, en bancos de 20 a 40 cm, con organismos fósiles abundantes y cementación variable, según los bancos.

En la margen derecha del embalse del Vinalopó, se identifican casi 170 m de areniscas amarillas en bancos delgados (20-40 cm) con profusión de estructuras sedimentarias tipo, laminación cruzada, paralela, bioturbación y megaestratificación cruzada.

El sondeo mecánico realizado en la zona de estudio, sondeo Bacarot, completa la información de esta interesante unidad, en el capítulo 5 se detallan las características y resultados obtenidos.

Las medidas de porosidad de esta formación en afloramiento son de 27,3 % y 29,6%. Y en el sondeo se obtiene porosidades medias del 30%.

Es en definitiva uno de los conjuntos que por sus características se presenta como de los más interesantes a considerar como posibles niveles almacén si se encontrara a profundidad adecuada y con suficiente espesor.

Asimismo, en afloramiento aparecen siempre bajo un conjunto margo-arcilloso (Margas de Torremendo) de naturaleza impermeable.

### **Almacén-2: Formación Columbares**

El estudio de esta formación en los sondeos profundos se realiza con detalle, se divide en varios tramos, para su mejor caracterización, tanto en el sondeo Benejúzar-1 como en San Miguel de Salinas-2. En el sondeo Rojales no se distingue claramente un tramo arenisco o conglomerático, para definirlo como almacén la información del sondeo de la que disponemos es muy escasa. En el caso del sondeo La Mata -1 se obtienen valores de porosidad del 13%.

La salinidad en todos los sondeos en los que se distingue este almacén es elevada, el mínimo valor se encuentra en el sondeo La Mata con 17 g/l y valores de temperatura de 46 °C.

Para el tramo en el sondeo Benejúzar-1, en el test realizado al tramo de conglomerados entre 1185,87-1250 m se recogieron 656 litros de agua salada y lodo.

### **Almacén-3: Complejo Basal**

Se identifica en dos sondeos profundos, Benejúzar- 1 y San Miguel de Salinas-2.

La porosidad en varios tramos calculados, en el sondeo Benejúzar-1 es del 2%, con un volumen de arcillas del 56%, estos valores tan bajos de porosidad se deben a la importante cementación que presentan estas formaciones, ya que los contenidos en arcillas son elevados. Los tramos definidos por tanto varían en función de la cementación que presentan. La salinidad calculada es del orden de 48 g/l.

En el sondeo San Miguel de Salinas-2, la porosidad calculada a partir del registro de densidad, es muy baja, del 1%, con un volumen de arcillas del 34%.

Igualmente que nos ocurre con el Almacén-1, no tenemos información suficiente para asegurar la continuidad lateral de este almacén a lo largo de la zona de estudio. Parece que sólo se presenta en el lado de los surcos más próximos al borde continental. En los sondeos estudiados se encuentra con espesores de 238 m en el sondeo Benejúzar-1 y 70 m en el sondeo San Miguel de Salinas-2.

### **Almacén-4: Calizas del Triásico**

Es la litología predominante en la Sierra de Orihuela como en su continuación hacia el NE, la Sierra de Callosa de Segura.

Se puede considerar interesante como roca almacén para CO<sub>2</sub>, sin embargo, sus características petrofísicas estudiadas en los sondeos profundos, al igual que en muestras tomadas en

afloramiento no son aceptables ya que carecen de porosidad y su permeabilidad, debida esencialmente a sus discontinuidades (estratificación y deformación frágil), es baja.

En varias muestras recogidas durante el trabajo de campo se les realizó en laboratorio el cálculo de porosidad abierta obteniendo un valor medio de 3,2%.

En los sondeos profundos se encuentra con un espesor de entre 40 m y 636 m. En el sondeo La Mata-1 se encuentran valores de porosidad del 9%. El valor mínimo de porosidad con el registro de densidad obtenido se da en el sondeo Benejúzar-1, con un 1%. El máximo está en el tramo del sondeo La Mata con un 13%. El valor de la porosidad con el registro de neutrón, para el mismo tramo antes mencionado del sondeo Benejúzar-1 se registran valores del 5-12 %.

Si bien contienen aguas de formación que son verdaderas salmueras (70 g/l) en el caso el sondeo San Miguel de Salinas-2, este valor indica la posibilidad de la estanqueidad de la formación. El mínimo valor de salinidad se encuentra en el sondeo La Mata con 30 g/l.

### **6.3. Geometría del basamento de la cuenca. Estructuras principales**

A partir de la información de los sondeos profundos y la interpretación de las líneas sísmicas podemos caracterizar la geometría que presenta el techo del basamento, esto es imprescindible ya que partiendo de estos valores podemos delimitar la zona posible para ubicar el emplazamiento futuro para inyección de CO<sub>2</sub>. Si el substrato se encuentra a profundidades menores de 800 m es evidente que serán zonas prácticamente descartadas en cuanto a sus posibilidades en materiales terciarios, no así si las rocas del substrato tuviesen características adecuadas para ser atrapadoras de CO<sub>2</sub> como pueden ser los carbonatos triásicos alpujárrides que constituyen los niveles sobre los que se formaron los estratos neógenos. Asimismo las estructuras que afectan al conjunto son de gran interés ya que pueden constituir las barreras laterales que confinen los sectores seleccionados.

Al norte desde la banda de deformación de Crevillente hacia el sur se encuentra el basamento carbonatado de las zonas internas del Complejo Alpujárride. La disposición del basamento en toda la cuenca es muy irregular, se puede comprobar mediante la interpretación de las líneas sísmicas, cortes geológicos y la información de los sondeos.

Hacia la parte norte de la cuenca en contacto con la banda de deformación de Crevillente el basamento asciende bruscamente, en la línea sísmica S-84-72-N se puede distinguir el basamento a unos 1.000 m de profundidad, en la parte central de la línea y como este asciende hacia el norte

y nuevamente hacia el sur-este donde se produce una elevación del relieve llegando incluso a aflorar en la isla de Tabarca, que es donde se encuentra el afloramiento más oriental, constituido por materiales carbonatados alpujárrides y ofitas.

Según el mapa de isobatas realizado al techo del triásico, el basamento de la cuenca, se puede descartar totalmente la zona norte de la cuenca con posibilidades de albergar un almacén de CO<sub>2</sub> en los materiales triásicos, ya que se encuentran a profundidades menores de 800 m, a partir de la banda de deformación de Crevillente hacia el norte. Otra zona descartada se sitúa al este del sondeo La Marina-1, tanto en tierra como en mar el mapa nos indica valores de profundidad menores de 500 m, estos valores son interpolados, no se dispone en esa zona de información sísmica para asegurar la profundidad, pero la línea sísmica S-84-72-N indica una elevación del basamento en esa zona.

En el resto de la zona estudiada, podría considerarse con posibilidades de albergar un almacén en los materiales triásicos, según la profundidad a la que se encuentran, ya que como mínimo se obtienen valores en el mapa de isobatas realizado (Fig. 53) de 700 m de profundidad al sureste del sondeo San Miguel de Salinas-1, en el resto del mapa la profundidad del basamento es mayor.

En la zona de la Sierra de Orihuela y Callosa se desarrolla un umbral de dirección ENE-WSW, el basamento presenta una morfología irregular, se pone en evidencia por los pequeños afloramientos dispersos de materiales alpujárrides.

El basamento hacia el mar se dispone igualmente formando surcos y umbrales pero la diferencia de profundidad alcanzada entre los surcos es mayor que en tierra, llegando a estar el basamento en el caso de la línea 52-74\_B-16, a 350 m (en la parte más cercana a la costa) y descender bruscamente hasta los 1.500 m, para luego volver a ascender hasta encontrarse aproximadamente a 1.000 m de profundidad.

En tierra uno de los sectores más subsidentes se encuentra al sur de San Miguel, llegando a encontrarse el basamento, en la línea S-82-51, a más de 2.000 m de profundidad.

En mar la profundidad máxima se encuentra al sur del sondeo Torrevieja Marino C-1, con profundidades calculadas en la línea 52\_74\_B-12 de hasta 2.700 m.

La zona más interesante teniendo en cuenta la profundidad a la que se encuentran las calizas y dolomías triásicas, podría señalarse entre las estructuras de Benejúzar–Rojales y al sur del sondeo San Miguel de Salinas-1. Además de la zona offshore.

Los esquemas de los cortes geológicos, las líneas sísmicas interpretadas y la información de los sondeos nos han permitido definir la situación y disposición espacial de los materiales que presentan posibilidades para ubicar un almacén (Figura 70).

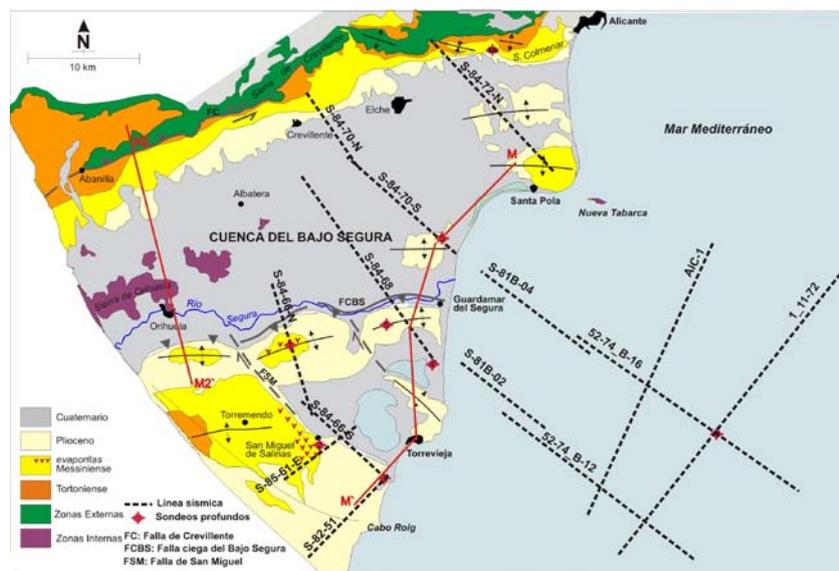


Figura 70. Mapa geológico sintético y posición de los cortes y líneas sísmicas interpretadas.

Desde la banda de deformación de Crevillente hasta el sondeo San Miguel de Salinas-1, se observa como se dispone el basamento en surcos y umbrales, afectado por fallas, este asciende en la zona de Albatera, vuelve a tener mayor profundidad en las cercanías del sondeo Benejúzar-1, y asciende nuevamente en las proximidades del sondeo San Miguel de Salinas-1.

Hacia el norte se eleva el substrato llegando a chocar con la banda de deformación de Crevillente, se encuentra con mayor profundidad en la zona cercana a la banda de deformación de la falla del Bajo Segura, se eleva en el alto del sondeo Rojas-1, y hacia el sur vuelve a descender para nuevamente elevarse hasta los 759 m, donde es perforado por el sondeo La Mata-1.

Según nos acercamos a la zona de costa los materiales tortonienses van perdiendo potencia y continuidad, en el sondeo La Marina-1, la formación de interés denominada Fm Columbares se encuentra con una potencia de 45 m, no se puede demostrar su continuidad en mar, ya que en el sondeo perforado en mar, Torre vieja Marino C1, no se perfora esta formación.

El esquema geológico representativo del basamento de la cuenca es el corte M-M' (Fig. 71), que atraviesa de norte a sur el borde este, desde Santa Pola hasta el sondeo San Miguel de Salinas-1. Nos permite visualizar como evoluciona estructuralmente el basamento y los demás materiales. Se puede apreciar en la posición más septentrional el basamento se dispone más elevado para

nuevamente presentar varios surcos y umbrales, en cada sondeo se dispone un alto estructural afectado por fallas, el más elevado se sitúa en el sondeo La Mata-1 con una profundidad de 759 m. Hacia el sur, pasado el alto del sondeo San Miguel de Salinas-1, desciende bruscamente en profundidad.

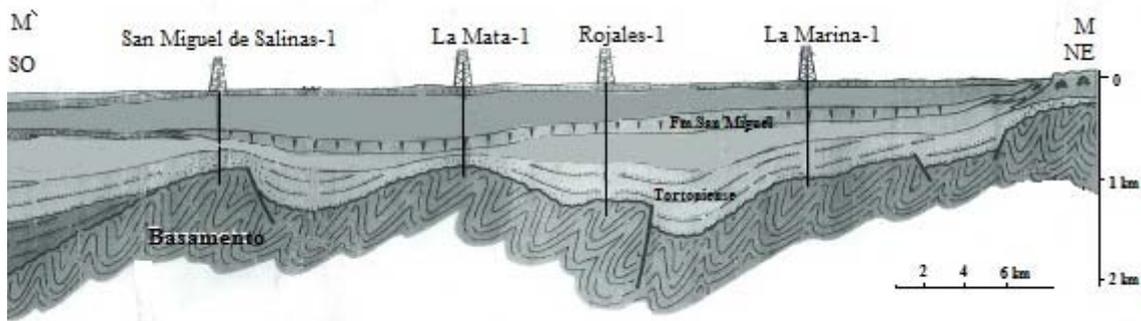


Figura 71. Corte geológico M'-M (modificado de Montenat, 1990).

El corte denominado M2-M2', realizado desde la Sierra de Abanilla hasta el sur de Anerva, nos ilustra como el basamento presenta irregularidades en su profundidad, llegando a aflorar en el Sierra de Orihuela y descender bruscamente en las cercanías de la banda de deformación de Crevillente y del Bajo Segura (Fig. 72).

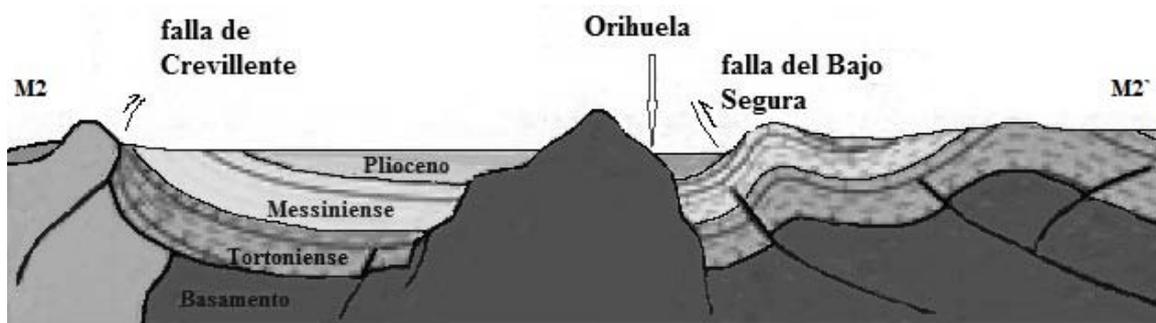


Figura 72. Corte geológico M2-M2', de la Cuenca del Bajo Segura (modificado de Corbí, 2010).

Se puede concluir que los sondeos San Miguel de Salinas-1 y La Mata-1 se ubican en la vertiente septentrional de un umbral del substrato más o menos paralelo a la costa, de manera que se dispone en dirección SO-NE. Este umbral llega a emerger en la Isla Plana o Nueva Tabarca.

Entre este umbral y el que constituye en tierra, el de Orihuela-Callosa, también en dirección SO-NE, el substrato presenta una subcuenca o depresión que en principio va a constituir la zona más interesante como posible almacén en tierra, o al menos en donde continuar con futuras investigaciones. Esta depresión o surco la denominamos Benejúzar-Rojales-La Marina (Fig. 73). En este surco la profundidad del basamento va desde los 900 m hasta los 1.300 m, por lo que sobre él se dispone el conjunto neógeno a una profundidad adecuada, a partir de los 800 m, para constituir y contener tramos o formaciones almacén con la suficiente potencia y extensión.

En la figura 73 se traza el área que comprende la subcuenca de Benejúzar-Rojales-La Marina, así como se delimita la zona de interés en el offshore. Igualmente la representamos en el mapa geológico adjunto en el Anexo I.

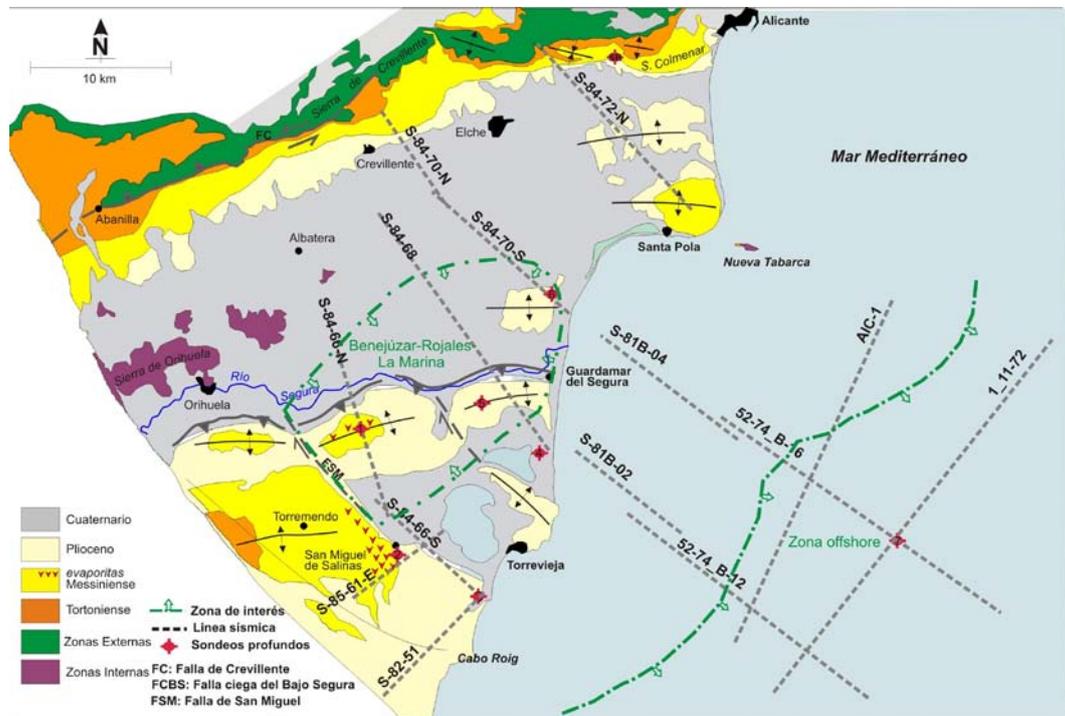


Figura 73. Mapa sintético de la zona de estudio y delimitación de la zona de interés.

La zona de interés en offshore comienza a partir de una línea, a unos 10 km de distancia de la costa en el sector SE y de 25 km al NE. A partir de esta línea, el basamento, a unos 1.100 m de profundidad, desciende hacia el interior del mar hasta alcanzar los 2.700 m.

Por otra parte el mapa de isobatas de la discontinuidad fini-Tortoniano (Fig. 54) bajo la cual se desarrollan los niveles favorables como almacén pertenecientes a la Formación Columbares nos indica en la subcuenca Benejúzar-Rojales-La Marina, la continuidad de este conjunto neógeno, a

partir de una profundidad media de 600 a 650 m, por lo que dispondremos de una potencia de materiales terciarios, entre los que se desarrollan los niveles de interés, de entre 300 a 700 m.

En la figura 74 se esquematiza la morfología del techo del basamento alpujarride triásico representando los surcos y umbrales en su directriz general SO-NE, simplificándolos en cuanto a su complejidad adquirida por su intersección con otras depresiones y cubetas con direcciones preferentes NO-SE.

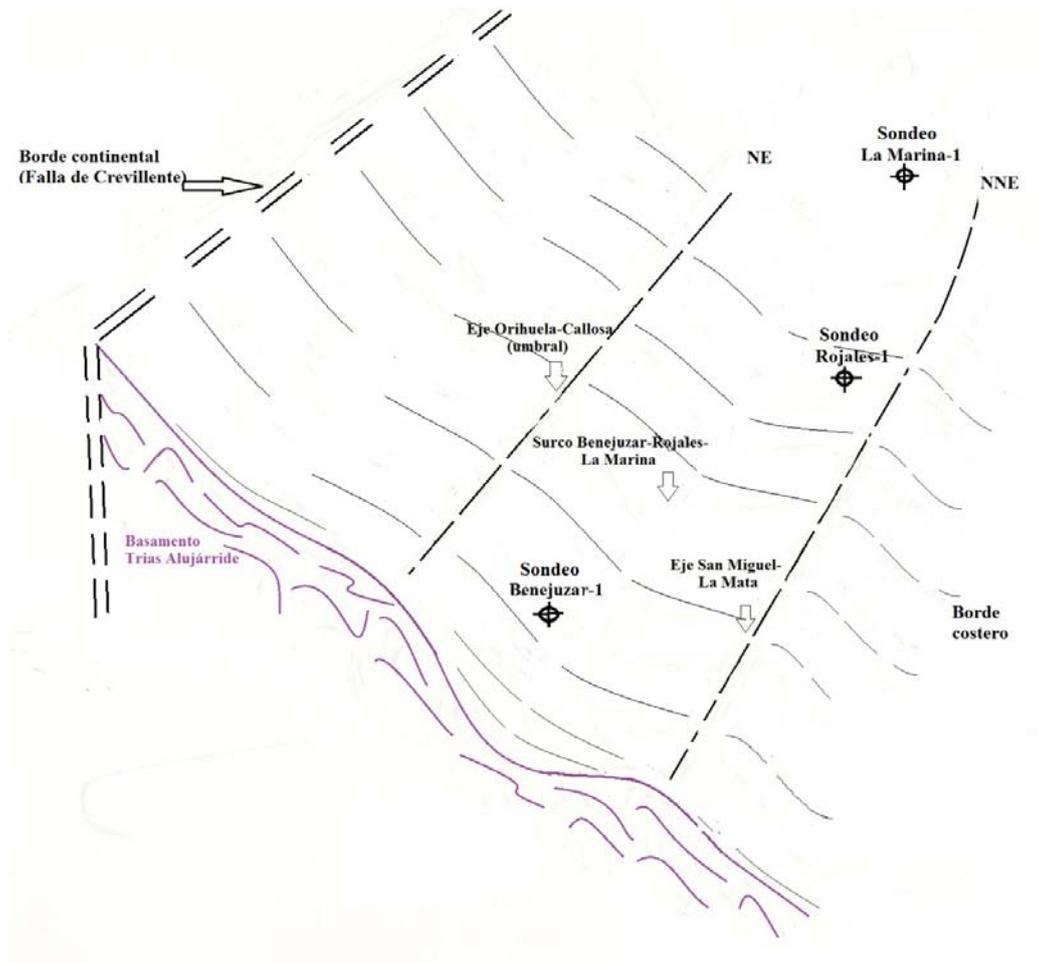


Figura 74. Esquema de la morfología del basamento Alpujarride.

El surco o subcuenca de Benejuzar-Rojales-La Marina constituido como zona de interés, posee un relleno neógeno que está delimitado o confinado al S-SE por la falla de San Miguel y al NNE por las de Torrevieja y Guardamar, de directrices generales NO-SE.

#### **6.4. Disposición de los tramos, formaciones y unidades de interés**

La descripción de los materiales neógenos, se realiza igualmente mediante el análisis de los esquemas geológicos realizados y la interpretación de las líneas sísmicas y sondeos profundos.

El denominado como Complejo Basal, perforado en el sondeo Benejúzar-1, parece que no presenta continuidad, ya que no es perforado en el sondeo San Miguel de Salinas-1, si en el caso del sondeo San Miguel de Salinas-2, por lo que la zona Benejúzar- San Miguel de Salinas-2, se puede considerar de interés para albergar un almacén en los conglomerados y areniscas tortonienses del Complejo Basal, como complementario subyacente a otros niveles almacén, ya que el por sí mismo no presenta la continuidad y extensión suficiente.

Por encima del complejo anteriormente citado, se sitúan las areniscas y margas tortonienses correspondientes a la Fm Columbares y Fm Pujálvarez. En la zona norte tienen su correspondencia con la Fm las Ventanas, en donde llegan a aflorar. Hacia el sur esta formación evoluciona en la vertical encontrándose con espesores mayores a los 300 m en el sector del sondeo Benejúzar-1, y nuevamente vuelven a perder espesor hacia el sondeo San Miguel de Salinas-1.

Sobre los materiales ya descritos, en la zona norte se sitúan los conglomerados, arcillas y limos del Mioceno superior y el Cuaternario. Hacia el sur de la zona se sitúa una potente sucesión de margas, arenas y arcillas, que constituirían el sello de los posibles almacenes.

La Formación las Ventanas la cual aflora al norte de la zona, sufre cambios laterales de facies hasta llegar a ser perforada en el sondeo Rojas-1, constituida principalmente por margas y finas capas de areniscas, con un espesor mayor de 300 m. Igualmente esta vuelve a ascender y perder potencia según nos acercamos a la costa y a la zona sur de la cuenca, como se demuestra en el sondeo La Mata-1, donde a los 657 m es perforada la denominada Fm Columbares.

En el centro de la cuenca el espesor de los materiales tortonienses se eleva considerablemente comparándolos con los bordes, tanto en el norte, como en el sur.

Por encima de los materiales anteriormente descritos, en el norte, se disponen los conglomerados, calcarenitas y arcillas del Plioceno. Hacia el sur las calcarenitas de la denominada Formación La Virgen evolucionan a los yesos de la formación San Miguel, siendo esta formación en el sector norte en principio interesante como posible almacén por su litología y propiedades petrofísicas pero no se encuentra a la profundidad adecuada para garantizar su estanqueidad. Hacia el sector sur evoluciona a los yesos messinienses, siendo estos favorables para actuar como sello de las areniscas y conglomerados tortonienses.

En el corte M-M' (Fig. 71) se ilustra como la Formación de Yesos de San Miguel presenta continuidad en el borde este de la cuenca, cercano a la costa, esta es perforada en todos los sondeos con una potencia mínima de 100 m en el sondeo La Mata-1.

En la figura 75 se esquematiza la posición de las diferentes litologías favorables, su evolución y continuidad lateral así como la profundidad a la que se pueden encontrar, dentro del surco denominado Benejúzar-Rojales-La Marina. En ella se puede observar como el basamento triásico Alpujárride (Almacén-4) se dispone, soportando la serie neógena, a profundidades de entre 740 m, en el alto San Miguel de Salinas-1–La Mata-1, hasta más de 1.500 m, es decir, a profundidades favorables, para constituirse en rocas almacén en el caso de que estos niveles carbonatados poseyeran las demás características positivas que un almacén requiere. Por otro lado sus materiales sellantes son de difícil definición ya que sobre estas calizas y/o dolomías reposan indistintamente conglomerados, calcarenitas y margas neógenas. Sin embargo si pueden ser consideradas como un complementario subyacente a otro, sobre ellas, de gran interés para albergar el CO<sub>2</sub> descendente, ya disuelto en la salmuera de niveles almacén superiores.

Directamente sobre el basamento, en su sector sur, se dispone el denominado Almacén-3, constituido por conglomerados, areniscas y niveles arcillosos del Complejo Basal terciario. Estos materiales, esencialmente detríticos, sólo han sido reconocidos en los sondeos petrolíferos de Benejúzar-1 y San Miguel de Salinas-2. Por su origen presentarán mayor desarrollo hacia los bordes de la cuenca o subcuencas, sobre todo en proximidad a bandas de fracturación, disminuyendo su espesor e incluso no depositándose hacia el centro, tal como se pone de manifiesto en la figura 75.

Aunque se encuentran a profundidades adecuadas, y sus características petrofísicas e hidrogeológicas pueden ser muy favorables, no poseen la suficiente entidad en cuanto a extensión lateral para considerarse por sí solo a estos niveles como almacén, sin embargo y al igual que las rocas carbonatadas del Trías pueden ser complementarios, donde se encuentren, a otros niveles superiores de interés como almacén, incrementando, en estos sectores la potencia del conjunto favorable, ya que en el mejor de los casos pueden presentar un espesor superior a los 200 m.

Sobre el Complejo Basal o directamente sobre el basamento triásico carbonatado se depositan los materiales que constituyen el considerado Almacén-2, constituido esencialmente por calcarenitas y conglomerados con niveles margosos que conforman la Formación Columbares. Esta formación se desarrolla en el surco Benejúzar-Rojales-La Marina presentándose gran parte de su

espesor a una profundidad adecuada, desde los 800 a 2.500 m, para considerarla de interés para almacén de CO<sub>2</sub>.

Como es característico de este tipo de depósitos, la formación presenta cambios laterales de facies haciéndose menos detrítica y heterométrica hacia el centro de la subcuenca, en donde predominan los niveles margosos. Posee asimismo, un espesor variable, disminuyendo hacia los bordes de la subcuenca y aumentando en el depocentro, en donde llega a alcanzar 300 m de espesor, según se manifiesta en el sondeo Benejúzar-1. En los bordes la potencia de esta unidad se reduce hasta los 70 m, en cualquier caso son dimensiones que entran dentro de la favorabilidad para considerarla como de interés, sobre todo si a ella se suma, en determinados sectores, el Almacén-3 (Complejo Basal) y, en toda su extensión, las rocas carbonatadas del basamento triásico.

La favorabilidad de esta formación es aún mayor al presentarse siempre inmediatamente sellada por niveles impermeables generalmente pertenecientes a la Formación Torremendo. Este sello, denominado, Sello-1, está constituido por margas y evaporitas con un espesor total comprendido entre los 156 y 600 m.

El tramo denominado como Almacén-1, perforado en el sondeo Benejúzar-1, aproximadamente entre los 608 y 655 m de profundidad, considerado equivalente lateral de la Formación las Ventanas. Por sus características geométricas, su falta de continuidad lateral según los sondeos profundos perforados en el sector sur, nos hace desecharlo en esta zona como de interés para almacenar CO<sub>2</sub>, a pesar de los buenos parámetros hidrogeológicos y petrofísicos que posee.

En definitiva, en la zona continental del área investigada se define una subcuenca o surco de interés de superficie elíptica truncada al SE por la falla de San Miguel de orientación NO-SE. El fondo de este surco presenta una morfología cóncava y está relleno por sedimentos carbonatado-detríticos, con formaciones de interés, a profundidades adecuadas y con características hidrogeológicas y petrofísicas dentro de los parámetros que se exigen. La Formación Columbares, denominada como Almacén-2, es la que por sí sola puede albergar CO<sub>2</sub>, las otras formaciones o unidades que constituyen el Almacén-1, 3 o 4, pueden en algunos sectores sumarse al Almacén-2 aumentando su espesor.

Este surco, con su eje mayor, definido por la alineación de los sondeos petrolíferos Benejúzar-1-La Marina-1, presenta un eje máximo de unos 18,6 km y 14 km de eje menor. Su geometría y disposición de los materiales impermeables a partir de la discordancia fini-Tortonense (Margas

de Torremendo) es favorable, asimismo, para el cierre y sellado de los niveles del Almacén-2, tanto hacia el techo como lateralmente. En el sector sureste dicho cierre se encuentra reforzado por la falla de San Miguel. El surco, por tanto, se conforma como una estructura sinforme que reúne los requisitos de estanqueidad en caso de inyección de CO<sub>2</sub> en los niveles calcareníticos de la Formación Columbares.

En el offshore, los perfiles sísmicos analizados nos indican un basamento triásico elevado y por tanto soportando una serie neógena de insuficiente espesor y a escasa profundidad, por lo que se descarta como de interés una zona distante de la línea de costas entre 10 km por el SO y más de 20 km por el NE. A partir de esta línea hacia el interior marino se ubicaran los sectores favorables de difícil investigación debido a la ausencia de sondeos petrolíferos y falta de datos en el sondeo existente como ocurre en Torre Vieja marino C-1.

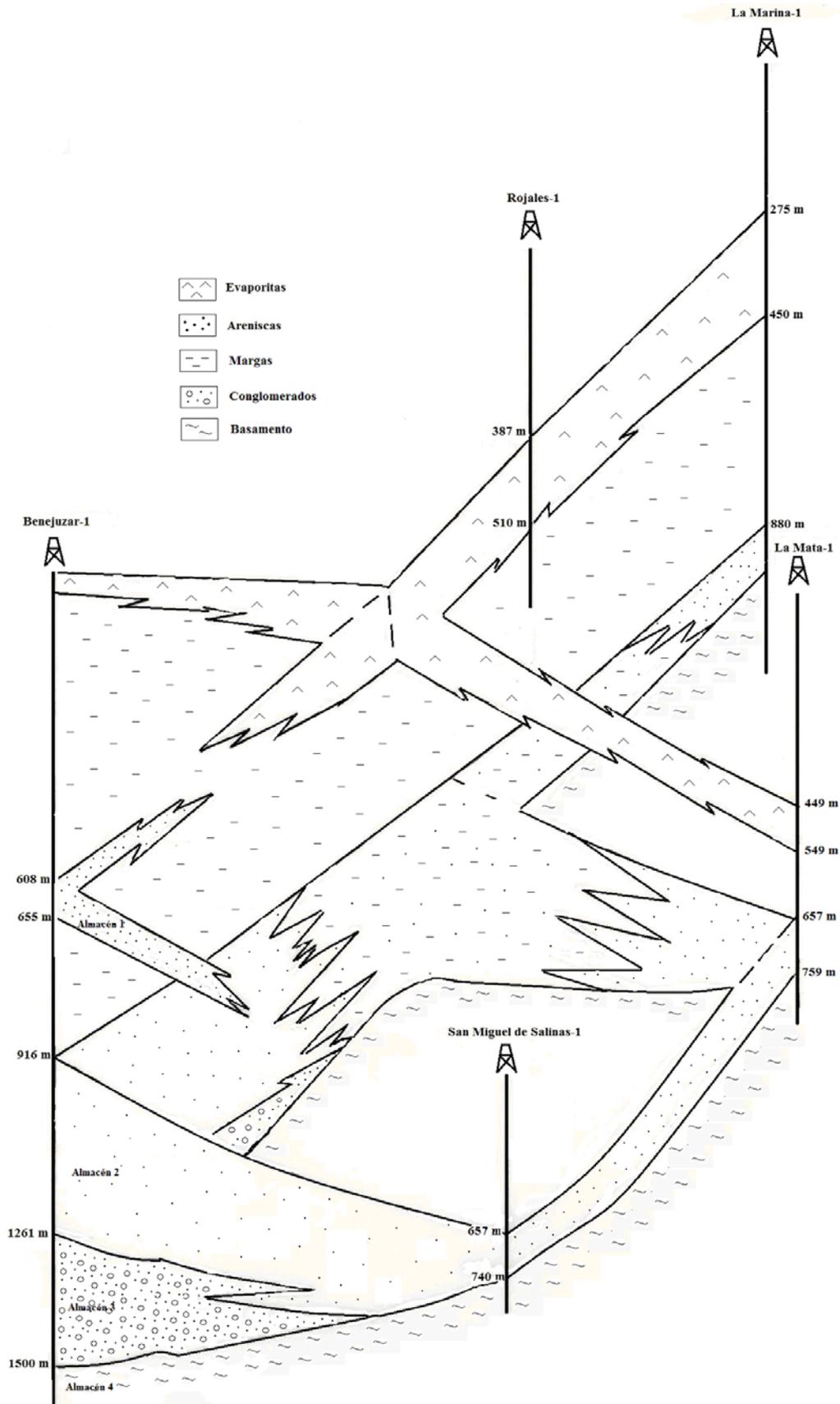


Figura 75. Esquema de distribución de los niveles de interés en la subcuenca Benejuzar-Rojales-La Marina.

## **CAPÍTULO 7**

### **MODELO GEOLÓGICO ESTÁTICO Y ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO**

---

## 7.1. Modelo geológico estático

Como criterio técnico para caracterizar y evaluar el complejo del almacenamiento, según la Directiva sobre Almacenamiento Geológico de dióxido de carbono que en España el Consejo de Ministros aprobó como Proyecto de Ley de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, una de las etapas de la investigación requiere la creación del modelo geológico estático tridimensional.

Mediante la utilización del programa de interpolación Surfer 8, integramos la información de las líneas sísmicas, sondeos profundos y de los mapas de isobatas generados para la realización de un modelo estático en tres dimensiones de la zona de estudio.

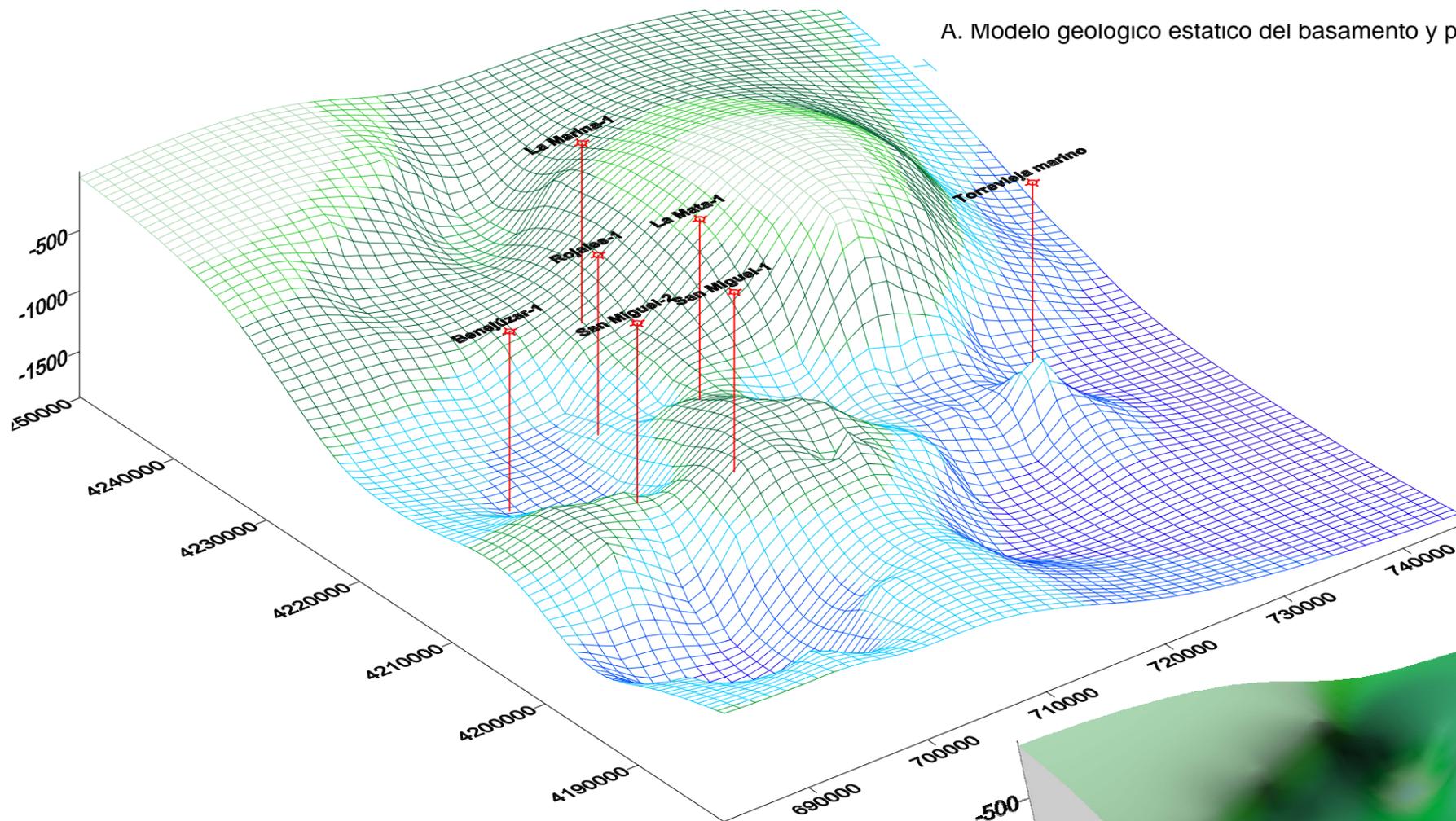
El programa Surfer 8 es un programa desarrollado por la compañía Golden Software y permite la visualización y generación de mapas y contornos en superficies en dos y tres dimensiones. Este programa nos permite generar modelos en 3D de la superficie del techo del basamento de la Cuenca del Bajo Segura y de la discontinuidad fini-Tortonense (techo de la Formación Pujálvarez). Estos modelos se realizan con los datos producidos de la transformación a profundidad de los horizontes de interés en las líneas sísmicas y sondeos profundos. Con esta información se elaboró una interpolación mediante el método Krigging. El resultado es la visualización de los modelos geológicos estáticos en tres dimensiones.

Estos modelos nos permiten visualizar la geometría y disposición espacial del substrato de la cuenca y a partir de ellos poder ubicar con mayor precisión el posible almacén de CO<sub>2</sub>. Hay que seleccionar una zona en la que el basamento se encuentre a una profundidad suficiente para poder presentar sobre él suficiente espesor de materiales y encontrarse a una profundidad mayor de 800 m.

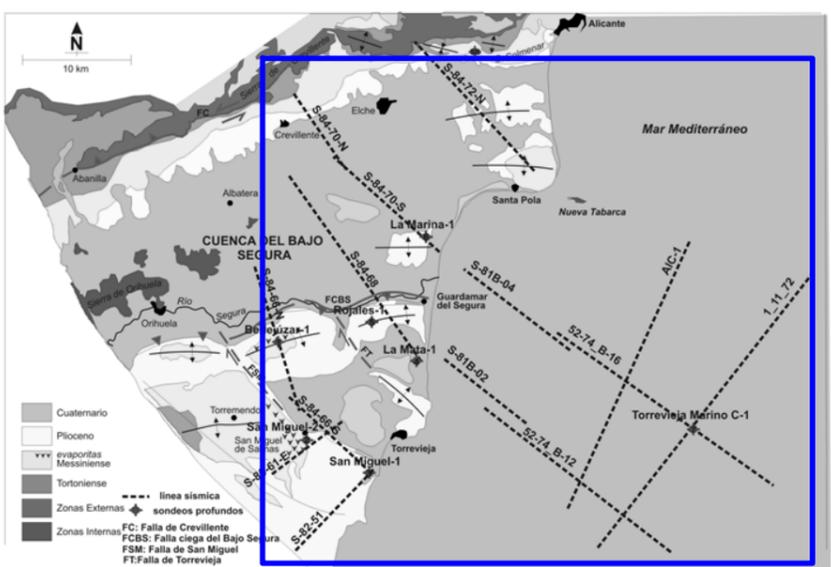
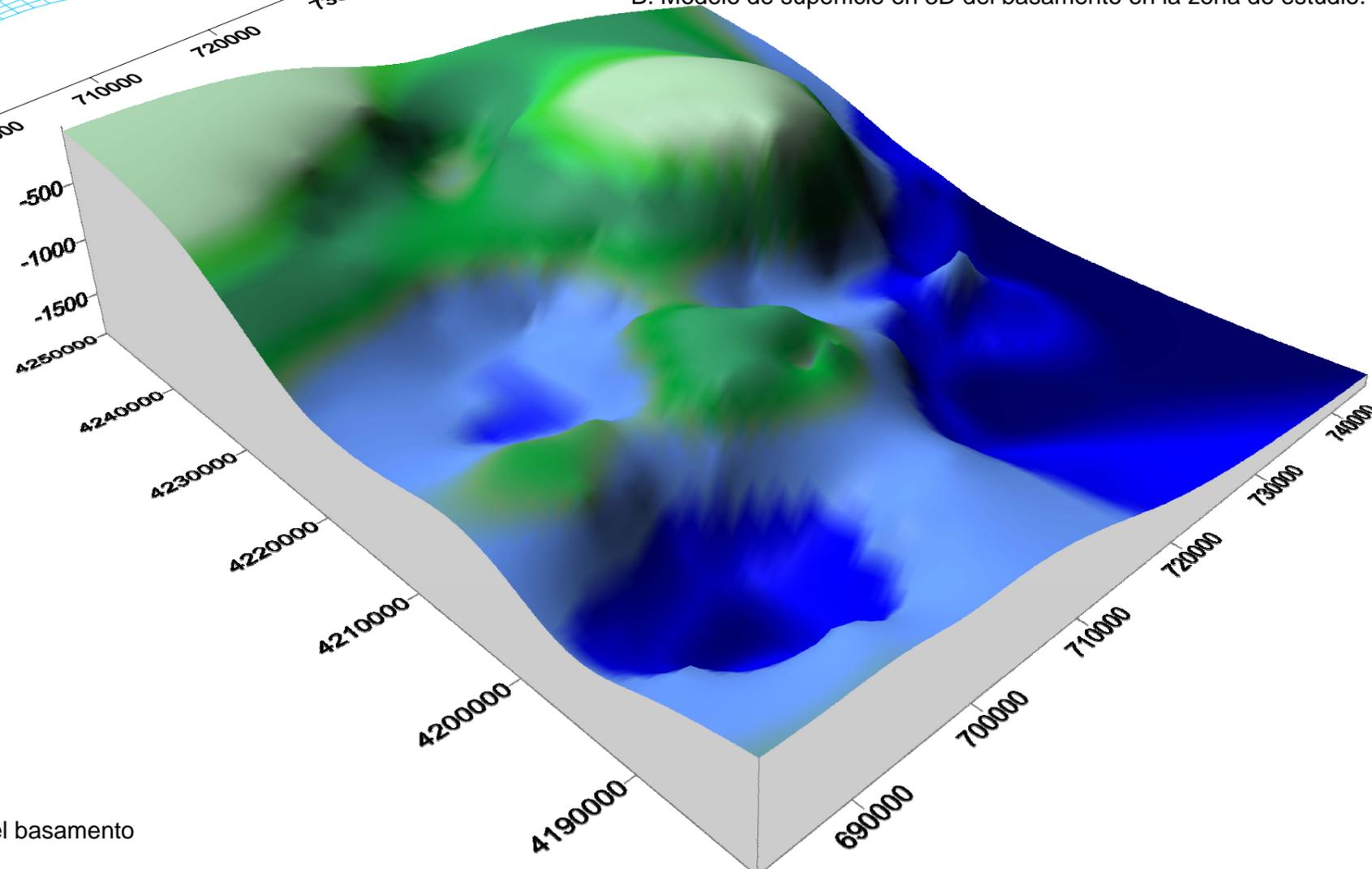
En la figura 76 se ilustra el modelo de superficie en 3D del techo del basamento de la Cuenca del Bajo Segura, con la posición de los 7 sondeos profundos estudiados y el mapa de posición del modelo geológico estático generado, la cual abarca la zona onshore y offshore, ya que en las líneas sísmicas estudiadas tanto en tierra como en mar se localiza el basamento de la cuenca.

Según el modelo obtenido el lugar que presenta mayor profundidad del basamento se encuentra en la zona offshore y en el surco entre los sondeos Benejúzar-Rojales-La Marina.

A. Modelo geológico estatico del basamento y posicion de los sondeos profundos

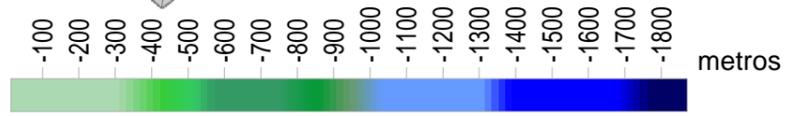


B. Modelo de superficie en 3D del basamento en la zona de estudio.



C. Mapa de la zona y posición del modelo geológico estático del basamento

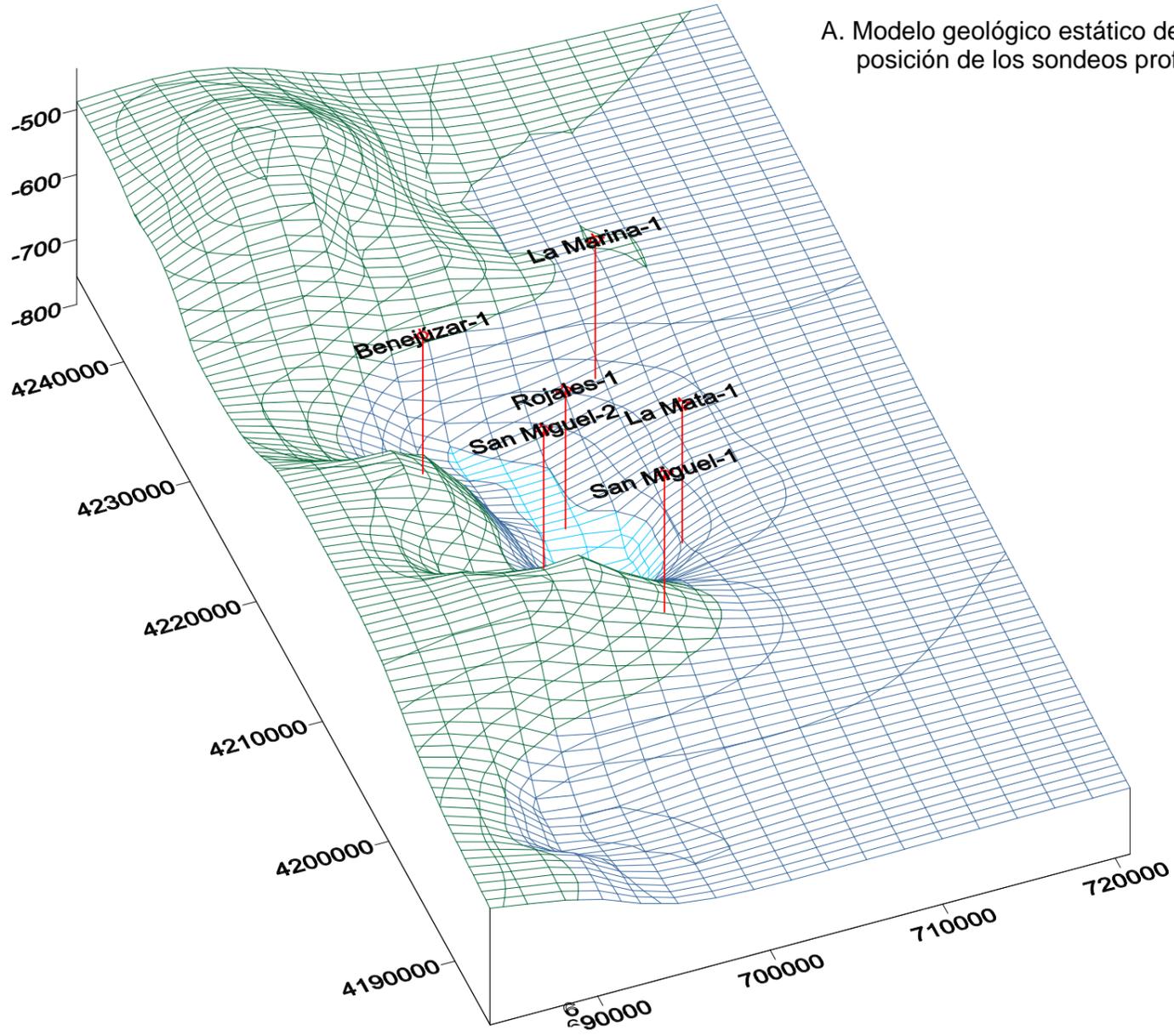
Figura 76. Modelo geológico estático del basamento en la Cuenca del Bajo Segura.



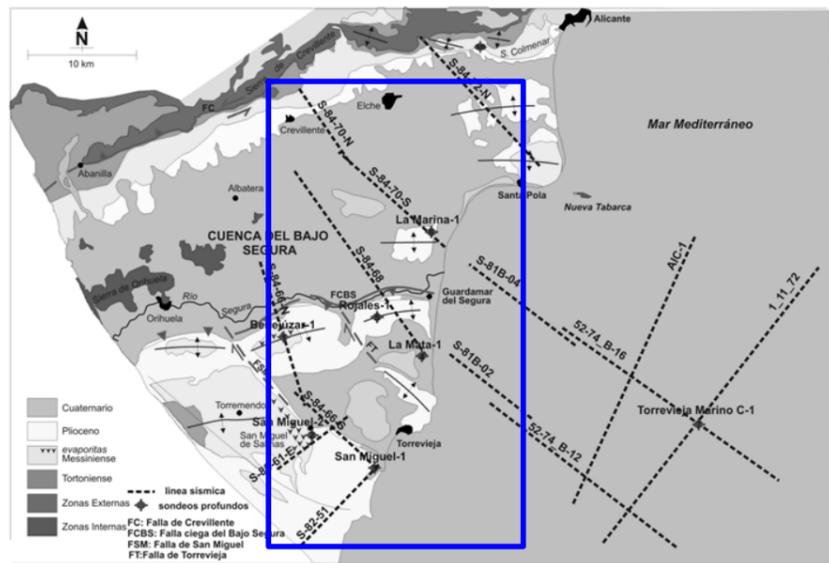
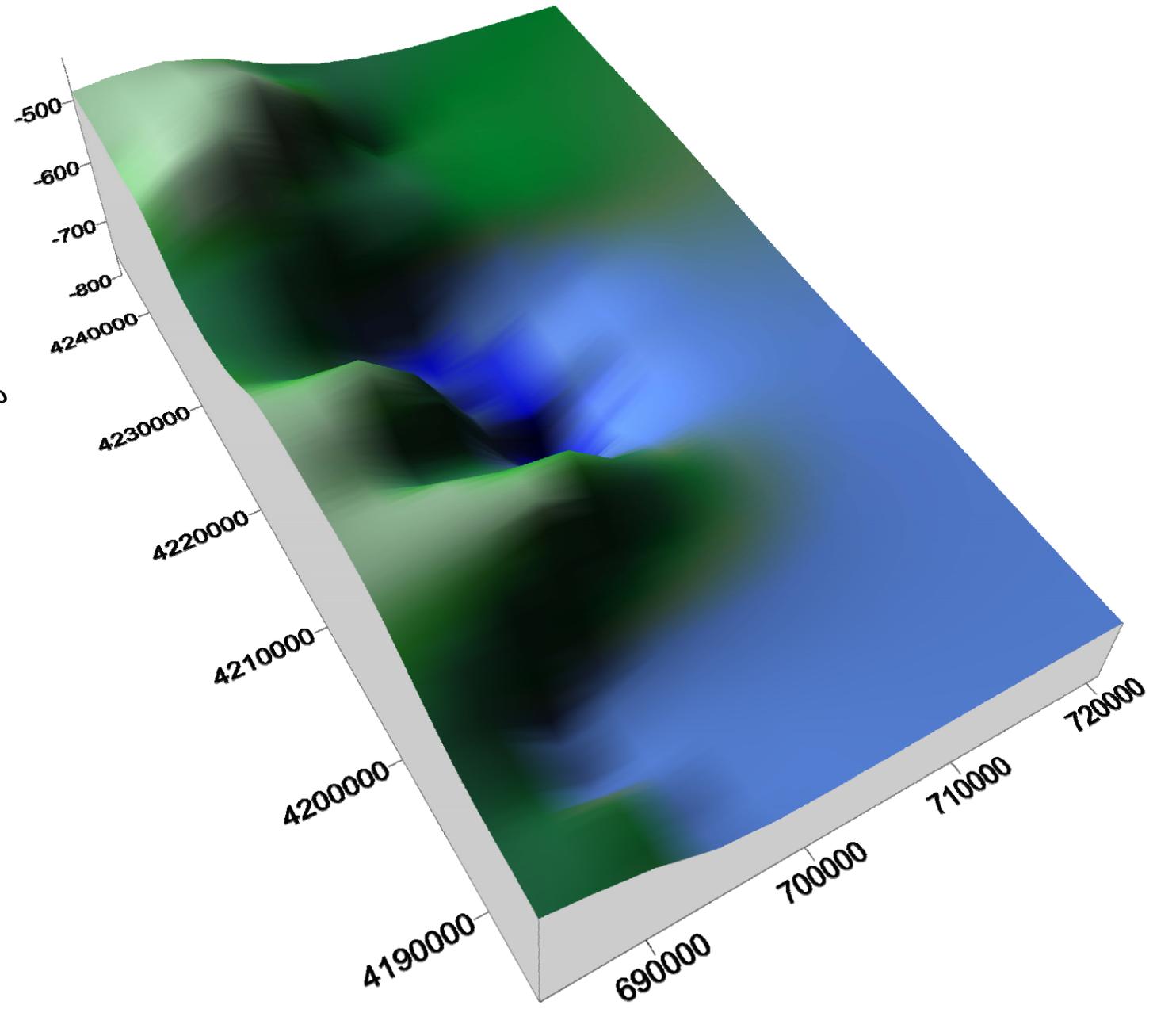
Para el modelo generado del techo de la Fm Pujálvarez, la figura 77 ilustra la superficie de la discontinuidad fini-Tortonense en la Cuenca del Bajo Segura, se indica la posición de los sondeos profundos y el mapa con la posición del modelo geológico estático. En este caso se genera el modelo geológico principalmente en la zona onshore ya que no se ha definido dicha discontinuidad en la zona offshore.

La mayor profundidad se encuentra en el surco entre los sondeos Benejúzar-Rojales-La Marina.

A. Modelo geológico estático de la discordancia fini-tortonienne y posición de los sondeos profundos



B. Modelo de superficie en 3D de la discordancia fini-Tortonienne en la zona de estudio.



C. Mapa de la zona y posición del modelo geológico estático de la discordancia fini-Tortonienne

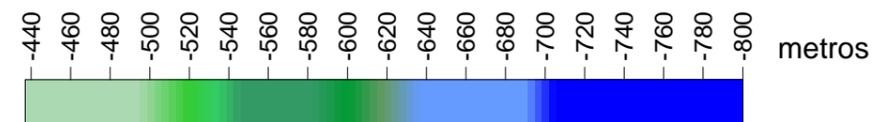


Figura 77. Modelo geológico estático de la discontinuidad fini-Tortonienne en la Cuenca del Bajo Segura

## 7.2. Estimación de la capacidad de almacenamiento

Los primeros trabajos encaminados al establecimiento de una metodología para la estimación de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> fueron llevados a cabo por el CSLF (Carbón Sequestration Leadership Forum).

La capacidad de almacenamiento geológico constituye un recurso geológico (‘‘commodity’’). Por ello se expresa según el esquema de recursos-reservas mineros, siendo conceptualizada, por tanto, como un recurso piramidal (CSLF, 2005).

El concepto de recurso piramidal fue introducido por McCabe (1998) como un método para describir la acumulación de hidrocarburos en diferentes categorías. Este concepto se ha propuesto para representar de forma similar la capacidad de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, tal y como se ilustra en la figura 78.

La investigación de emplazamientos geológicos de CO<sub>2</sub> debe centrarse en la máxima capacidad de almacenamiento de los acuíferos. A profundidad por debajo del nivel freático normalmente los poros de las rocas están rellenos por agua, por tanto el potencial de almacenamiento de CO<sub>2</sub> reside en la fase fluida y en la compresibilidad elástica de la roca.

Los resultados de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en acuíferos profundos muestran un descenso general con el aumento del gradiente geotérmico y el aumento de la salinidad (Obdam, 2006).

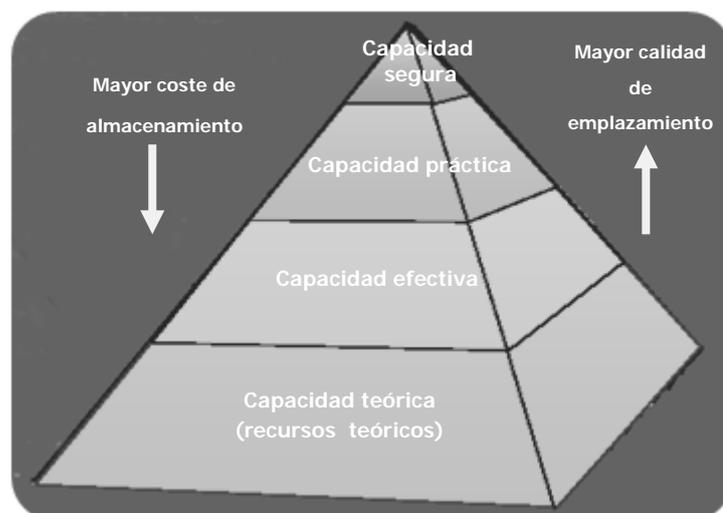


Figura 78. Concepto piramidal de la capacidad de almacenamiento según el esquema clásico de recursos-reservas (modificado de CSLF, 2005).

La base de la pirámide corresponde a la capacidad teórica y la parte superior a la capacidad segura. La confirmación hacia la capacidad más segura será cada vez más costosa, a medida que se vaya reduciendo el ámbito de estudio.

La capacidad teórica es una estimación poco realista. Representa el valor de capacidad que se obtendría si fuera posible aprovechar el volumen de poro completo de la formación susceptible de almacenar CO<sub>2</sub>, representa por tanto el límite superior de la capacidad estimada. Esta estimación se corresponde con escalas de trabajo regionales, es poco realista, en la práctica siempre existirán limitaciones técnicas, legales y económicas que harán que la capacidad sea siempre menor.

La capacidad efectiva o realista resulta tras aplicar una serie de limitaciones técnicas (geológicas y de ingeniería) a la capacidad teórica. Se posee un mayor grado de conocimiento del almacén.

La capacidad práctica se obtiene al tener en cuenta consideraciones técnicas, legales y reguladoras así como barreras económicas y de infraestructura. Corresponde con el concepto tradicional de reservas probadas.

La denominada capacidad segura corresponde a la capacidad que ha sido probada mediante la caracterización completa del almacén. Para su estimación existen en la actualidad grandes lagunas en el conocimiento de los parámetros que permitirían determinar el rango de dicha capacidad, lo que requerirá el desarrollo de importantes estudios de caracterización (Hurtado, 2010).

La escala de trabajo es un factor fundamental a la hora de llevar a cabo los estudios necesarios para determinar la capacidad de almacenamiento, la metodología a aplicar así como la clase y el nivel de detalle de los datos que se requieren, varían en función de la escala.

Se han identificado varias escalas de trabajo diferentes (Fig. 79):

-Escala de país: Esta evaluación debe realizarse para determinar si hay suficiente capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en un país, que tipos de capacidad de almacenamiento están disponibles y que riesgos pueden existir. En la mayoría de los casos el resultado de este tipo de evaluación es la identificación de las cuencas sedimentarias de ese país que tienen un alto potencial de almacenamiento y que deberían constituir el objeto de nuevos estudios.

-Escala regional: El área de almacenamiento debe de ser delineada utilizando los datos geológicos y medioambientales. En esta escala de trabajo se realizan estimaciones de la capacidad teórica, ya que se incluyen los volúmenes no económicos y no realistas del almacén.

-Escala de cuenca: Esta requiere un nivel más detallado de la evaluación, se centra en una determinada cuenca sedimentaria para evaluar y cuantificar su potencial de almacenamiento y

para identificar las mejores regiones y/o sitios para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> y su tipo, en relación a las grandes fuentes estacionarias de CO<sub>2</sub> en la cuenca o en su proximidad.

-Escala local: La evaluación es muy detallada, por lo general se realiza un estudio ingenieril, cuando uno o varios candidatos a nivel de emplazamiento se estudian para examinar su capacidad (capacidad práctica) y darle un orden de prioridad. La evaluación implica el análisis económico. En la mayoría de los casos este tipo de análisis probablemente constituye la base para el proceso de autorización de lugares de inyección.

-Escala de emplazamiento: Definición de los parámetros del almacenamiento, se determina la capacidad probada del almacenamiento y se desarrolla un modelo de comportamiento de la inyección del CO<sub>2</sub>.

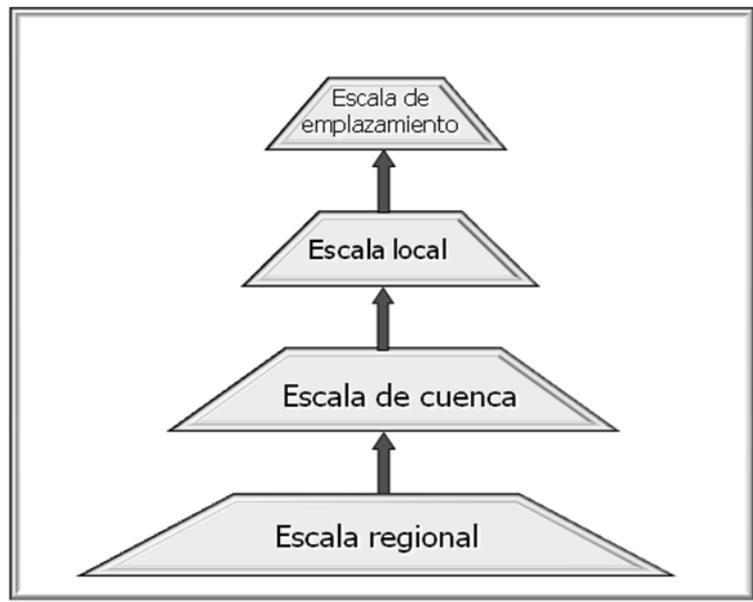


Figura 79. Escalas de trabajo para las diferentes etapas de estudio de almacenes de CO<sub>2</sub> (modificado de CSLF, 2007).

EL USDOE propone una sencilla ecuación, para el cálculo de la capacidad de almacenamiento en acuíferos salinos profundos (CSLF, 2008).

La ecuación es la siguiente:

$$MCO_2 = A \times h \times \Phi \times \rho_{CO_2} \times E \quad (7.1)$$

Donde:

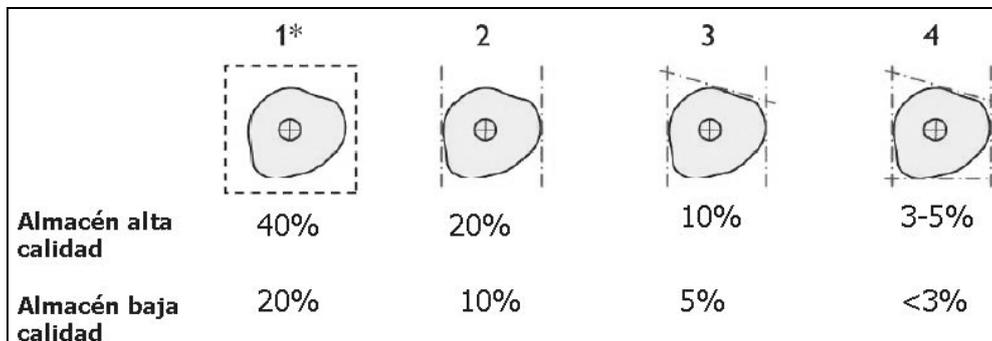
MCO<sub>2</sub>: Capacidad de almacenamiento teórica (t)

- A : Área del acuífero regional o de la estructura (m<sup>2</sup>)
- h : Potencia neta de la formación almacén (m)
- Φ : Porosidad media del almacén (%)
- ρCO<sub>2</sub> : Densidad del CO<sub>2</sub> en condiciones del almacén (t/m<sup>3</sup>)
- E : Coeficiente de almacenamiento (estimado o conocido).

La densidad del CO<sub>2</sub> varía con la profundidad y es función de la presión y de la temperatura.

El coeficiente de almacenamiento es un factor que refleja la cantidad de volumen de poros que pueden ser saturados con CO<sub>2</sub> en la formación.

Para acuíferos regionales se usa un coeficiente de almacenamiento (E) de 2%, basado en trabajos realizados por el DOE. Para trampas estructurales o trampas estratigráficas se sugieren distintas aproximaciones. Las más simple es considerar un rango entre 3% y el 40%, para almacenes de baja calidad y almacenes de alta calidad respectivamente (figura 80).



\*El volumen del acuífero regional debe ser 5-10 veces mayor que el volumen de la trampa

Figura 80. Cálculo del coeficiente de almacenamiento (rule of thumb) (Zapatero *et al.*, 2009).

Otra aproximación sugiere un factor de almacenamiento en función de la profundidad y el volumen del acuífero respecto del volumen de la trampa ( $V_{aq}/V_{trap}$ ) tal y como se muestra en la tabla 25.

Para el cálculo de la eficiencia de la trampa (Fig. 81) se propone la ecuación siguiente:

$$\text{Eficiencia de la trampa} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{trap}}} = c \cdot \Delta p \cdot \frac{V_{\text{aq}}}{V_{\text{trap}}}$$

(7.2)

Donde:

$$V_{\text{CO}_2} = c \cdot \Delta p \cdot \phi \cdot V_{\text{aq}}$$

$$V_{\text{trap}} = \phi \cdot V_{\text{trap}}$$

Siendo:

$V_{\text{CO}_2}$  = Volumen de CO<sub>2</sub> almacenado

$c$  = Compresibilidad del poro más la del fluido ( $C_{\text{poro}} + C_{\text{fluido}}$ )

$\phi$  = Porosidad del almacén

$\Delta p$  = Incremento de presión admitida en la inyección

$V_{\text{aq}}$  = Volumen del acuífero

$V_{\text{aq}}$  = Volumen de poro en el acuífero.

$V_{\text{trap}}$  = Volumen de la trampa

$V_{\text{trap}}$  = Volumen de poro en la trampa

$V_{\text{aq}} / V_{\text{trap}}$  = Relación volumen de poro en acuífero/volumen de poro en la trampa

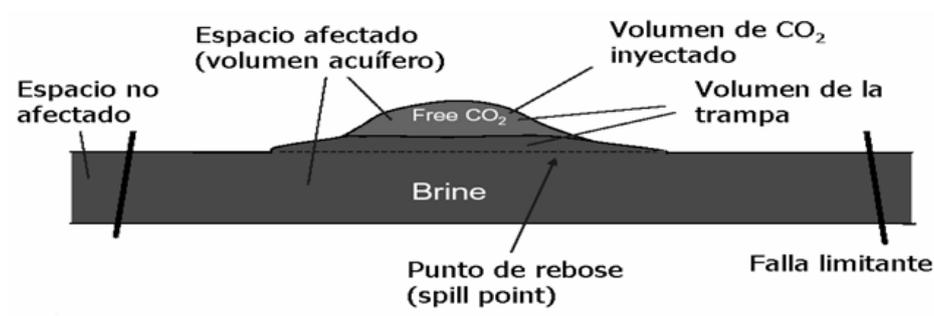


Figura 81. Modelo simple de estimación (Zapatero *et al.*, 2009).

Profundidad (m)	Vaq. / Vtrap.				
	1	5	10	50	100
1.000	0,10	0,5	1,0	5	10
1.500	0,15	0,8	1,5	8	15
2.000	0,20	1,0	2,0	10	20
2.500	0,25	1,3	2,5	13	25
3.000	0,30	1,5	3,0	15	30
3.500	0,36	1,8	3,6	18	36

Tabla 25. Valores del factor de almacenamiento en función de la profundidad y el volumen del acuífero (Zapatero *et al.*, 2009).

Para un almacén que se encuentra a 1.000 m de profundidad, el factor de almacenamiento para la relación volumen de acuífero/volumen trampa del 5, 10, 50 y 100, es 0,5%, 1%, 5% y 10% respectivamente, asumiendo un máximo de incremento de la presión del 10 % sobre la presión hidrostática de la formación para dicha profundidad y una compresibilidad total del  $10^{-4} \text{ bar}^{-1}$  (Vangkilde-Pedersen *et al.*, 2008).

Los factores que definen el volumen almacenable de CO<sub>2</sub> son: la capacidad de almacenamiento, la inyectabilidad y la eficiencia de almacenamiento.

La capacidad máxima de almacenamiento es simplemente el volumen total del espacio creado como consecuencia del aumento de presión y la consiguiente compresión de todos los fluidos en el espacio afectado. Dicha capacidad de almacenamiento depende del incremento de presión, compresibilidad, volumen afectado y volumen total de inyección. Para un volumen de subsuelo dado podemos calcular el máximo volumen de CO<sub>2</sub> que puede ser almacenado en él.

La inyectabilidad nos indica el ritmo de flujo de entrada de CO<sub>2</sub> que podemos mantener (tasa máxima de inyección a la presión máxima permitida). Así, si tenemos una formación de capacidad adecuada pero, por sus características de permeabilidad presenta baja inyectabilidad, dicho almacén no puede considerarse adecuado para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

La eficiencia del almacenamiento de la trampa nos indica el espacio disponible frente al espacio utilizado para almacenar CO<sub>2</sub>.

Para el almacén denominado como Formación Columbares en la zona Bnejúzar-Rojales-La Marina, se estima la capacidad de almacenamiento utilizando la metodología propuesta por CSLF. El área de la estructura es de 409 km<sup>2</sup>, la potencia media de la formación almacén es de 100 m, como porosidad media 8%, y la densidad del CO<sub>2</sub> en condiciones del almacén es de 475 kg/m<sup>3</sup>. Con estos datos y un coeficiente de almacenamiento del 2%, aplicando la fórmula (7.1), se obtiene una capacidad efectiva de 311 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

## **CHAPTER 7**

### **GEOLOGICAL STATIC MODEL AND STORAGE CAPACITY ESTIMATION**

---

## 7.1. Geological static model

As technical criteria to characterize and evaluate the complex storage, the Directive on Geological Storage of carbon dioxide in Spain that the Council of Ministers approved as regulation for geological storage of CO<sub>2</sub>, one of the stages of the research requires the creation of a dimensional geological static model.

By using the interpolation program Surfer 8, integrates information of: seismic lines, deep drilling and depth contours maps generated for the elaboration of a three-dimensional static model of the study area

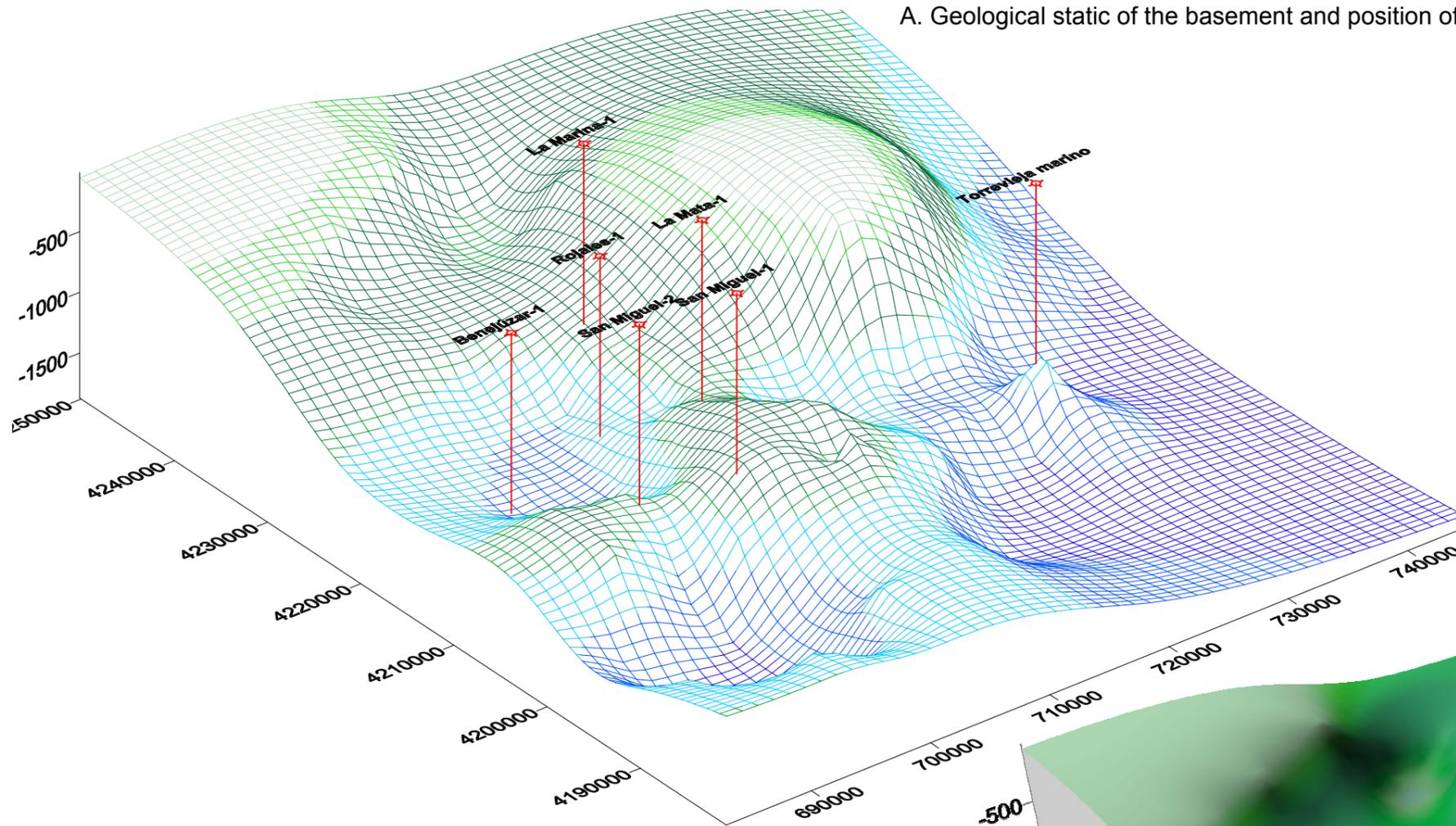
The software Surfer 8 is a program developed by Golden Software company and allows visualization and mapping surfaces and contours in two and three dimensions. This program allows us to generate 3D models of the surface of the basement of the Bajo Segura Basin and discontinuity fini-Tortonian (Fm Pujálvarez). These models are made with the data produced from the processing depth of the horizons of interest in deep drilling and seismic lines. This information was prepared by the method interpolation Krigging. The result is the display of static geological models in three dimensions.

These models allow us to visualize the geometry and spatial arrangement of the substrate in the basin and to locate more precisely the possible storage of CO<sub>2</sub>. It is necessary to select an area in which it is deep enough to submit sufficient thickness and material found at a depth greater than 800 m.

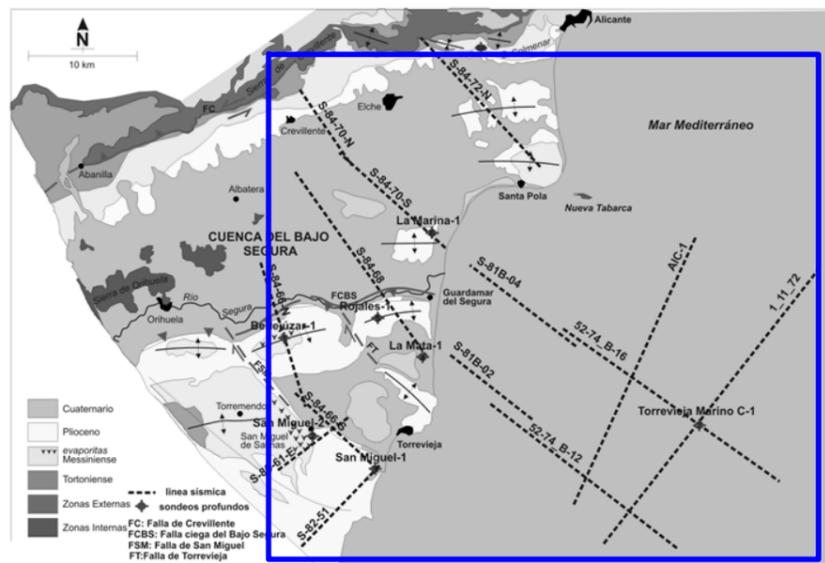
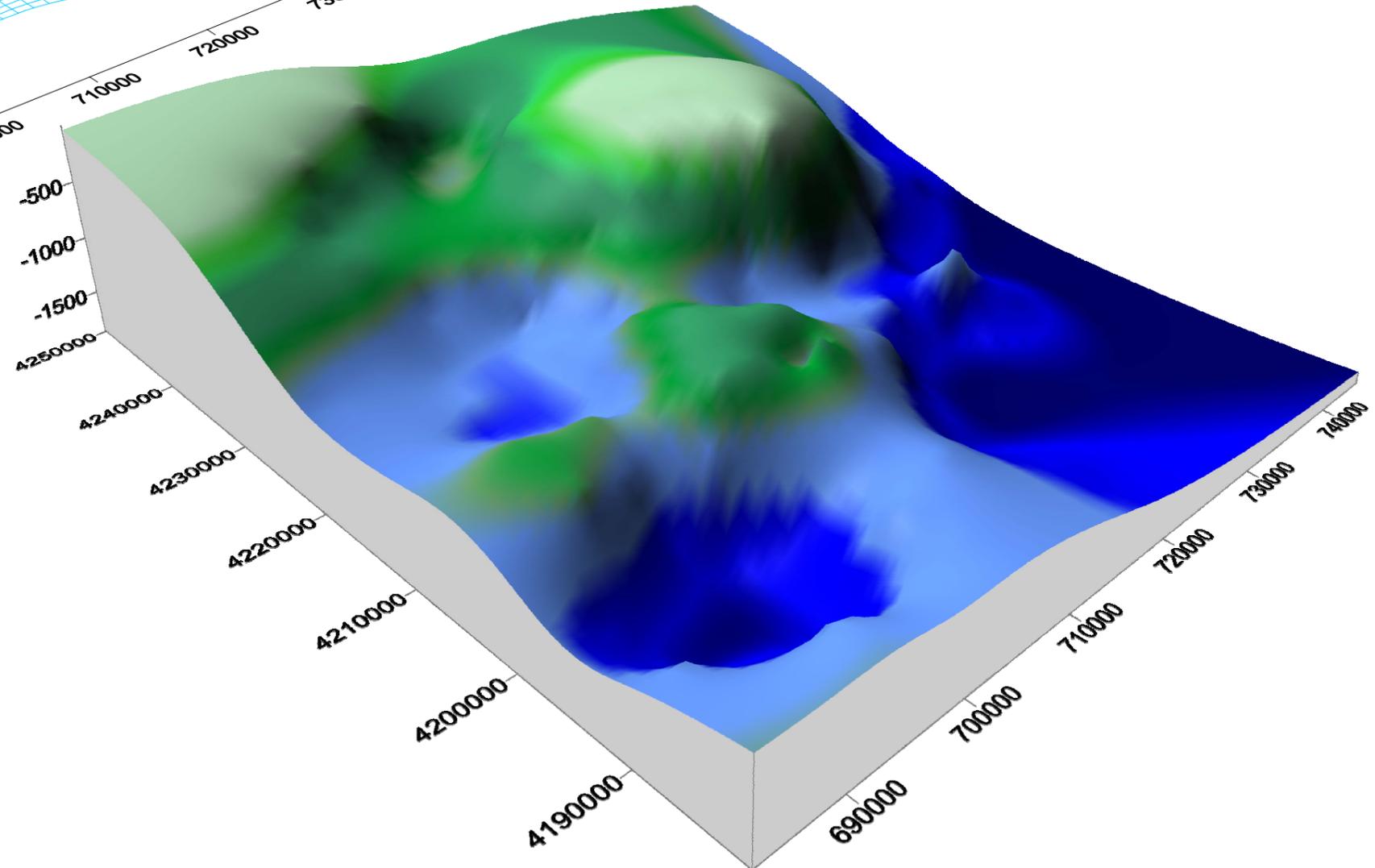
Figure 76 illustrates the 3D surface model from the roof of the basement in the Bajo Segura Basin, with the position of the 7 studied deep drilling and the position map of static geological model generated, which covers the area onshore and offshore.

According to the model obtained, the place that has more depth to basement is in the offshore area and in the groove between Benejúzar-Rojales-La Marina

A. Geological static of the basement and position of the deep drilling

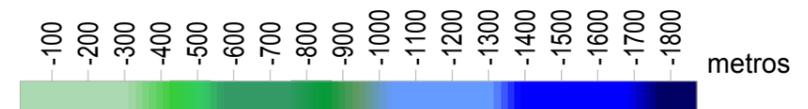


B. 3D surface model of the basement in the study area



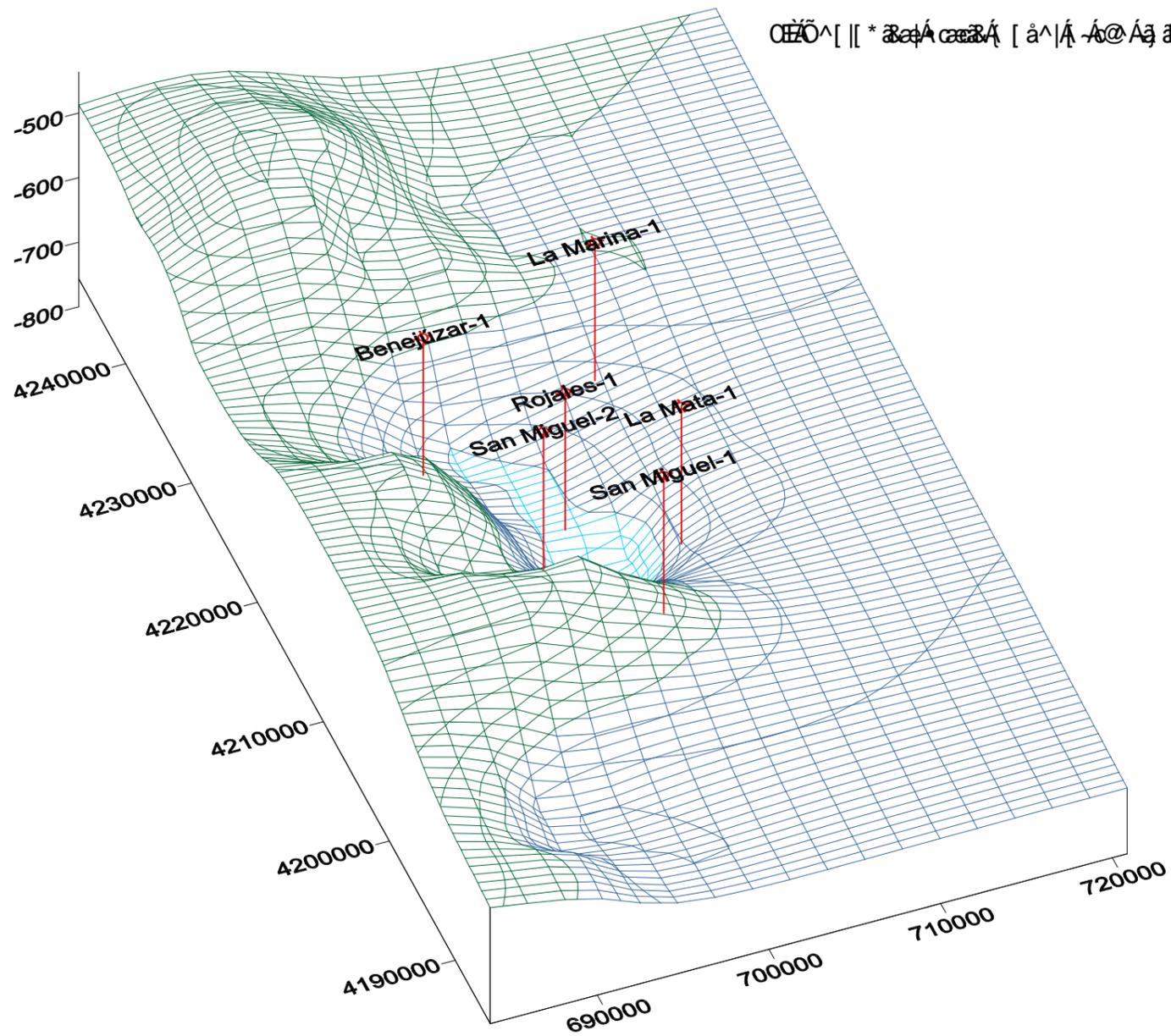
C. Map and position geological static model of the basement

Figure 76. Geological static model of the basement in the Bajo Segura Basin

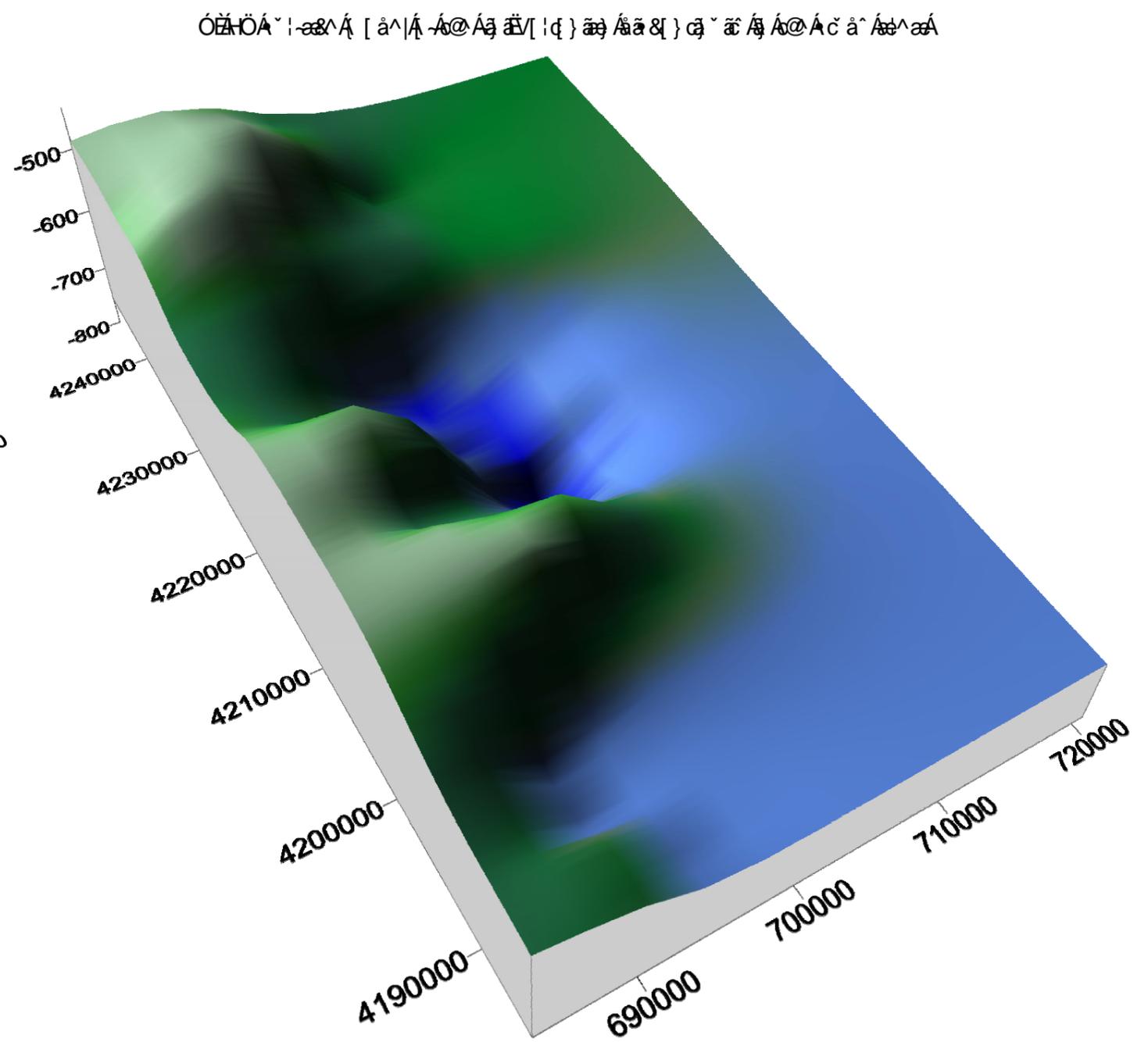


The model generated from the roof of the Fm Pujálvarez, Fig. 77, illustrates the surface of discontinuity fini-Tortonian in the Bajo Segura Basin, indicates the position of deep drilling and the map with the position of static geological model. In this case the geologic model is generated mainly in the onshore, and the discontinuity in the offshore has not been defined.

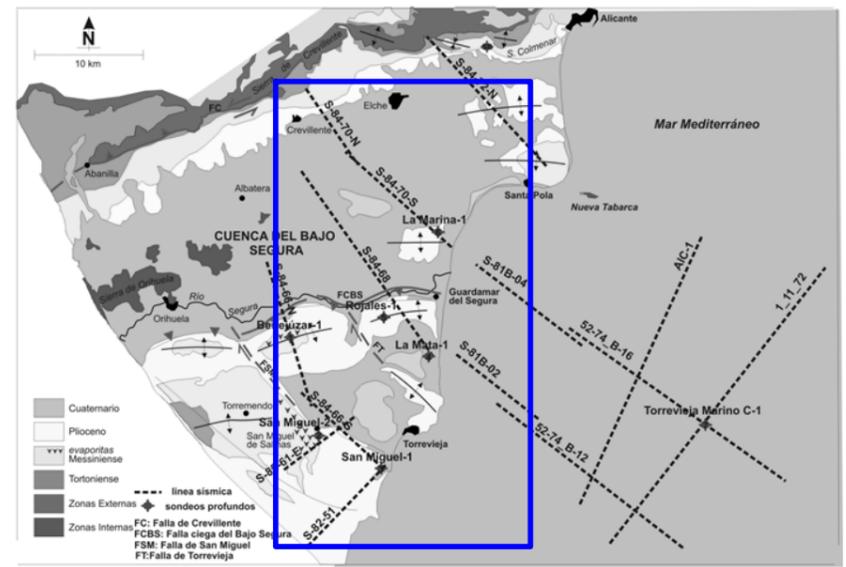
The greatest depth is in the groove Benejúzar-Rojales-La Marina.



ÓÈÖ^[[ \* ßÄ cæÄ [ ä^|Ä -Ä@Ää ßV[!q} ãÄ Ää &|} ç~ æ Ää äÄ[•ãÄ} Ä -Ä@Ä^Ä] Äiäqä \* Ä



ÓÈÖÖÄ~!-æ^Ä [ ä^|Ä -Ä@Ää ßV[!q} ãÄ Ää &|} ç~ æ Ää Ä@Äc ä^ÄæÄ



ÔÈÖ çÄ äÄ[•ãÄ} Ä^[[ \* ßÄ cæÄ [ ä^|Ä -Ä@Ää ßV[!q} ãÄ Ää &|} ç~ æ Ää äÄ[•ãÄ} Ä -Ä@Ä^Ä] Äiäqä \* Ä

Figure 77. Geological static model of the fini-Tortonian discontinuity in Bajo Segura Basin



## 7.2. Estimation of storage capacity

Work aimed at establishing a methodology for estimating CO<sub>2</sub> storage capacity were carried out by the CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum).

Geological storage capacity is a geologic resource ("commodity"). Thus it is expressed as a scheme of resource-reserves, being conceptualized, therefore, as a resource pyramid (CSLF, 2005).

The resource pyramid concept was introduced by McCabe (1998) as a method to describe the accumulation of hydrocarbons in different categories. This concept has been proposed to represent similar geological storage capacity of CO<sub>2</sub>, as illustrated in figure 78.

Investigation of CO<sub>2</sub> geological sites should focus on the maximum storage capacity of aquifers. A depth below the normal water level of the rock, pores are filled by water, thus, the potential for CO<sub>2</sub> storage is in the fluid phase and the elastic compressibility of the rock.

The results of the storage capacity of CO<sub>2</sub> in deep aquifers generally show a decrease with increasing geothermal gradient and increasing salinity (Obdam, 2006).

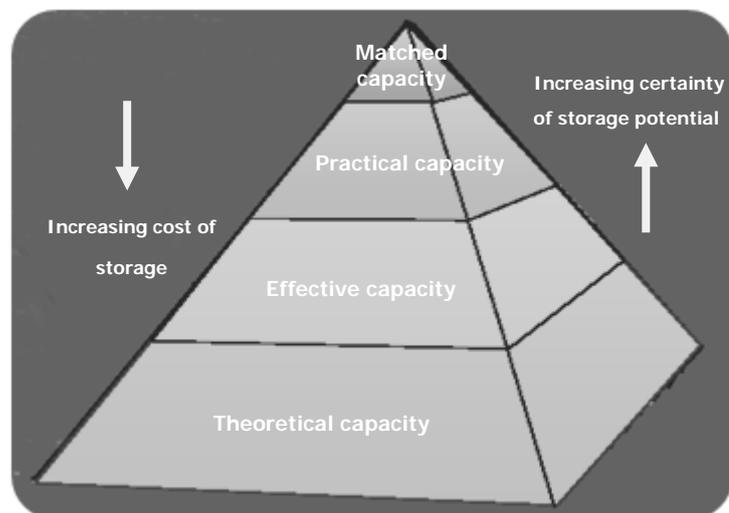


Figure 78. Concept of storage capacity as the classic resource-reserves pyramid (modified from CSLF, 2005).

The base of the pyramid corresponds to the theoretical capacity and the top to the safe capacity. Confirmation to a more secure capacity is increasingly costly, as it will reduce the field of study.

The theoretical capacity is an unrealistic estimation. It represents the capacity value that would result if it were possible to exploit the entire pore volume capable of storing the CO<sub>2</sub> formation, therefore, it represents the upper limit of the estimated capacity. This estimation corresponds to regional working scales, it is unrealistic, in practice there will always be legal and economic limitations will that capacity is always less.

The effective capacity or realistic is the result of applying a number of technical limitations (geological and engineering) to the theoretical capacity. It has a higher degree of knowledge of the store.

The practical capacity is obtained by taking into technical, legal and regulatory account and economic barriers and infrastructure. It corresponds to the traditional concept of proved reserves.

The safe capacity corresponds to the capacity that has been proven by the complete characterization of the store. For the estimate there are currently large gaps in knowledge of the parameters that would determine the range of this capacity, which will require the development of important characterization studies (Hurtado, 2010).

The scale of work is a key factor in carrying out the necessary studies to determine the storage capacity, the methodology to be applied and the type and level of detail of data required, which varies depending on the scale.

They have identified several different working scales (Fig. 79):

-Country scale: This evaluation should be conducted to determine if there is enough CO<sub>2</sub> storage capacity in a country, what types of storage are available and what risks may exist. In most cases the result of this type of evaluation is the identification of sedimentary basins in the country which have a high storage potential and should be the subject of further studies.

-Regional scale: The storage area must be delineated using geological and environmental data. Work on this scale are made estimating the theoretical capacity because they are including the economic unrealistic volume of the store.

-Basin scale: This requires a more detailed evaluation, focusing on a particular sedimentary basin to evaluate and quantify the potential for storage and to identify the best regions and / or storage sites for CO<sub>2</sub> and type in relation to major stationary sources of CO<sub>2</sub> in the basin or in the proximity.

-Local scale: The assessment is very detailed, usually a study engineering is performed when one or more candidates at the site level are studied to examine their capacity (practical capacity) and give an order of priority. The assessment involves economic analysis. In most cases this type of analysis may form the basis for the authorization process of injection sites.

-Site scale: Defining the storage parameters, determining the storage capacity tested and developing a model of the injection of CO<sub>2</sub>.

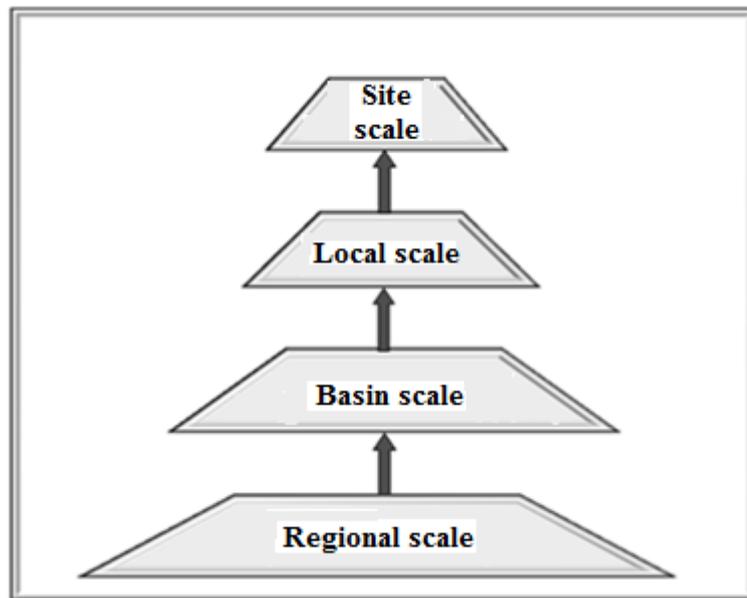


Figure 79. Working scales for different stages of study of CO<sub>2</sub> storage (modified from CSLF, 2007).

THE USDOE proposes a simple equation for calculating the storage capacity in deep saline aquifers (CSLF, 2008).

The equation is as follows:

$$MCO_2 = A \times h \times \Phi \times \rho_{CO_2} \times E \quad (7.1)$$

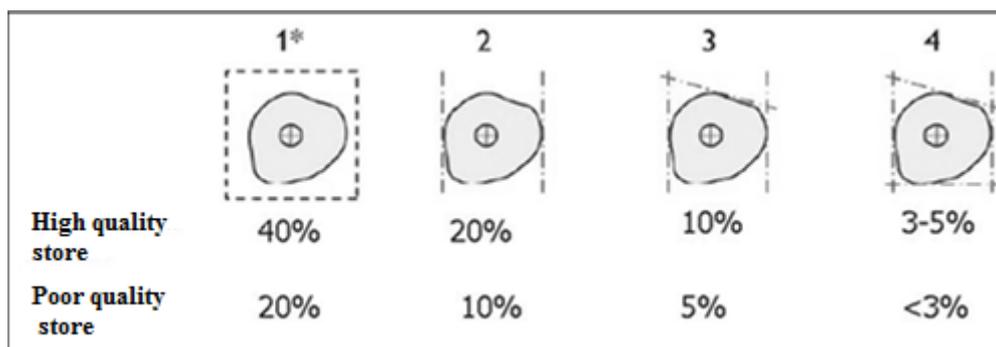
Where:

- MCO<sub>2</sub>: Theoretical storage capacity (t)
- A : Regional aquifer area or structure (m<sup>2</sup>)
- h : Thickness of formation store (m)
- Φ : Mean porosity of the store (%)
- ρCO<sub>2</sub> : Density of CO<sub>2</sub> storage conditions (t/m<sup>3</sup>)
- E : Storage coefficient.

CO<sub>2</sub> density varies with depth and its function of pressure and temperature.

The storage modulus is a factor which reflects the amount of pore volume that can be saturated with CO<sub>2</sub> in the formation.

For regional aquifers using a storage coefficient (E) of 2%, based on work done by the DOE. For structural and stratigraphic traps different approaches are suggested. The simplest one is to consider a range between 3% and 40% for storage of low quality and high-quality stores, respectively (figure 80).



\* The volume of the regional aquifer should be 5-10 times the volume of the trap

- - - - - Fault

Figure 80. Calculation of the coefficient of storage (rule of thumb) (Zapetero *et al.*, 2009).

Another approach suggests a storage factor depending on the depth of the aquifer and the volume of aquifer with respect to the volume of the trap ( $V_{aq}/V_{trap}$ ) as shown in table 25.

To calculate the efficiency of the trap (Fig. 81) the following equation is proposed:

$$\text{Efficiency of the trap} = \frac{V_{CO_2}}{V_{trap}} = c \cdot \Delta p \cdot \frac{V_{aq}}{V_{trap}} \quad (7.2)$$

Where:

$$V_{CO_2} = c \cdot \Delta p \cdot \phi \cdot V_{aq}$$

$$V_{trap} = \phi \cdot V_{trap}$$

$V_{CO_2}$  = Volume of CO<sub>2</sub> stored

$C$  = Compressibility of pore + fluid ( $C_{poro} + C_{fluid}$ )

$\phi$  = Porosity of the store

$\Delta p$  = Increasing the injection pressure admitted

$V_{aq}$  = Aquifer volume

$V_{aq}$  = Pore volume in the aquifer.

$V_{trap}$  = Volume of the trap

$V_{trap}$  = Pore volume in the trap

$V_{aq}/V_{trap}$  = Relationship aquifer pore volume / pore volume in the trap

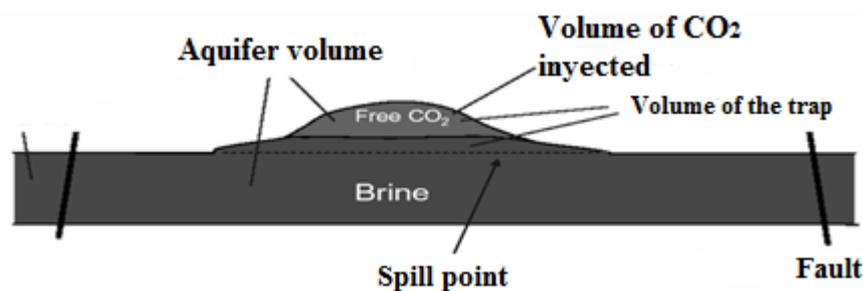


Figure 81. Simple model estimation (Zapatero *et al.*, 2009).

Depth (m)	V <sub>aq.</sub> / V <sub>trap.</sub>				
	1	5	10	50	100
1.000	0,10	0,5	1,0	5	10
1.500	0,15	0,8	1,5	8	15
2.000	0,20	1,0	2,0	10	20
2.500	0,25	1,3	2,5	13	25
3.000	0,30	1,5	3,0	15	30
3.500	0,36	1,8	3,6	18	36

Table 25. Storage factor values depending on the depth and volume of aquifer (Zapatero *et al.*, 2009).

For a store that is located at 1000 m depth, the storage factor for the relationship aquifer volume/volume trap 5, 10, 50 and 100, is 0.5%, 1%, 5% and 10% respectively, assuming a maximum pressure increase of 10% of the hydrostatic pressure of the formation for depth and a total compressibility  $10^{-4} \text{ bar}^{-1}$  (Vangkilde-Pedersen *et al.*, 2008).

The factors that define the CO<sub>2</sub> storable volume are: storage capacity, injectability and storage efficiency.

The maximum storage capacity is simply the total volume of the space created as a result of increased pressure and the resulting compression of all fluids in the space concerned. Such storage capacity depends on the pressure increase, compressibility, affected volume and total volume of injection. For a subsurface volume we can calculate the maximum amount of CO<sub>2</sub> that can be stored in it.

The injectivity indicates the rate of inflow of CO<sub>2</sub> (maximum injection rate to the maximum allowable pressure). Thus, if we have a formation with capacity, but their permeability characteristics have low injectability, the store can not be considered adequate for CO<sub>2</sub> storage.

The storage efficiency of the trap indicates the available space against the space used to store CO<sub>2</sub>.

For the store known as Fm Columbares in the area Benejúzar-Rojales La Marina, we estimate the storage capacity using the methodology proposed by CSLF.

The area of the structure is  $409 \text{ km}^2$ , the average thickness of the storage formation is 100 m, 8% average porosity, and density of  $\text{CO}_2$  in terms of store is  $475 \text{ kg/m}^3$ .

With this information and a storage coefficient of 2%, using the formula (7.1), we obtain an effective capacity of 311 million tons of  $\text{CO}_2$ .

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSIONES/CONCLUSIONS**

---

## CONCLUSIONES

En los siguientes puntos se exponen de manera sintética las aportaciones más significativas de la investigación:

-Los materiales con más interés en la zona de estudio como posible almacén se encuentran por debajo de la discontinuidad fini-Tortonense, denominados en el sector sur como Formación Pujálvarez y Formación Columbares, compuestos de areniscas finas y conglomerados, con su equivalente en el sector norte de la zona de estudio denominado como Formación de Calcarenitas de las Ventanas. Por encima de la discontinuidad fini-Tortonense las margas de la Formación Torremendo actuarían como sello de estos materiales. Asimismo se deben considerar como posible almacén los niveles basales tortonienses constituidos por conglomerados, brechas y areniscas.

Otros niveles considerados en principio de interés, como los carbonatos triásicos han sido descartados por su baja permeabilidad y porosidad a la profundidad requerida para albergar un almacén de CO<sub>2</sub>.

También se tuvieron en cuenta, a priori, las calcarenitas de la Formación la Virgen del sector norte de la cuenca, como posible formación almacén, con su sello correspondiente constituido por las formaciones de margas del Messiniense así como todo el conjunto Plioceno, sin embargo, han sido posteriormente descartadas ya que a pesar de presentar características petrofísicas e hidrogeológicas idóneas no se presentan a la profundidad adecuada en la zona que nos ocupa.

- La catalogación de la zona delimitada en esta investigación como adecuada para albergar un almacén de CO<sub>2</sub> se ve dificultada por la sismicidad registrada en la zona, pero esto no debe suponer su rechazo, ya que las posibilidades pueden darse tanto en tierra como en mar y el espesor (alrededor de 500 metros) de las margas plásticas, que actuarían como nivel sellante,

puede ser suficiente para asegurar la estanqueidad de la formación almacén incluso si se viera afectada por algún temblor.

- Para la identificación más exacta de las propiedades petrofísicas de las formaciones, tramos o unidades con posibilidades de albergar un almacén de CO<sub>2</sub>, sería conveniente perforar varios sondeos con testificación geofísica, a una profundidad mayor de 800 m.

También, se podría completar la geofísica existente con alguna línea sísmica moderna que sirviera de apoyo a los sondeos. Además de la interpretación geofísica obtenida se recomienda recoger testigos para realizar los ensayos de laboratorio adecuados para caracterizar los materiales.

- Con los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las muestras del sondeo Bacarot podemos caracterizar con más detalle la formación de interés, aunque no son definitivos para asegurar que esa formación pueda ser susceptible de albergar un almacén de CO<sub>2</sub>.

Las propiedades petrofísicas obtenidas en el sondeo perforado en Bacarot, en la formación almacén, varían mucho de las obtenidas en los sondeos profundos mediante el estudio de los registros geofísicos, existiendo variaciones de hasta el 25% entre los datos obtenidos de porosidad a menor profundidad que los registrados a profundidades mayores.

- Se delimitan las áreas más interesantes para poder albergar en un futuro un almacén de CO<sub>2</sub> en la Cuenca del Bajo Segura y en la zona offshore. Hay que tener en cuenta que los datos de los que disponemos son escasos y antiguos. En este sentido cabe destacar la falta de investigaciones petrolíferas en España, las cuales aportan los datos esenciales para estas investigaciones, haciéndolas, en principio, menos costosas.

## CONCLUSIONS

In the following points we briefly expound the most relevant results of this research:

- The materials of greatest interest in the area of study as conforming a possible CO<sub>2</sub> storage are found below the latest- Tortonian discontinuity, denominated in the southern sector as the Pujálvarez Formation and the Columbares Formation. These are made up of fine sandstones and conglomerates, their counterpart in the northern sector of the study zone being the calcarenite Las Ventanas Formation. Above the latest-Tortonian discontinuity, the marls of the Torremendo Formation would serve to seal these materials. Moreover, the basal Tortonian levels constituted by conglomerates, breccias and sandstones should be considered as a possible storage of CO<sub>2</sub>.

Other levels of potential interest, such as the Triassic carbonates, are discarded in view of their low permeability and porosity at the depths required for harboring a CO<sub>2</sub> storage.

Also considered a priori were the calcarenites of the la Virgen Formation of the northern sector of the basin; they would be sealed by the marl formations of the Messinian and the entire Pliocene set. However, they were determined to be unsuitable as storage. Despite presenting ideal petrophysical and hydrogeological characteristics, their depth is inadequate in the zone of study.

- Cataloguing the zone delimited in this research study as adequate for containing a CO<sub>2</sub> deposit is complicated by the seismicity registered in the zone. Yet this in itself is not a basis for rejection, as such possibilities can exist on land or in the sea, and the thickness (around 500 meters) of the plastic marls, which would act as the sealing level, may prove sufficient to ensure the permanence of the storage formation, even if affected by a tremor.

- To more precisely identify the petrophysical properties of the formations, sections or units with the capacity for storing CO<sub>2</sub>, it would be advisable to drill several cores, with geophysical sampling at a depth greater than 800 m.

Moreover, the existing geophysical data should be complemented with a modern seismic line to support the drilling data. Geophysical interpretations would benefit from the collection of further samples and the performance of adequate laboratory assays in order to characterize the materials.

- The laboratory results of the samples obtained by Bacarot well allow us to characterize the formation at hand in greater detail, although these data do not serve to confirm that the formation is adequate for a CO<sub>2</sub> deposit.

The petrophysical properties determined from the Bacarot well in the potential storage formation were seen to vary considerably from those of the deep cores, as derived by studying geophysical registers. Variations of up to 25% were found between the porosity data obtained at lesser depth and those recorded at greater depths.

- The most interesting areas for harboring a future CO<sub>2</sub> storage are delimited in the Bajo Segura Basin and the offshore zone. It is important to stress that the data we dispose of are scarce and may be outdated. In this sense, we must underline the lack of oil drilling research in Spain, which would provide essential information for such studies, possibly making them less costly as well.

## **REFERENCIAS**

---

- AEMET. 2011. *Atlas Climático Ibérico. Temperatura del aire y precipitación (1971-2000)*. Agencia Estatal de Meteorología, 79 p. ISBN: 978-84-7837-079-5.
- Alfaro, P. 1995. *Neotectónica en la Cuenca del Bajo Segura (Extremo oriental de la Cordillera Bética)*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 218 p.
- Alfaro, P., Delgado, J., Estévez, A., Soria, J.M. and Yébenes, A. 2002. Onshore and offshore compressional tectonics in the eastern Betic Cordillera (SE Spain). *Marine Geology*, 186, 337-349.
- Alfaro, P., Estévez, E., Borque, M.J., Gil, A. J. y Giménez, J. 2010. La falla ciega del Bajo Segura (Cordillera Bética Oriental). *Primera Reunión Ibérica sobre fallas Activas y Paleosismología. IberFault*.
- Allen, P.A. and Allen, J.R. 1990. *Basin analysis: Principles & Applications*. Blackwell Science, 451 p. ISBN: 9780632024223.
- Almela, A., Quintero, I., Gómez, E., Mansillea, H., Cabañas, I., Uralde, M.A., Martínez, C., Martínez, W., Orche, E. y Pastor, J.R. 1978. Mapa y memoria explicativa de la hoja de Guardamar del Segura (914) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME.
- Ahr, W.M. 2008. *Geology of carbonate reservoirs: the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoir in carbonate rocks*. John Wiley & Sons, 277 p. ISBN: 978-0-470-16491-4.
- Bachu, S. and Burwash, R.A. 1991. Regional-scale analysis of the geothermal regime in the Western Canada sedimentary basin. *Geothermics*, Vol. 20, N°5/6, 387-407.
- Bachu, S. and Burwash, R.A. 1993. Geothermal regime in the Western Canada Sedimentary Basin.; in *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, G.D. Mossop and I. Shetsen (comp.), Canadian Society of Petroleum Geologists and Alberta Research Council. [http://www.ags.gov.ab.ca/publications/wcsb\\_atlas/atlas.html](http://www.ags.gov.ab.ca/publications/wcsb_atlas/atlas.html).
- Bachu, S., Brulotte, M., Grobe, M., Stewart, S.A. 2000. Suitability of the Alberta Subsurface for Carbon Dioxide Sequestration in Geological Media. Alberta Energy and Utilities Board. Alberta Geological Survey.
- Bachu, S. 2000. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41, 953-970.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Christensen, N.P., S. Holloway, S., Mathiassen, O.M. 2007. *Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Geological Media, Phase2*. Carbon Sequestration

Leadership Forum, Technical Group, Task Force on CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation, Phase II Final Report, 42.

Bachu, S. 2008. Identification and capacity Quantification of CO<sub>2</sub> storage sites. Workshop on Capacity Building in Mexico. July 9-10. Mexico City.

Benavente, D. 2002. *Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 291 p.

Benavente, D. 2006. Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante.

Benavente, D. 2008. Petrología Aplicada. 2º de Ingeniería Geológica. Universidad de Alicante.

Bennaceur, K., Monea, M., Sakurai, S., Gupta, N., Ramakrishnan, T., Whittaker, S. and Randen, T. 2004. CO<sub>2</sub> Capture and storage - A solution Within. *Oifield Review*. Volume 16, Number 3.

Boer, A., Egeler, G., Kampschuur, W., Montenat, C., Rondeed, H.E., Simon, O.J., Winkoop, A. A. 1982. Mapa y memoria explicativa de la hoja de Orihuela (913) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME.

Bourbié, T., Coussy, O. and Zinszner, B. 1986. *Acoustics of Porous Media*. Paris. Editions Technip. ISBN: 2-7108-0516-2.

Boyd, P. 2007. Biogeochemistry: Iron findings. *Nature*, 446, 989-991.

Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P. and Mathiassen, O.M. 2006. CO<sub>2</sub> storage capacity estimations: issues and development of standards. International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-8). Elsevier, Volumen 1, 62-68.

Brown, K., Jazrawi, W., Moberg, R. and Wilson, M. 2001. Role of Enhanced Oil Recovery in Carbon Sequestration. The Weyburn Monitoring Project, a case study.

Burillo, F.J. 1989. Sismicidad y sismotectónica en las Cordilleras Béticas. ITGE.

Calvet, F., Zamarreño, I. y Vallés, D. 1996. Late Miocene reefs of the Alicante-Elche Basin, southeast Spain. Models for Carbonate Stratigraphy from Miocene Reef Complexes of Mediterranean Regions. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology*, 5: 177-190.

- Cervený, K., Davies, R., Dudley, G., Kaufman, P., Knipe, R. y Krantz, B. 2005. Menor incertidumbre con el análisis de fallas que actúan como sello. *Oxford Review*. Volume 16. Issue 4, 42-57.
- CESE (Comité Económico y Social Europeo). 2008. Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono. NAT/401. Bruselas.
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. and Zweigel, P. 2008. Best Practice for the Storage of CO<sub>2</sub> in Saline Aquifers. Observations and Guidelines from the SACS and CO2STORE Projects. British Geological Survey, 273 p.
- Chiaromonte L, Zoback M, Friedmann S, Stamp V. 2006. CO<sub>2</sub> Sequestration, Fault Stability and Seal Integrity at Teapot Dome, Wyoming. NEIL 5th Annual Conference on Carbon Sequestration, Alexandria.
- CMCC. 2005. Cuidar el clima. Guía de la Convención Marco sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto. Publicada por la Secretaría de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), Bonn (Alemania).
- CMNUCC. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1992.
- CO2GeoNet. 2008. What does CO<sub>2</sub> geological storage really mean. CSLF
- Cook, P. 2008. Carbon dioxide storage projects reaches first major milestone. CO2CRC.
- Cooper, C. (ed). 2009. A technical basis for carbon dioxide storage. CO<sub>2</sub> Capture Project. UK. ISBN: 978-1-872691-48-0.
- Corbí, H., Caracuel, J.E., Soria, J.M., Pina, J.A. y Yébenes, A. 2008. Asociaciones de foraminíferos del Messiniense y Plioceno del sector norte de la Cuenca del Bajo Segura. *Geogaceta*, 44.
- Corbí, H. 2010. *Los foraminíferos de la Cuenca Neógena del Bajo Segura (Sureste de España): Bioestratigrafía y cambio paleoambientales en relación con la crisis de salinidad del Mediterráneo*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 280 p.
- Correia, A., Marques da Silva, M., Ramalho, E.C. 2009. *Diagrafias Aplicadas à Hidrogeologia*. Coimbra. Palimage, 282 p. ISBN: 978-972-8999-64-3.

- Correia, A. y Ramalho, E. 2006. *Contributo para a caracterização térmica da crosta em Portugal continental. Análise e processamento de dados geotérmicos compilados até 1996*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação- Universidade de Évora.
- Correia, A., Jones, F.W. and Fricker, A. 1990. Terrestrial heat-flow density estimates for the Jeanne D'Arc Basin, offshore eastern Canada. *Geophysics*, Vol.55, No12. 1625-1633.
- CSLF. 2005. Carbon Sequestration Leadership Forum. Phase I Final Report from the Task Force for review and Identification of Standards for CO<sub>2</sub> storage capacity measurement.
- CSLF. 2007. Carbon Sequestration Leadership Forum. Phase II Final Report from the Task Force for review and Identification of Standards for CO<sub>2</sub> storage capacity estimation.
- CSLF. 2008. Carbon Sequestration Leadership Forum. Phase III Report. Comparison between Methodologies Recommended for Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Geological Media by the CSLF Task Force on CO<sub>2</sub> storage Capacity Estimation and the USDOE Capacity and Fairways Subgroup of the Regional Carbon Sequestration Partnerships Program.
- DOE/NETL. 2010. Best practices for: Geologic Storage Formation Classification: Understanding Its Importance and Impacts on CCS Opportunities in the United States. National Energy Technology Laboratory, 54 p.
- Dusseault, M., Bachu, S. and Davidson, B.C. 2001. Carbon Dioxide Sequestration Potential in Salt Solution Caverns in Alberta, Canada. Technical Meeting Albuquerque, New Mexico, USA.
- Durand-Delga, M. and Fontboté, J.M. 1980. Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. 26. Congr. Geol. Int., Paris. Les Chanes alpines issues de la Téthys. B.R.G.M., 115: 67-85.
- EECCCEL. Estrategia Española de Cambio climático y Energía Limpia Horizonte: 2007-2012-2020. Ministerio de Medio Ambiente.
- Ennis-King, J. P. and Paterson L. 2001. Reservoir engineering issues in the geological disposal of carbon dioxide. Proceedings of the Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies.
- Ennis-King, J. P. and Paterson L. 2005. Role of convective mixing in the long-term storage of carbon dioxide in deep saline formations. *SPE Journal*, vol 10 (3), 349-356.

- Estévez, A., Vera, J.A., Alfaro, P., Andreu, J.M., Tent-Manclús, J.E. y Yébenes, A. 2004. Geología de la provincia de Alicante. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*. 12.1. 2-15. I.S.S.N.: 1132-9157.
- Fallot, P. 1945. *Estudios geológicos en la zona subbética entre Alicante y el río Guadiana Menor*. Madrid, Publ. Inst. "Lucas Mallada" C.S.I.C., 719 p.
- Forbes, S.M., Verma, P., Friedmann, S.J., Curry, T.E., Wade, S.M. and Venezie, J. 2008. Guidelines and emerging geologic sequestration regulations: a comparative assessment. International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9). Washington DC, USA, 1759-1766.
- Friedlingstein, P. 2008. A steep road to climate stabilization. *Nature*. Vol. 451. Doi: 10.1038/06593.
- Gauyau, F. 1977. *Étude géophysique dans le Levant Espagnol (entre Alicante et Totana): le problème du prolongement de l'accident d'Albama de Murcia*. Thèse, Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 97 p.
- García-Mayordomo, J y Martínez-Díaz, J.J. 2006. Caracterización sísmica del Anticlinorio del Bajo Segura (Alicante): Fallas del Bajo Segura, Torrevieja y San Miguel de Salinas. *Geogaceta*, 40, 19-22.
- GEODE. 2009. Plan GEODE de cartografía geológica continua. IGME.
- GESSAL. 2008. Interpretación de la información geológica y geofísica del subsuelo en las hojas nº 891, 910 y su entorno. Comunidad de Murcia.
- GESSAL. 2005. Estudio de la información geológica y geofísica del subsuelo (sísmica de reflexión y sondeos) en el sector SO de la provincia de Murcia.
- Goldberg, P. 2001. CO<sub>2</sub> Mineral Sequestration Studies. Introduction, Issues and Plans. Workshop on CO<sub>2</sub> Sequestration with Minerals. National Energy Technology Laboratory.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. 2002. *Ingeniería geológica*. Prentice Hall. Pearson Educación, S.A. Madrid, 715 p.
- Goy, J.L., Zazo, C., Somoza, L. y Dabrio, C.J. 1990. Evolución paleogeográfica de la depresión de Elche - Cuenca del Bajo Segura (España) durante el pleistoceno. *Estudios geológicos*, Vol. 46, 237-244.

Hendricks, C.A. and Blok, K. 1993. ``Underground storage of carbon dioxide``. *Energy Conversion and Management*, 34, 949-957.

Hispanoil-Auxini. 1974. Plan de exploración de España. Síntesis Mediterráneo suroriental.

Holtz, M.H. Nance, P.K and Finley, R.J. 1999. Final Report. Reduction of greenhouse gas emissions through underground CO<sub>2</sub> sequestration in Texas oil and gas reservoirs.

Holloway, S. and Savage, D. 1993. ``The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK``. *Energy Conversion and Management*, 34, 925-932.

Holloway, S. 1996. The underground disposal of carbon dioxide. Final report of JOULE II.

Holloway, S., Chadwick, A., Lindeberg, E., Czernichowski-Lauriol, I. and Arts, R. 2002. Best Practice Manual from SACS - Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage Project, 53 p.

Holloway, S. 2007. Carbon Dioxide capture and geological storage. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 365, 1095-1107.

Hovorka, S.D., Doughty, C y Holtz. 2004. Testing efficient of storage in the subsurface: Frio Brine Pilot Experiment. 7ª Conferencia Internacional de Tecnologías de control de gases invernadero.

Hovorka, S. 2005. Update on the Frio Brine Pilot Experiment. Texas Gulf Coast. Bureau of Economic Geology.

Hovorka, S. 2006. ``Frio Brine storage experiment. Lessons Learned`` International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT8).

Hurtado, A. 2010. *Metodología para la estimación regional de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en formaciones permeables profundas y sus incertidumbres*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, 404 p.

IEA. 2008. Geologic storage of carbon dioxide. Staying safely underground. Greenhouse Gas R&D programme.

IGME. 1987. Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la Geología de España, 465 p. ISBN: 84-7474-398-2.

IGME. 1998. Mapa Neotectónico y Sismotectónico de España a escala 1:1.000.000.

- IGME. 2005. Estudio preliminar del almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> para la central GICC de ELCOGAS (ALCO<sub>2</sub>) de Puertollano. Programa Nacional de Energía.
- IGME. 2009. Estudio preliminar de las formaciones favorables para el almacenamiento subterráneo de CO<sub>2</sub> en España. Resultados del análisis de la información geológica y petrolera. ISSN: 1135-9420 NIPO: 471-09-043-8.
- IGME. 2010. Selección y caracterización de áreas y estructuras favorables para almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España. Volumen VI-1. Cadenas Béticas y Cuenca del Guadalquivir-Geología.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (TIE). Cambridge University Press, UK, 1000 p.
- IPCC. 2007. "Climate Change 2007: Synthesis Report." (AR4). Cambridge University Press, UK, 76 p.
- IPCC. 2007. "Climate Change 2007: The Physical Science Basis". Cambridge University Press, UK.
- IPCC. 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 431 p.
- ITGE. 1982. Investigación de pizarras bituminosas en el sureste de la península (Almería, Granada, Murcia y Alicante). Ministerio de Industria y energía. Comisaria de la Energía y Recursos Minerales.
- ITGE. 1992. Estudio de las posibilidades de utilización de estructuras geológicas profundas para la eliminación de residuos industriales y urbanos. Provincia de Alicante. Ministerio de Industria y Energía.
- ITGE-ENAGAS. 1995a. Almacenamiento subterráneo de gas. Previabilidad en formaciones detríticas y salinas. Hojas nº 72 y 73. Elche-Alicante. Resultados del análisis de la información geológica, hidrogeológica, minera y geofísica.

ITGE-ENAGAS. 1995b. Almacenamiento subterráneo de gas. Previabilidad en formaciones detríticas y salinas. Hoja nº 79. Murcia. Resultados del análisis de la información geológica, hidrogeológica y geofísica gravimétrica y eléctrica.

ITGE-ENAGAS. 1995c. Almacenamiento subterráneo de gas. Previabilidad en formaciones detríticas y salinas. Cuencas neógenas litorales correspondientes a las hojas E1:200.000 de Elche y Murcia. (Cuencas de Murcia –Campo de Cartagena –Campo de Elche). Resultados del análisis de la información petrolera.

ITGE-ENAGAS. 1995d. Almacenamiento subterráneo de gas. Previabilidad en formaciones detríticas y salinas. Hoja nº 72. Elche. Resultados del análisis de la información petrolera.

Kaldi, J.G. y Gibson-Poole, C.M. 2008. Storage Capacity Estimation. Site Selection and Characterisation for CO<sub>2</sub> Storage Projects, CO2CRC Report nº: RPT08-1001. CO2CRC.

Lancis, C., Flores, J.A., Sierro, F., Estevez, A. 2004. Reconstrucción ambiental mediante el empleo de técnicas de análisis factorial sobre nanofósiles calcáreos de la cuenca neógena de San Miguel-Torremendo (Cordillera Bética Oriental). *Geotemas*, 7, 263-268.

Lucia, F.J. 2007. Carbonate Reservoir Characterization. An Integrated Approach. Springer (2nd Ed). ISBN: 978-3-540-72740-8.

Martín, A. 1987. *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 1171 p.

Martínez, J.L. y Querol, R. 1990. Documentos sobre la geología del subsuelo de España. Tomo II Béticas, Granada, Guadix-Baza, Murcia-Almería, Alborán. ITGE.

Martínez-Val, J.M. 2008. *El futuro del carbón en la política energética española*. Fundación para estudios sobre la energía. Madrid, 256 p.

Martínez, W., Núñez, A., Colodrón, I., Cabañas, I. y Uralde, M.A. 1977. Mapa y memoria explicativa de la hoja de Torreveja (935) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME

Martínez, W. 1996. *Secuencias de depósito y estructuración diapírica en el mesozoico y neógeno del prebético y golfo de Valencia desde sondeos y líneas sísmicas*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 206 p.

- Martínez, W., Klimowitz, J. y Hernández, E. 2006. El despegue extensional mioceno de la zona de falla de Alhama de Murcia. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (3), 363-377. ISSN: 0366-0176.
- McCabe, P.J. 1998, Energy resources-Cornucopia or empty barrel?. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 82, 11, 2110–2134.
- Meijninger, B. 2006. *Late-orogenic extension and strike-slip deformation in the Neogene of southeastern Spain*. Universiteit Utrecht, 179 p.
- Mejías, M, Grima, J., Gómez, J.A. y Martínez- Navarrete, C. 1998. Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad. Ensayos de calibración. *X Congreso Internacional de Minería y Metalúrgica*, Valencia, 1, 199-218.
- Mejías, M. y López-Geta, J. A. 2003. Instrumentation and methodology for the hydraulic characterization of fractured rocks. *International Conference on groundwater in fractured rocks*. Praga, IHP-VI, series on groundwater, 7, 275-276.
- Mejías, M., Fernandez, C. y Marina, M. 2007. Utilidad de las formaciones de baja permeabilidad. Aplicación y caracterización. *Tierra y Tecnología*, 31, 27-38.
- Melgarejo, J.C. 1997. *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada*. Edicions de la Universitat de Barcelona. ISBN: 84-89829-24-1
- Melzer, J. 1997. *Oilfield Spanish = Castellano para el campo petrolífero : thousands of words and terms: a vocabulary of walk-around rig-Spanish*. Oakbowery, Books, 305 p.
- Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S. and Aiken, T. 2010. Geological storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers. A review of the experience from existing storage operations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 259 p.
- Montenat, C., Azema, J., Devries, A., Durand Delga, M., Enay, R., Hottinger, L., Magne, J., Mouter, R., Polsak, A., Sigal, J. y Sonay, J. 1975. Mapa y memoria explicativa de la hoja de Fortuna (892) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME.
- Montenat, C. 1977. *Les bassins néogènes et quaternaires du Levant d'Alicante à Murcie (Cordillères Bétiques orientales, Espagne)*. *Stratigraphie, paléontologie et évolution dynamique*. Docum. Lab.Géol.Fac.Sci.Lyon. 69, 345 p.

Montenat, C., Ott d'Estevou, P. y Coppier, G. 1990. Eastern Betic neogene basins - a review. *Doc.et Trav. IGAL*, 12-13, 9-15.

Montenat, C., Ott d'Estevou, P. y Coppier, G. 1990a. Les basins néogènes entre Alicante et Cartagena (Espagne). *Doc. et Trav. IGAL*, 12-13, 313-368.

Morrison, H., Schwander, M. and Bradshaw, J. 2008. A vision of a CCS business- the ZeroGen experience. *Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9)*. Washington DC, USA, Volumen 1, 1751-1758.

NOAA. Nacional Oceanic and Atmospheric Administration. <http://noaa.gov/>.

O'Connor, W.K. 2001. Carbon Dioxide Sequestration. Albany Research Center .Office of Fossil Energy, US DOE.

Obdam, A. 2006. Aquifer storage capacity of CO<sub>2</sub>. TNO-Built Environment & Geosciences. GHGT-8.

Oldenburg, C.M., Pruess, K. and Benson, S.M. 2001. Process modeling of CO<sub>2</sub> injection into natural gas reservoirs for carbon sequestration and enhanced gas recovery. *EnergyFuels*, 15(2), 293–298. DOI: 10.1021/ef000247h

OMM. 2011. Organización Meteorológica Mundial. Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2010. N° 1074. ISBN 978-92-63-31074-3.

Perea, H., Gracia, E., Bartolomé, R., Lo Lacono, C. and Masana, E. 2010. Structure and potencial seismogenic sources of the offshore Bajo Segura fault zona, SE Iberian peninsula (Mediterranean sea). Looking for the source of the 1829 Torre Vieja earthquake. *Primera Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología*.

Pichler, H. and Schmitt-Riegraf, C. 1997. *Rock-forming Minerals in Thin Section*. Chapman & Hall. London. 220 p. ISBN: 0412644606.

Perkins, D., Henke, K.R. 2002. *Minerales en Lámina Delgada*. Pearson Educación. Madrid, 139 p. ISBN: 84-205-3552-4.

Pignatelli, R., Espejo, J.A. y Crespo, A. 1973. Mapa y memoria explicativa de la hoja de Elche (893) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME.

- Pignatelli, R., Espejo, J.A. y Crespo, A. 1973. Mapa y memoria explicativa de la hoja de Cabo de Santa Pola (894) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME
- Prado, A.J., Campos, R., Ruiz, C., Pelayo, M., Recreo, F., Lomba, L., Hurtado, A., Eguilior, S., Pérez del Villar, L. 2009. Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Selección de formaciones favorables. Comunicación técnica. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Madrid. CIEMAT, 28 p.
- Preston, C., Wittaker, S., Rostron, B., Chalaturnyk, R., White ,D., Hawkes,C., Johnson, J.W., Wilkinson, A. and Sacuta, N. 2009. IEA GHG Weyburn-Midale CO<sub>2</sub> monitoring and storage project- moving forward with the final phase. Energy Procedia, Elsevier, 1743-1750. ISSN: 18766102.
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Legarth, B., Hennings, J., Schütt, H., Schmidt-Hattenberger, C., Norden, N., Förster, A. and Hurter, S. 2008. The CO<sub>2</sub>SINK boreholes for geological CO<sub>2</sub>-storage testing. GHGT-9
- Prichard, L.W. 2006. The Norwegian Barents Sea: Historical Overview and Future Perspectives. PESGB (Petroleum Exploration Society of Great Britain).
- Reyes, M. 2009. *Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Selección previa de acuíferos salinos en la península Ibérica.* Tesis de Máster. Universidad de Granada, 113 p.
- Rider, M.H. 1986. The Geological Interpretation of well logs. John Wiley & Sons, Inc.,New York, 175 p. ; Revised ed., 1991: Caithness, Whittles Publishing, 175 p.
- RITE. Research Institute of Innovative Technology for the Earth. Website: <http://www.rite.or.jp/English/lab/geological/geological.html>.
- Ruiz, C., Prado, A. J., Campos, R., Hurtado, A., Pelayo, M., Prado, P. de la Losa, Martínez, A., Ortiz, G., Sastre, J., Pérez del Villar, L., Eguilior, S., Lomba L. y Recreo, F. 2008. Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Criterios de selección de emplazamientos. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).Madrid. CIEMAT.
- Sáez Martínez, P., Tent-Manclús, J.P., Jáuregui, P.J., Estévez, A., Benabdeloued, N.Y.N. y Soler, J.L. 2008. Aplicación de la sísmica de reflexión de alta resolución en el cabo de Santa Pola (Alicante). *Geo-Temas*. Vol.10.

- Sanz de Galdeano, C. 1990. Geologic evolution of the Betic Cordilleras in the Western Mediterranean, Miocene to the present. *Tectonophysics*, 172, 107-119.
- Sanz de Galdeano, C. y Vera, J.A. 1991. Una propuesta de clasificación de las cuencas neógenas béticas. *Acta Geológica Hispánica*. vol. 26. 3 - 4, 205-227.
- Sanz de Galdeano, C. y Vera, J.A. 1992. Stratigraphic record and paleogeographical context of the Neogene basins in the Betic Cordillera, Spain. *Basin Research*, 4:21-36.
- Sanz de Galdeano, C., Galindo, J., Alfaro, P. y Ruano, P. 2007. El relieve de la Cordillera Bética. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 185-195. I.S.S.N.:1132-9157.
- Sanz de Galdeano, C. 2008. The Cadiz-Alicante Fault: an important discontinuity in the Betic Cordillera. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 21 (3-4): 49-58.
- Schlumberger. *Interpretación de perfiles. Volumen 1. Fundamentos*. Schlumberger Limited. New York. 155 p.
- Schlumberger. 2009. *Log Interpretation charts*. Schlumberger, 293 p.
- Schlumberger, 1991. *Log Interpretation Charts*. Schlumberger, 172 p.
- Schlumberger.1989. *Log Interpretation Principles/ Applications*. Schlumberger Educational Services.
- Schlumberger.1985. *Sedimentary Enviroments from Wireline Logs*. Schlumberger Educational Services.
- Sharma, S.; Cook, P. 2007. Australia's First Geosequestration Demonstration - The CO2CRC Otway Basin Pilot Project. 6th Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration.
- Shine, K., Fuglestedt, J., Hailemariam, K. And Stuber, N. 2003. Alternative to the Global Warming. Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases.
- Solomon, S. 2007. Carbon dioxide storage: geological security and environmental issues-case study on Sleipner gas field in Norway. Bellona.
- Somoza, L. 1989. *El Cuaternario litoral entre Cabo de Palos y Guardamar del Segura (Murcia-Alicante). Evolución geodinámica en relación con las variaciones del nivel del mar*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 352 p.

- Soria, J.M., Alfaro, P., Fernández, J. y Viseras, C. 2001. Quantitative subsidence-uplift analysis of the Bajo Segura Basin (eastern Betic Cordillera, Spain): tectonic control on the stratigraphic architecture. *Sedimentary Geology* 140, 271-289.
- Soria, J.M., Yébenes, A. y Caracuel, J.E. 2002. La sección Messiniense-Plioceno de Crevillente (Cordillera Bética oriental): expresión de la crisis de salinidad del Mediterráneo. *Geogaceta*, 31, 167-170.
- Soria, J.M., Caracuel, J.E., Yébenes, A., Fernández, J. y Viseras, C. 2005. The stratigraphic record of the Messinian salinity crisis in the northern margin of the Bajo Segura Basin (SE Spain). *Sedimentary Geology* 179. 225-247.
- Soria, J.M., Caracuel, J., Corbí, H., Dinarès-Turel, J., Lancis, C., Tent-Manclús, J. y Yébenes, A. 2007a. Estratigrafía y biomagnetoestratigrafía del Messiniense en la sección del Garruchal (Cuenca del Bajo Segura). Implicaciones para la crisis de salinidad del Mediterráneo. *Geogaceta*, 41.
- Soria, J.M., Caracuel, J.E., Corbí, H. y Yébenes, A. 2007b. La sedimentación de afinidad Lago Mare (Messiniense) y latransgresión del Plioceno en Alicante (Cuenca del Bajo Segura) *Geogaceta*, 41.
- Soria, J.M., Caracuel, J., Corbí, H., Dinarès-Turel, J., Lancis, C., Tent-Manclús, J.E. y Yébenes, A. 2008a. The Bajo Segura Basin (SE Spain): Implications for the Messinian salinity crisis in the Mediterranean margins. *Stratigraphy*, 5 (3-4): 257-263.
- Soria, J.M., Caracuel, J., Corbí, H., Dinarès-Turel, J., Lancis, C., Tent-Manclús, J.E., Viseras, C., Yébenes, A. 2008b. The Messinian-early Pliocene stratigraphic record in the southern Bajo Segura Basin (Betic Cordillera, Spain): Implications for the Mediterranean salinity crisis. *Sedimentary Geology*. 203, 267-288.
- Stern, N. 2006. Informe sobre la economía del cambio climático (Stern Review on the Economics of Climate Change). Cambridge University Press, 575 p.
- Svensmark, H. and N. Calder. 2007. The Chilling Stars: A New Theory of Climate Change. Cambridge, England. Icon Books Limited.
- Svensmark, H. 2007. Cosmoclimatology: A New Theory Emerges. *Astronomy & Geophysics*, 48.

- Tent-Manclús, J.E. 2003. *Estructura y estratigrafía de las Sierras de Crevillente, Abanilla y Algayat: su relación con la Falla de Crevillente*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 970 p.
- Vera, J.A. 2000. El Terciario de la Cordillera Bética: estado actual de conocimientos. *Rev.Soc.Geol.España*, 13 (2): 345-373.
- Vera, J.A. (ed.). 2004. *Geología de España*. SGE-IGME. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, 884 p. Madrid. ISBN 84-7840-546-1.
- Van der Burgt, M.J. 1992: Carbon dioxide disposal from coal-based IGCC's in depleted gas fields. *Energy Conversion and Management*, 33(5-8), 603-61.
- Van der Meer, L.G.H., Kreft E., Geel C.R., D'Hoore D., Hartman J. 2006. "CO<sub>2</sub> storage and testing enhanced gas recovery in the K12-B reservoir".
- Van der Meer, L.G.H., Kreft E., Geel C.R., D'Hoore D., Hartman J. 2006. "Enhanced gas recovery testing in the K12-B reservoir by CO<sub>2</sub> injection, a reservoir engineering study".
- Vangkilde-Pedersen, T. 2008. Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide- the EU GeoCapacity Project. GHGT-9.
- Zapatero, M.A., Suárez, I., Arenillas, A., Marina, M., Nita, C. y Martínez, R. 2009. Proyecto Europeo Geocapacity. Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. Grupo de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. IGME, 157 p.

### **Direcciones URL**

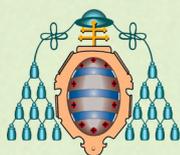
- The global Carbon Project: [www.globalcarbonproject.org/](http://www.globalcarbonproject.org/)
- IEA (International Energy Agency): [www.iea.org/](http://www.iea.org/)
- CO2CRC (Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies): [www.co2crc.com.au/](http://www.co2crc.com.au/)
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme: [www.ieagreen.org.uk/](http://www.ieagreen.org.uk/)
- NETL (National Energy Technology laboratory): [www.netl.doe.gov/](http://www.netl.doe.gov/)
- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum): [www.cslforum.org/](http://www.cslforum.org/)
- NATCARB (National Carbon Explorer): [www.natcarb.org/](http://www.natcarb.org/)

-RMOTC (Rocky Mountain Oilfield Testing Center):[www.rmotc.doe.gov/](http://www.rmotc.doe.gov/)

-Bureau of Economic Geologic. [www.beg.utexas.edu/index.php](http://www.beg.utexas.edu/index.php)

-USDOE (Department of Energy of U.S.) Departamento de Energía de los Estados Unidos. [www.energy.gov](http://www.energy.gov)

-GeoCapacity Project. [www.geology.cz/geocapacity](http://www.geology.cz/geocapacity)



UNIVERSIDAD DE OVIEDO



Instituto Geológico  
y Minero de España