

Estudio Preliminar de las Formaciones
Favorables para el Almacenamiento
Subterráneo de CO₂ en España.
Resultados del Análisis de la
Información Geológica y
Petrolera

AUTORES IGME

M. A. Zapatero
J. L. Reyes
R. Martínez
I. Suárez
A. Arenillas
M. A. Perucha

EDITORES CIEMAT

F. Recreo
L. Pérez del Villar

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesauro del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Catálogo general de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>

Depósito Legal: M -14226-1995

ISSN: 1135 - 9420

NIPO: 471-09-043-8

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S54

S58

CARBON DIOXIDE; CARBON SEQUESTRATION; GREENHOUSE GASES;
UNDERGROUND DISPOSAL; SITE SELECTION; SEDIMENTARY BASINS; SPAIN;
GEOLOGIC DEPOSITS

Estudio Preliminar de las Formaciones Favorables para el Almacenamiento Subterráneo de CO₂ en España

Zapatero, M. A.; Reyes, J. L.; Martínez, R.; Suárez, I.; Arenillas, A.; Perucha, M. A.

135 pp. 27 fig. 17 ref.

Resumen:

Este informe es una síntesis de las posibilidades que tiene el subsuelo español de la Península Ibérica para almacenar CO₂. Se ha llevado a cabo una labor de recopilación y análisis de información geológica de superficie y del subsuelo con el objetivo final de hacer una preselección de posibles unidades favorables para almacenar el CO₂, teniendo en cuenta que cada uno de estos posibles almacenes ha de tener una formación confinante que haga de sello. Se realiza previamente a la selección de almacenes una descripción geológica general de las grandes unidades geológicas que configuran el relieve actual de la Península Ibérica. Posteriormente, para cada una de ellas se analizan los sondeos petrolíferos existentes y se resaltan a continuación las unidades, formaciones y tramos de interés, para obtener finalmente una descripción de las unidades preseleccionadas con posibilidades de almacenar CO₂.

Preliminary Study of Favourable Formations for CO₂ Subsurface Storage in Spain

Zapatero, M. A.; Reyes, J. L.; Martínez, R.; Suárez, I.; Arenillas, A.; Perucha, M. A.

135 pp. 27 fig. 17 ref.

Abstract:

This report is a synthesis of the possibilities of CO₂ storage in the Spanish subsurface. Compilation and analysis of geological information has been carried out, looking at surface and subsurface, in order to make a pre - selection of potential favourable units for CO₂ storage, taking in account that each of this storages needs a confining formation to seal the storage. Before the storage selection, a general description of the great geological units of the Iberian Peninsula is done. Afterwards, borehole logging from petroleum exploration is analysed in these units, formations and areas of interest. The aim is to finally obtain a description of selected units and their possibilities of CO₂ storage.

EQUIPO DE TRABAJO

El presente informe ha sido realizado durante los años 2006 y 2007 por un equipo dirigido por el Dr. Miguel Ángel Zapatero Rodríguez, Coordinador General de Proyectos de Almacenamiento Geológico de CO₂. Las tareas de elaboración han sido realizadas por los siguientes equipos de trabajo:

- Recopilación, análisis y estudio de la información: Roberto Martínez, Isabel Suárez y Alicia Arenillas.
- Redacción del informe: José Luis Reyes, Isabel Suárez, Roberto Martínez y Alicia Arenillas.
- Edición y maquetación: María Ángeles Perucha, Roberto Martínez, Isabel Suárez y Alicia Arenillas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado por el Grupo de Almacenamiento Geológico de CO₂ del Instituto Geológico y Minero de España, dentro del marco del Acuerdo Específico de Colaboración entre el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para el Almacenamiento Geológico de CO₂ y otros gases de efecto invernadero” de fecha 25 de Abril de 2005, y en el Proyecto Singular Estratégico “Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂” PSE-120000-2005-2, desde su aprobación por el Ministerio de Educación y Ciencia el 26 de Julio de 2006.

El presente Informe corresponde a la Actividad 2 de la Fase Previa del Acuerdo Específico entre CIEMAT e IGME, en cuyo Anexo I “Estudios a realizar” se especificaban las siguientes actividades:

1. Formulación de los Criterios generales de favorabilidad, a realizar conjuntamente por CIEMAT e IGME
2. Inventario de Áreas potencialmente favorables en el territorio nacional, a realizar por el IGME
3. Estudio de Análogos Naturales de Almacenes de CO₂ y seguimiento de Proyectos Internacionales en curso en la UE y EE.UU., a realizar por CIEMAT
4. Inventario de las principales fuentes emisoras de CO₂ en territorio nacional y creación de un Sistema de Información Geográfica, a realizar por CIEMAT e IGME.

Los autores agradecen al CIEMAT la edición de este trabajo, muy especialmente a D. Fernando Recreo y al Dr. Luis Pérez del Villar.



ÍNDICE

1. Introducción	7
2. El Macizo Ibérico	9
2.1. Marco geológico general	9
2.2. Sondeos petrolíferos	15
2.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	16
2.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en el Macizo Ibérico	21
3. Cordillera Bética	29
3.1. Marco geológico general	29
3.2. Sondeos petrolíferos	32
3.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	34
3.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en la Cordillera Bética	38
4. Cordillera Pirenaica	43
4.1. Marco geológico general	43
4.2. Sondeos petrolíferos	49
4.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	56
4.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en la Cordillera Pirenaica	60
5. Cordilleras Ibérica y Costero Catalana	71
5.1. Marco geológico general	71
5.2. Sondeos petrolíferos	73
5.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	77
5.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en las Cordilleras Ibérica y Costero Catalana	81
6. Cuenca del Guadalquivir	89
6.1. Marco geológico general	89
6.2. Sondeos petrolíferos	90
6.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	96
6.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en la Cuenca del Guadalquivir	97
7. Cuenca del Tajo	99
7.1. Marco geológico general	99
7.2. Sondeos petrolíferos	102
7.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	104

7.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en la Cuenca del Tajo	105
8. Cuenca del Ebro	107
8.1. Marco geológico general	107
8.2. Sondeos petrolíferos	109
8.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	118
8.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en la Cuenca del Ebro	121
9. Cuenca del Duero	127
9.1. Marco geológico general	127
9.2. Sondeos petrolíferos	129
9.3. Unidades, formaciones y tramos de interés	131
9.4. Unidades preseleccionadas como posible almacén de CO ₂ en la Cuenca del Duero	132
10. Referencias bibliográficas	135

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de 150 años, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) viene siendo un referente fundamental en el desarrollo del conocimiento de la geología de España y sus recursos naturales. Durante este tiempo, como en muchos otros campos del conocimiento humano, las técnicas, los medios, los criterios e incluso los objetivos de la investigación han evolucionado enormemente, y esa evolución se ha dejado notar en los medios humanos, documentales e instrumentales del Instituto.

En las últimas décadas, las nuevas tecnologías han permitido que el conocimiento de la geología del subsuelo haya crecido exponencialmente. Paralelamente, las crecientes necesidades de conseguir suministros seguros de materias primas minerales han dado lugar al desarrollo de técnicas de exploración de la geología profunda, en especial con el objetivo de encontrar yacimientos de recursos energéticos, tales como petróleo o gas, o almacenamientos estratégicos que aseguren la continuidad del suministro a los grandes centros de consumo.

El conocimiento derivado de estas exploraciones se considera fundamental a la hora de iniciar cualquier investigación relacionada con el subsuelo, especialmente en cuencas sedimentarias y cuando las profundidades de los objetivos de la investigación sean mayores que las habituales en aprovechamiento de aguas subterráneas u otros recursos mineros. Por esta razón, al iniciar el IGME su investigación de almacenes geológicos para CO₂, se fijó dos objetivos fundamentales:

- Señalar los criterios, parámetros y condicionantes fundamentales de búsqueda de almacenes geológicos de CO₂.
- Realizar una recopilación lo más completa posible de la información disponible, sobre los parámetros descritos, procedente de la exploración de hidrocarburos en España.

El primero de estos objetivos se plasmó en la publicación titulada “*Almacenamiento Geológico de CO₂. Criterios de selección de emplazamientos*”, realizada conjuntamente por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas y el Instituto Geológico y Minero de España en 2006.

El presente estudio se corresponde con la necesidad de cubrir el segundo de estos objetivos, intentando identificar las formaciones geológicas con mayor potencial de almacenamiento de CO₂ a través del conocimiento geofísico y de sondeos aportado por la exploración de petróleo y gas en España.

La selección previa de posibles almacenes geológicos de CO₂ en la Península Ibérica se ha realizado tomando como base el libro “*Geología de España*”, publicado en el año 2004 por la *Sociedad Geológica de España* (SGE) y por el *Instituto Geológico y Minero de España* (IGME).

Se ha atendido principalmente a la opción más probable de encontrar y definir en el subsuelo español peninsular las formaciones, tramos o niveles profundos permeables con agua salada.

La idoneidad previa de esos conjuntos ha sido establecida con el estudio, análisis y síntesis de la publicación “*Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España*” (IGME, 1987).

Al final del presente documento se adjunta un mapa en el cual se ha dividido el territorio peninsular (y sectores de la plataforma marina circundante) en una serie de zonas con características diferentes desde el punto de vista de la posible ubicación de almacenes subterráneos de CO₂. En función del tipo de información disponible en cada una de dichas zonas se ha establecido una diferenciación en:

- Zonas A: zonas con información de subsuelo obtenida de los registros de sondeos de investigación de hidrocarburos.
- Zonas B: zonas sin información de subsuelo disponible en dichos registros. En algunos casos existen datos de subsuelo, pero no se encuentran en los registros de las publicaciones consultadas.

Para cada una de las zonas diferenciadas se indican los intervalos estratigráficos que se han considerado de posible interés, bien como posible almacén (formaciones permeables) o bien como posible confinante de techo (formaciones impermeables).

En cada zona se enumeran los distintos intervalos litoestratigráficos seleccionados, en orden de profundidad creciente (de más moderno a más antiguo). Así, suele comenzarse por una formación confinante y a continuación una o varias formaciones almacén, a continuación una segunda formación confinante y las respectivas formaciones almacén situadas bajo ella, y así sucesivamente, hasta superar la profundidad máxima considerada para el posible almacenamiento de CO₂ (2.500 m).

Estas unidades han sido deducidas a partir de las columnas litológicas de los sondeos petrolíferos, donde los hay, y por estratigrafía regional. En este trabajo no se han considerado valores cuantitativos de porosidad, permeabilidad y salinidad del agua de la formación. Estos datos son necesarios para evaluar las posibilidades de los distintos almacenes, por lo que es necesario realizar estudios más detallados para cuantificar estos parámetros, ya que determinarán la idoneidad de las diferentes unidades.

Para cada intervalo seleccionado se detalla su litología, su espesor, la profundidad a la que se sitúa su base (en el caso de formaciones confinantes) o su techo (formaciones almacén), su continuidad horizontal (y variaciones de facies o espesor) y algún otro aspecto particular que se haya considerado relevante.

Algunas zonas se han considerado globalmente no aptas para el almacenamiento, en cuyo caso no han sido numeradas ni incluidas en la relación.

El mapa de zonación incluye también información sobre la ubicación de los principales yacimientos de carbón y las masas de rocas ígneas ultrabásicas más importantes.

2. EL MACIZO IBÉRICO

2.1. MARCO GEOLÓGICO GENERAL

El Macizo Ibérico es la unidad geológica que ocupa gran parte de la mitad occidental de la Península Ibérica y que corresponde al afloramiento más occidental del Orógeno Varisco Europeo (figura 2.1). Los materiales que conforman el Macizo Ibérico afloran extensamente en la parte occidental de la Península Ibérica, si bien existen otros afloramientos en el interior de la Cordillera Bética y Pirineos, así como otros menores en la Cordillera Ibérica, Cadenas Costeras Catalanas y en la Isla de Menorca. El Macizo Ibérico está constituido por rocas del Proterozoico al Carbonífero, deformadas y en parte metamorizadas e intruidas por diferentes tipos de granitoides antes del Pérmico.

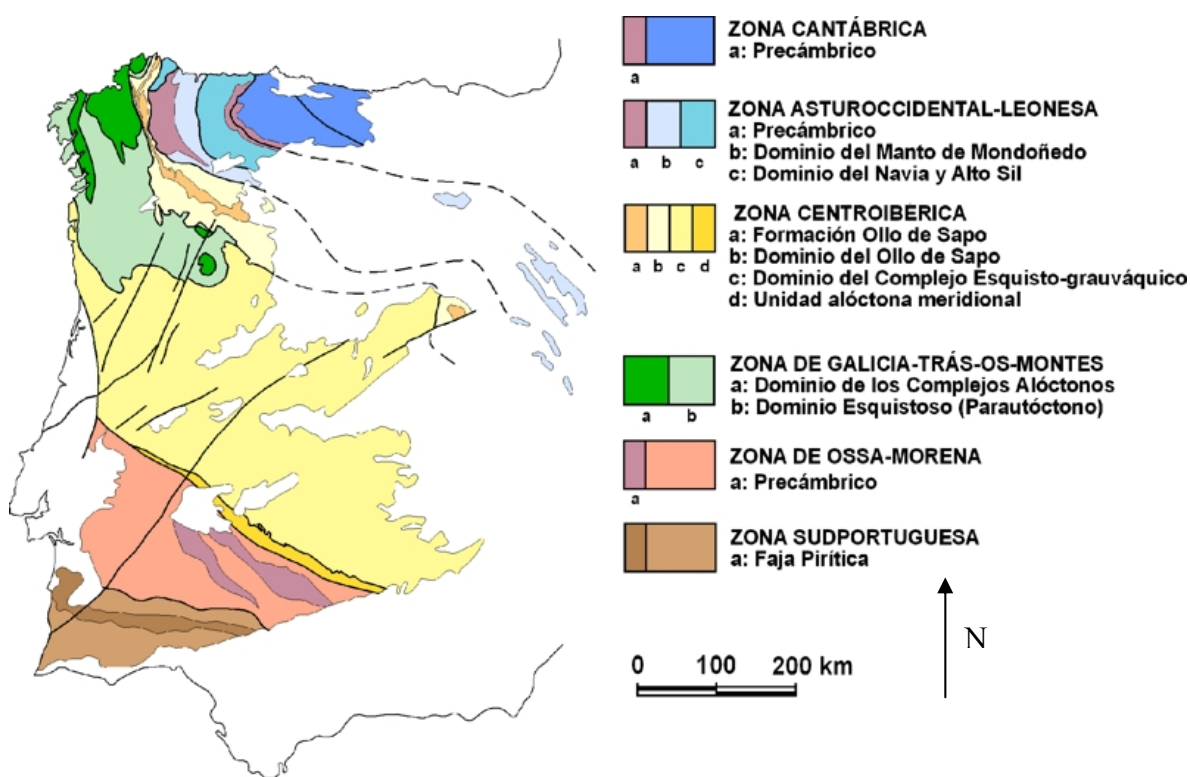


Figura 2.1 Esquema del Macizo Ibérico en el que se indica la posición de la Zona de Cizalla de Badajoz-Córdoba, de la Zona de Galicia-Trás-os-Montes y la subdivisión de la Zona Centroibérica en dos dominios (Pérez-Estaún *et al.*, 2004).

Dentro del Macizo Ibérico se han establecido divisiones en zonas atendiendo a las diferentes características estratigráficas, estructurales, de metamorfismo y de magmatismo existentes. Las zonas diferenciadas, de Norte a Sur, son las denominadas Cantábrica, Asturoccidental – Leonesa, Galicia – Tras – Os – Montes, Centroibérica, Ossa – Morena y Sudportuguesa. A continuación se describen brevemente las mismas, estableciendo sus rasgos geológicos principales.

2.1.1 ZONA CANTÁBRICA

Es la más septentrional y la más externa del Orógeno Varisco por el norte. Está constituida por rocas del Cámbrico al Carbonífero, generalmente sin metamorfismo ni foliaciones tectónicas, pero con abundantes sedimentos sinorogénicos. Presenta una deformación superficial con cabalgamientos y mantos de despegue, y pliegues asociados vergentes hacia el núcleo del Arco Astúrico. Las principales unidades que se distinguen dentro de la Zona Cantábrica se muestran en la figura 2.2.

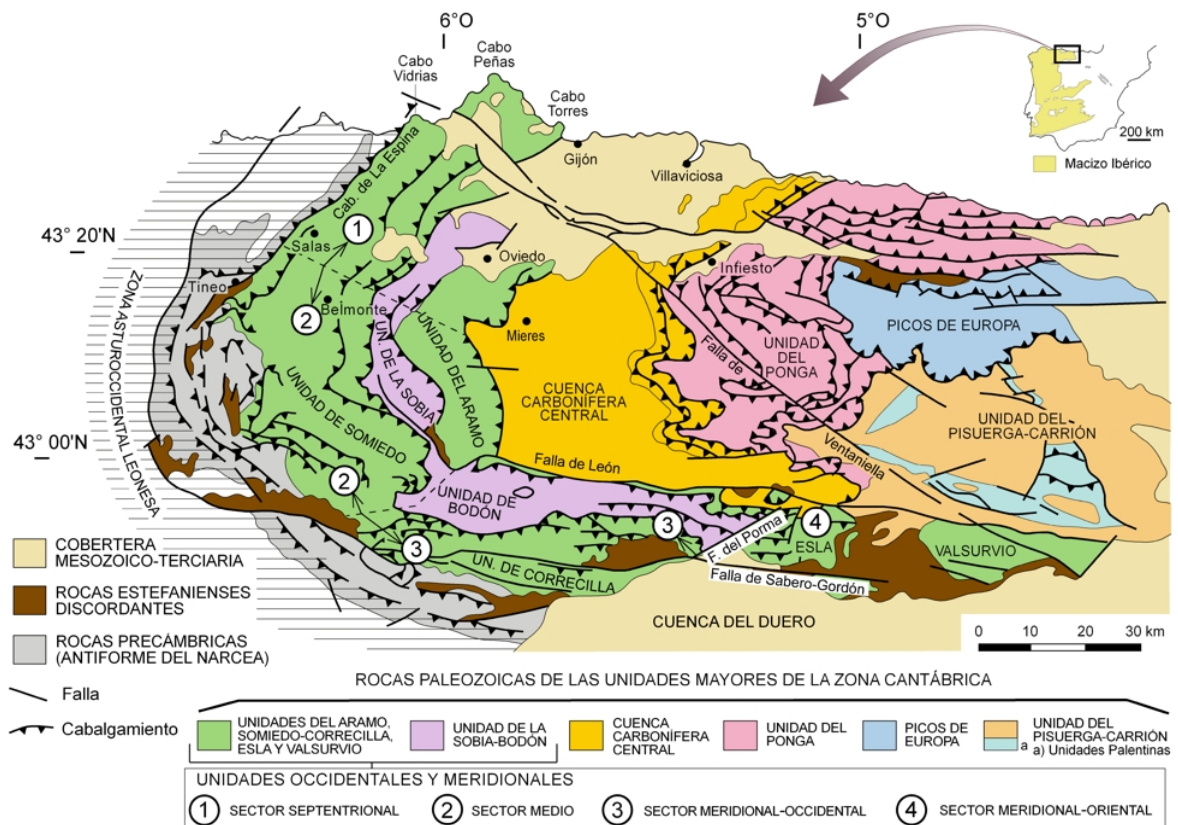


Figura 2.2 Mapa geológico de la Zona Cantábrica mostrando sus principales unidades (Bastida, 2004).

En la figura 2.3 se muestran varios cortes geológicos de la Zona Cantábrica en los que se observa la estructura de distintas unidades de esta Zona.

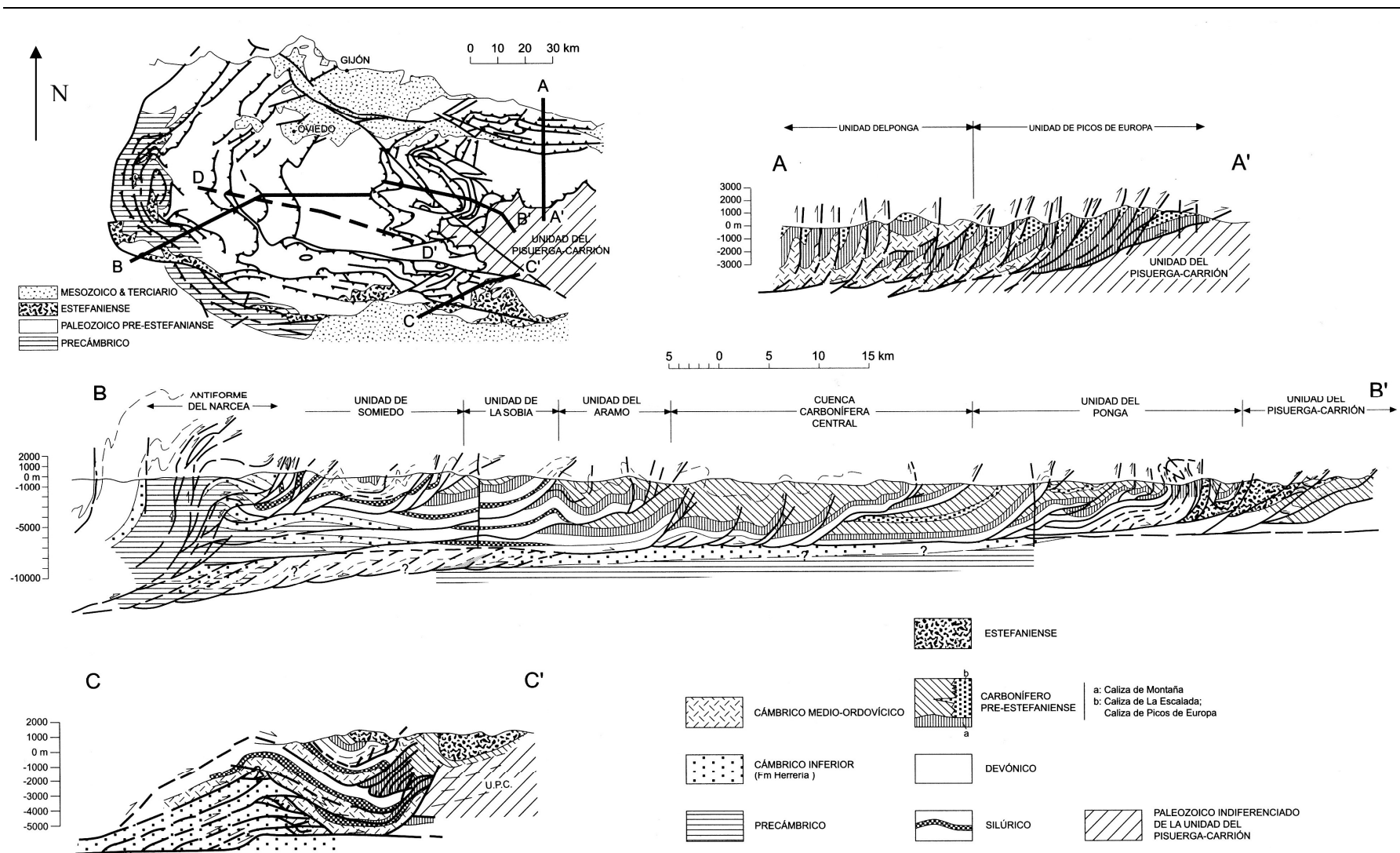


Figura 2.3 Cortes geológicos realizados en diferentes direcciones a través de la Zona Cantábrica; D-D' es el trazado del perfil sísmico ESCICANTÁBRICA-1 (Aller *et al.*, 2004).

ZONA ASTUROCCIDENTAL-LEONESA

Se caracteriza por presentar un gran espesor de materiales del Cámbrico y del Ordovícico. Estos materiales presentan pliegues vergentes al Este que han sido truncados, posteriormente, por cabalgamientos con la misma vergencia y afectados por pliegues con planos axiales verticales. Las rocas posteriores al Devónico se limitan a los rellenos estefanienses de pequeñas cuencas post-variscas. En la figura 2.4 están representados los diferentes dominios de la Zona Asturoccidental-Leonesa.

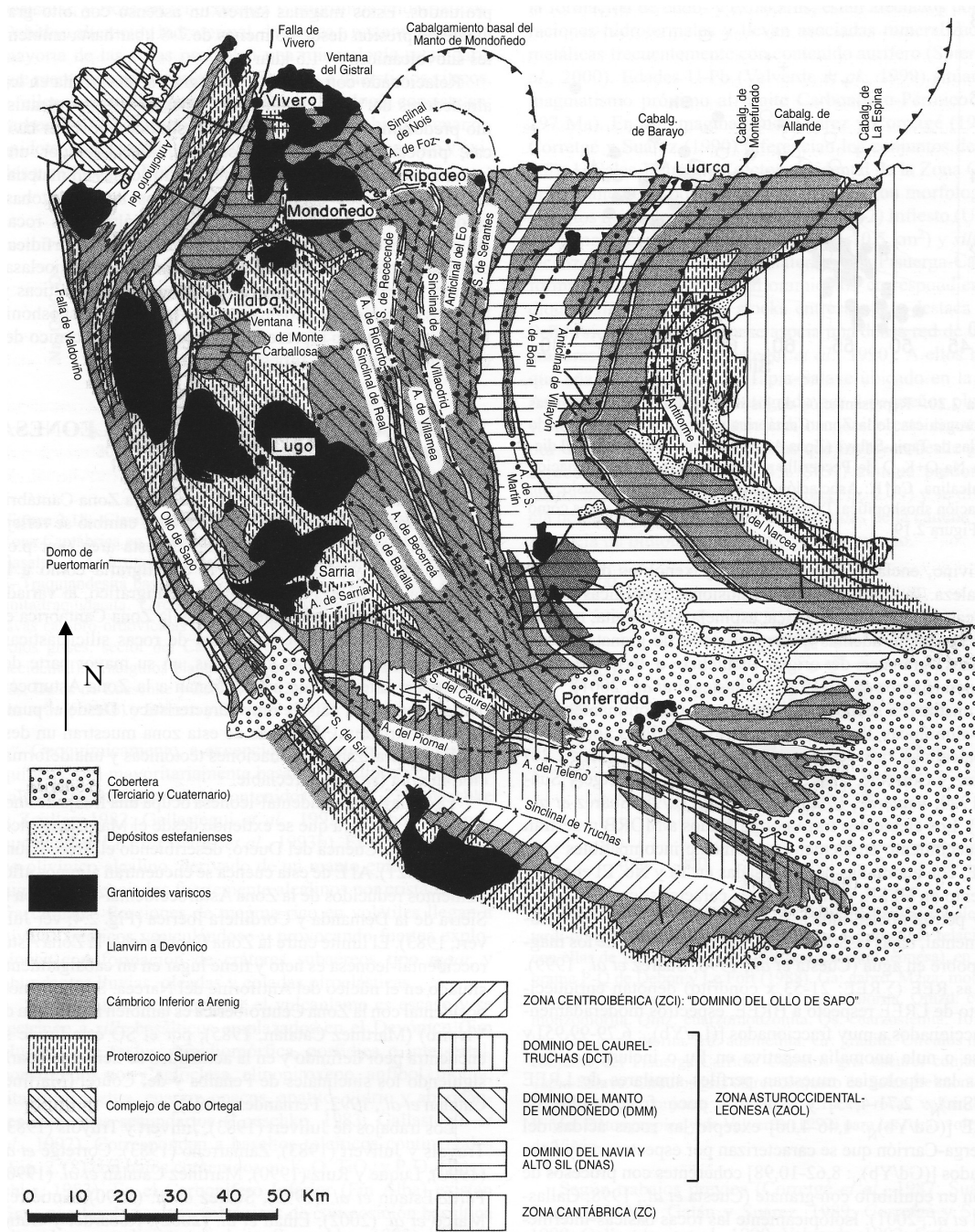


Figura 2.4 Esquema geológico de la Zona Asturoccidental-leonesa, mostrando las denominaciones de las estructuras principales y la subdivisión en dominios. El Dominio del Courel-Truchas se considera formando parte de la Zona Centroibérica (Marcos, 2004).

2.1.3. ZONA CENTROIBÉRICA

Es la que posee una mayor anchura y se caracteriza por presentar un Ordovícico inferior cuarcítico con un marcado carácter transgresivo. Presenta, además, grandes núcleos sinformes a lo largo de toda la zona, así como extensos afloramientos de granitos y granitoides. Dentro de ella se distinguen dos dominios en función de los materiales preordovícicos existentes: el Dominio del Olló de Sapo y el Dominio del Complejo Esquisto-Grauváquico (figura 2.5). El Dominio del Olló de Sapo, localizado en la mitad septentrional, se caracteriza por la presencia de gneises glandulares preordovícicos y, además, por la existencia de granitos sintectónicos, de áreas con metamorfismo regional de alto grado y pliegues acostados vergentes al Este y Noreste. El Dominio del Complejo Esquisto-Grauváquico se localiza en la mitad meridional, presenta pizarras y grauvacas preordovícicas, así como pliegues sin vergencia definida en general, abundantes granitoides postorogénicos y metamorfismo de bajo grado.

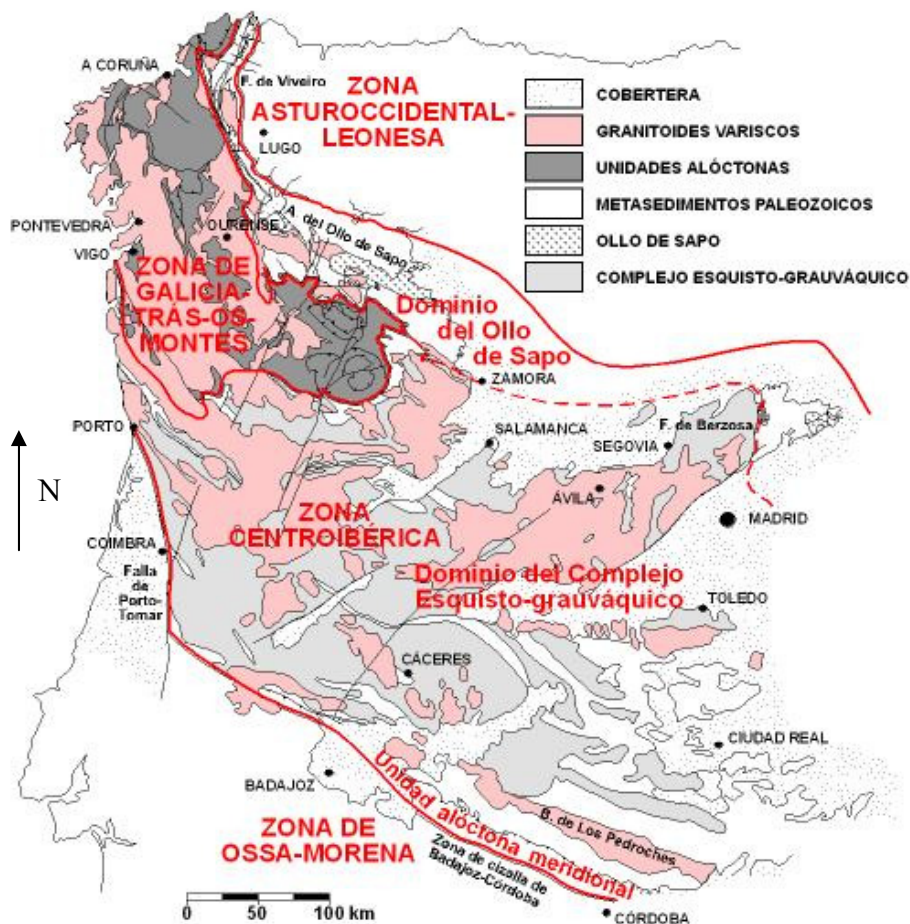


Figura 2.5 Esquema de la Zona Centroibérica y subdivisión en dominios según el criterio estratigráfico de los materiales subyacentes al Ordovícico Inferior. En gris claro se ha representado el Complejo Esquisto-grauváquico, pero se han incluido también ortogneises prevariscos y algunas rocas de alto grado metamórfico de edad desconocida (Martínez Catalán *et al.*, 2004)

2.1.4 ZONA DE GALICIA-TRAS-OS-MONTES

Constituye una lámina alóctona emplazada sobre materiales precámbricos y del Paleozoico inferior de la zona Centroibérica (figura 1.5). Dentro de ella se diferencian dos dominios que corresponden a dos láminas alóctonas superpuestas: el Dominio Esquistoso es el inferior y está formado por metasedimentos con un menor grado de aloctonía; y los Complejos Alóctonos, que corresponden a la lámina superior y están formados por unidades ofiolíticas con un grado de aloctonía mayor.

2.1.5 ZONA DE OSSA-MORENA

Está formada por rocas del Proterozoico superior al Carbonífero, deformadas con pliegues asimétricos o acostados vergentes hacia el Suroeste y metamorizadas en grado variable. En el contacto con las zonas limítrofes se encuentran rocas básicas de afinidad oceánica. La estructura de esta zona se debe a varias fases variscas de deformación con metamorfismo de grado bajo o muy bajo. Existen intrusiones de granitoides en diferentes fases, desde vendienses a carboníferos postorogénicos.

2.1.6 ZONA SUDPORTUGUESA

Es la más meridional y la más externa de la parte sur del orógeno varisco. Presenta foliación, abundante magmatismo y un metamorfismo de muy bajo grado. Está constituida por rocas del Devónico medio al Carbonífero superior, entre las que destacan el Complejo Vulcano Sedimentario, afectadas por pliegues y algún cabalgamiento vergentes al Suroeste (figura 2.6). Localmente y discordantes, aparecen sedimentos del Pérmico.

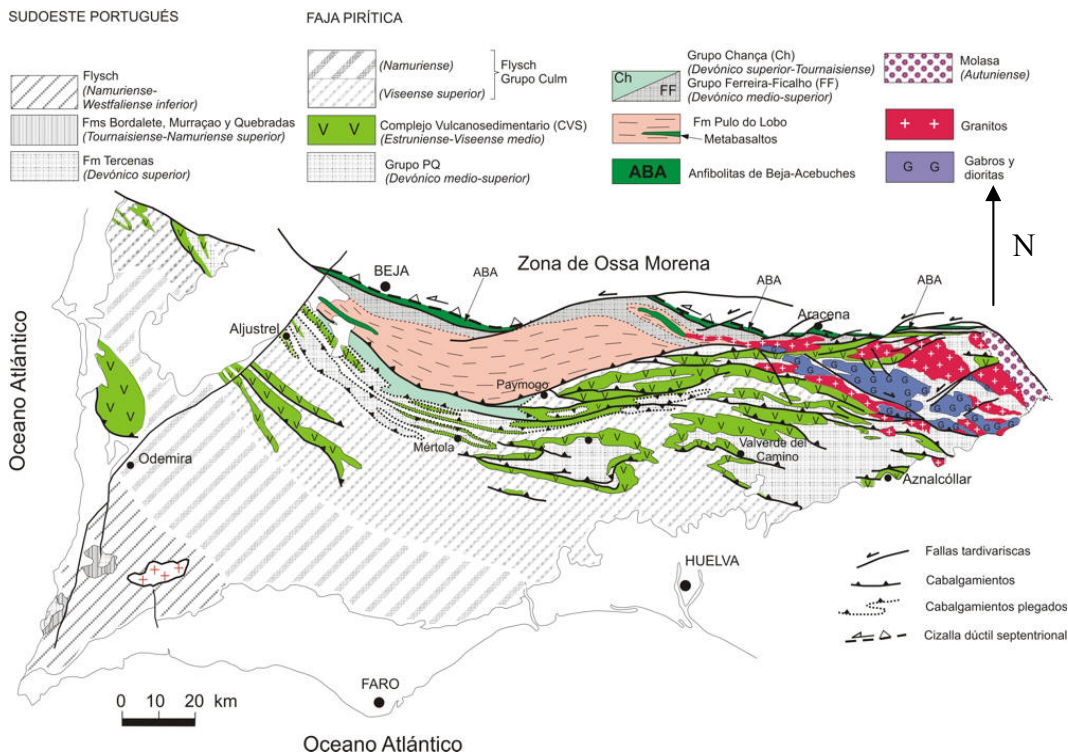


Figura 2.6 Mapa esquemático general de la Zona Sudportuguesa (Simancas, 2004)

2.2 SONDEOS PETROLÍFEROS

En el Macizo Ibérico no existen prácticamente sondeos para la exploración de hidrocarburos, ya que sus materiales no son apropiados para que se den este tipo de yacimientos por su historia geológica, con profundos cambios de presión y temperatura. A excepción del sondeo Caldones-1, todos los sondeos que se detallan a continuación se encuentran ubicados en la plataforma marina, donde los sedimentos mesozoicos y cenozoicos alcanzan espesores importantes.

2.2.1 ZONA CANTÁBRICA

Dentro de la zona Cantábrica no se han realizado sondeos para investigación de petróleo excepto en el retazo de cobertera Mesozoica y Terciaria que aflora y se desarrolla al NE de la ciudad de Oviedo, con límite septentrional el mar Cantábrico. Este sondeo, con el número 230 en la publicación "Contribución de la Explotación Petrolífera al Conocimiento de la Geología en España", fue operado por CIEPSA, comenzando y terminando en 1967:

Caldones-1 (nº 230)

Alcanzó 1.846 m de profundidad. Bajo 330 m de Trías cortó una serie de arcillas y areniscas datadas como Carboníferas. A techo, entre los 500 y casi 650 m, cortó un tramo de calizas de posible interés como potencial almacén geológico en función de su evolución geométrica y tectónica.

Los sondeos más próximos realizados en el mar, frente al afloramiento Mesozoico y Terciario son los numerados: 372, 373, 391, 337, 349, 360 y 476 y más alejados los números 450, 570, 570 bis, 509, 547 y 452.

Mar Cantábrico-1 (nº 372) y Mar Cantábrico-2 (nº 373)

Estos sondeos cortan una serie cretácica hasta los 2.110,5 m, constituida esencialmente por margas, limolitas, arenas y arcillas.

Mar Cantábrico-3 (nº391)

Cortó hasta los 2.305,5 m la serie cretácica de arcillas, limolitas, margas y calizas muy arcillosas con algunos niveles de conglomerados. En la columna del sondeo los primeros 171 metros corresponden a la lámina de agua sobre el emboquillado en el fondo marino.

Mar Cantábrico-C1 (nº 337), Mar Cantábrico - C2 (nº 349), Mar Cantábrico - C3 (nº 360) y Mar Cantábrico - C5 (nº 476)

Estos sondeos cortan una serie del Mioceno-Cretácico, constituida esencialmente por materiales impermeables (arcillas, margas, calizas margosas y calizas) sin que destaque ningún tramo que pueda ser de interés a una profundidad adecuada.

Asturias - D1 (nº 450)

Este sondeo cortó desde los 171,5 m hasta los 2.900 m una serie comprendida entre el Eoceno superior-Oligoceno y el Valaginiense - Barremiense inferior de margas, areniscas, calizas y arcillas limolíticas.

Los restantes sondeos cortan series margosas similares sin que se hayan encontrado tramos de postencial interés. De las perforaciones nº 509 y 547 no se tienen datos pero dada la proximidad a las otras es esperable una serie similar.

2.2.2 ZONA ASTUROCCIDENTAL LEONESA

Los materiales variscos no son apropiados para contener yacimientos de hidrocarburos naturales, de manera que no hay sondeos de investigación de hidrocarburos en su seno. Sin embargo, hay dos sondeos marinos frente a la costa de Luarca (Asturias), muy próximos entre sí, que perforan el relleno mesozoico-cenozoico de la plataforma marina del Cantábrico.

Galicia B-1 (nº 384)

El fondo marino se encuentra a 101 m, donde se perforaron calizas areniscosas cretácicas hasta 324,5 m, donde finalizó el sondeo.

Galicia B-2 (nº 390)

El fondo marino se encuentra a 133,5 m, y no hay registro de datos en los primeros metros (hasta 326 m). Debajo, se registran unos 400 m de areniscas y limolitas del Albiense sobre un potente tramo de calizas aptienses de unos 650 m que a 1.384 m reposa sobre 166 m de limolitas arenosas-arcillosas del Triásico. A 1.550 m de profundidad se alcanza el zócalo paleozoico, constituido por arcillas en este punto hasta el final de la perforación, a 1.754 m.

2.2.3 ZONA CENTROIBÉRICA

Nuevamente no existen sondeos de hidrocarburos en el continente en esta área, ya que las formaciones existentes no son adecuadas para contener yacimientos. Sin embargo, hay un sondeo marino frente a la costa de Pontevedra que perfora el relleno mesozoico-cenozoico de la plataforma marina del Océano Atlántico.

Pontevedra marino B-1 (nº 569)

El fondo marino se encuentra a 233 m, y no hay registro de datos en los primeros metros (hasta 618 m). Debajo, la perforación atraviesa una potente serie cretácica (hasta 2.545 m), arcillosa en su parte inferior y arenosa en la parte superior. Reposasobre unos 40 m de calizas jurásicas que yacen sobre un basamento granítico a 2.950 m, perforado por el sondeo hasta su finalización, a 3.538 m.

2.3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

2.3.1 ZONA CANTÁBRICA

Teniendo en cuenta la complejidad estructural que la zona Cantábrica presenta por su tectónica de cabalgamientos, factor negativo para la idoneidad de sectores profundos como almacenes de CO₂, sería conveniente determinar las posibilidades de las unidades, formaciones y tramos siguientes:

- Ordovícico: Fm. Lancara (calizas y dolomías).
Fm. Barrios (cuarcitas equiparables a la cuarcita Armoricana).

- Devónico: Grupo Rañeces - La Vid (calizas). Fm. Nieva
Fm. Candas- Portilla (calizas)

-
- Carbonífero inferior: Fm. Baleas (calizas)
Fm. Alba. (caliza griotte)
 - Carbonífero medio: Caliza de Montaña (Fm. Barcaliente y Fm. Valdeteja)
 - Cuenca Carbonífera Central: (calizas y capas de carbón).

Asimismo, el sondeo petrolífero Caldones-1, realizado en el retazo de cobertera Mesozoica y Terciaria cortó un tramo de calizas de 150 m de potencia y a una profundidad de 500 a 650 m. Este tramo del Carbonífero podría ser de gran interés según se desarrolle tanto hacia el interior del continente como hacia la plataforma marina bajo la cobertera mencionada. Sería interesante consultar las columnas estratigráficas detalladas de los sondeos petrolíferos realizados en el mar para analizar detenidamente las series cretácicas perforadas. Esta consulta no se ha podido realizar por permanecer tales sondeos como confidenciales.

2.3.2 ZONA ASTUROCCIDENTAL LEONESA

La Zona Asturoccidental-Leonesa está constituida esencialmente por materiales variscos, que han sufrido procesos de enterramiento muy profundo y deformaciones muy intensas, por lo que han perdido gran parte de su porosidad primaria por compactación y recristalización. Sin embargo, algunos tramos litológicos pueden presentar porosidad secundaria por fracturación (es el caso de las cuarcitas, areniscas y carbonatos) de manera que puede considerarse su utilización como potencial almacén en el caso de tramos litológicos de gran espesor. También puede haber tramos con porosidad secundaria por disolución (el caso de los carbonatos), en tramos de espesor considerable.

Las formaciones litoestratigráficas suelen tener gran amplitud geográfica en la Zona Asturoccidental-Leonesa, con formaciones pizarrosas de gran espesor y continuidad lateral que pueden garantizar un confinamiento adecuado. Además, el estilo de la deformación favorece la presencia de estructuras trampa debido a la presencia de superposiciones tectónicas por cabalgamientos subhorizontales y la existencia de abundantes pliegues y deformaciones de flanco en estructuras de mayor envergadura, lo que favorece la utilización de grandes estructuras sinformes además de las trampas antiformes.

Los tramos litológicos más relevantes en la Zona Asturoccidental-Leonesa por su potencialidad como almacén de CO₂ son:

- Tramos cuarcíticos y arenosos principales de la Fm. (y Grupo) Cándana. Presentes en toda la zona.
- Caliza de Vegadeo. Se plantea localizar los sectores con mayor espesor e investigar la calidad del confinamiento por parte de las pizarras de la base de la Serie de los Cabos.
- Cuarcitas Arenigienses. Situadas en la parte superior de la Serie de los Cabos, a cuyo espesor podría sumarse localmente el de parte de las areniscas y cuarcitas

infrayacentes. Su espesor es mayor en el Dominio del Navia y Alto Sil, donde también es mayor el espesor de la formación confinante, las Pizarras de Luarca.

- Cuarcita de Vega. Solamente presente en el sector meridional del Dominio del Navia y Alto Sil, donde habría que localizar áreas de mayor espesor. Las pizarras silúricas constituyen a priori un magnífico confinamiento, dada su extensión regional y su potencia.

- Estefaniense B-C. Las cuencas continentales estefanienses contienen materiales porosos abundantes, como areniscas y conglomerados, entre materiales lutíticos que pueden constituir su confinamiento. En algunas áreas, su espesor alcanza los 2.000 m, y contienen también capas de carbón, de especial interés para el análisis del potencial secuestro de CO₂.

- La escasez de estructuras compresivas alpinas hace que estos materiales se encuentren relativamente poco deformados y que casi en todos los casos se encuentren estos materiales expuestos en superficie y no cobijados bajo superficies de cabalgamiento como en otras áreas peninsulares.

- Relleno mesozoico-cenozoico de la plataforma marina del Mar Cantábrico. Aunque no son materiales presentes en áreas emergidas, los sondeos marinos y la geofísica indican la presencia de espesores del orden del millar de metros en áreas muy próximas a la costa. En su seno se encuentran tanto formaciones carbonatadas como arenosas, que pueden constituir buenos almacenes si se localizan sectores con recubrimiento lutítico o que puedan suponer un confinamiento apropiado (no es el caso del sector donde se perforaron los únicos dos sondeos de la zona).

2.3.3 ZONA CENTROIBÉRICA

Las características de la Zona Centroibérica, tanto en los materiales que la forman como en los procesos que han podido dar lugar a porosidad secundaria, son muy semejantes a las descritas para la ZAOL, dando lugar a algunas posibilidades locales. Los tramos litológicos más relevantes en la Zona Centroibérica por su potencialidad como almacén de CO₂ son:

- Tramos ocasionales cuarcíticos y/o carbonatados potentes en las series preordovícicas. En algunos puntos del Dominio del Olló de Sapo se citan tramos cuarcíticos superiores a 200 m. En el Dominio del Complejo Esquisto-Grauváquico pueden presentar interés localmente las Areniscas de Tamames (y sus equivalentes, Areniscas del Azorejo y Fm. Torreárboles) y las suprayacentes Calizas de Tamames, (y su equivalente, Calizas de los Navalucillos), allí donde presenten espesor mayor.

- Cuarcita Armoricana, a cuyo espesor podría sumarse localmente el de parte de la Fm. de Base y parte de las Capas de Pochico. Es un tramo potente (200-400 m), presente en todos los sectores de la Zona Centroibérica y también fuera de sus límites. A techo se encuentra una formación pizarrosa también extensamente representada y muy potente, las Pizarras de Río, de 300 a 700 m. Este conjunto constituye, en principio, el objetivo principal de los posibles almacenes de CO₂ y puede encontrar-se en el rango de profundidades adecuado (800-2.500 m) en gran parte de los sinclinales que recorren en dirección NO-SE la Zona Centroibérica.

- Las Cuarcitas Botella y Cuarcitas del Criadero son dos tramos ordovícicos de espesor reducido, pero que localmente pueden experimentar engrosamientos ocasionales, que podrían constituir zonas de interés. Las pizarras silúricas constituyen a priori un buen confinamiento para la Cuarcita del Criadero, dada su

extensión regional y potencia. Además, en algunos sectores (Sinclinal de Almadén y Sierra de San Pedro) la serie silúrico-devónica contiene potentes conjuntos volcanosedimentarios que pueden constituir una mejora en el confinamiento.

- Tramos calcáreos potentes en la serie devónica, presentes en el Devónico Inferior del Sinclinal de La Codosera-Portalegre.

- Carbonífero sinorogénico continental. Presente únicamente en el extremo meridional de la Zona Centroibérica (área del Guadiato), con facies arenosas y conglomeráticas confinadas por lutitas y, en el sector de Peñarroya-Belmez-Espiel, con intercalaciones de carbón.

- Estefaniense B. Las cuencas continentales estefanienses contienen materiales porosos abundantes, como areniscas y conglomerados, entre materiales lutíticos que pueden constituir su confinamiento. La cuenca más importante conocida es la de Puertollano, con un espesor de 500 m, que contiene también capas de carbón, de especial interés en el secuestro de CO₂. También hay afloramientos menores en la Sierra de San Pedro. En general estos materiales se encuentran relativamente poco deformados.

- Rocas básicas y ultrabásicas. Presentes de forma dispersa en pequeños afloramientos asociados a los complejos graníticos extendidos por gran parte de la Zona Centroibérica. Existe un único macizo importante de rocas máficas e intermedias, el de Mérida.

- Basaltos y rocas volcánicas básicas. Presentes en el Campo de Calatrava (vulcanismo reciente) y en las potentes alternancias volcanosedimentarias del Silúrico-Devónico de los sinclinales de Almadén y Sierra de San Pedro.

- Relleno mesozoico-cenozoico de la plataforma marina del Atlántico. Aunque no son materiales presentes en áreas emergidas, un sondeo marino frente a la costa de Pontevedra revela la presencia de gran espesor de estos materiales en áreas muy próximas a la costa, recubriendo el basamento granítico. En su seno se encuentran tanto formaciones carbonatadas como arenosas, que pueden constituir buenos almacenes si se localizan sectores con recubrimiento lutítico o que puedan suponer un confinamiento apropiado.

2.3.4 ZONA DE GALICIA TRAS-OS-MONTES

En la Zona de Galicia-Trás-os-Montes pueden tener interés las rocas básicas y ultrabásicas de los complejos de Órdenes y Cabo Ortegal, con un gran espesor en algunos sectores y una distribución espacial y vertical compleja por la extrema tectonización de la zona. No se reconocen tramos estratigráficos de interés como almacén de CO₂.

2.3.5 ZONA DE OSSA-MORENA

Esta zona presenta de nuevo características generales comunes con la ZAOL, por lo que se procede directamente a la descripción de los escasos tramos litológicos con características favorables para el almacenamiento de CO₂:

-
- Tramo arenoso basal del Cámbrico (el miembro inferior de la Fm. Torreárboles), del orden del centenar de metros, al que sucede un conjunto lutítico. Se extiende por toda la zona.
 - Miembro Sierra Gorda de la Fm. Alconera. Tramo de calizas cámbricas de 500 m restringido a la Cubeta de Alconera.
 - Fm. Castellar, constituida por conglomerados y areniscas cámbricos de espesor variable entre 0 y 84 m. Se encuentra en gran parte de la zona y encima suele presentar potentes sucesiones lutíticas.
 - Fm. Sierra Colorada, en la región de Barrancos-Encinasola, con 20 a 200 m de cuarcitas y areniscas, que representa el Ordovícico Medio y Superior. En Venta del Ciervo hay un tramo de 80-100 m de areniscas marrones (Fm. Membrillo) del Ordovícico Medio directamente bajo el Silúrico, equivalentes en parte a un tramo de 60-80 m de areniscas que aparece en el Sinclinal del Valle, pero que sí presenta por encima el resto de la serie ordovícica.
 - Series sinorogénicas devono-carboníferas, situadas preferentemente en la franja septentrional de la Zona de Ossa-Morena, suelen presentar facies predominantemente conglomeráticas y/o arenosas en la base, que se extienden hacia arriba en la serie más o menos en función de su localización geográfica.
 - Cuarcitas de Sierra Albarrana, de 50-500 m, restringidas a la Unidad de Sierra Albarrana.
 - Rocas ígneas máficas y ultramáficas. Anfibolitas de Beja-Acebuche, Gabros de Beja, vulcanismo básico de edad cámbrica en el flanco meridional del Antiforme de Olivenza, Complejo Circular de Barcarrota, con núcleo de gabros y dioritas, plutón del Almendral, que incluye dioritas, monzonitas y sienitas con riebeckita y egirina, stock de Aguablanca, conjunto de rocas máficas y ultramáficas, Complejo de Burguillos del Cerro, con núcleo de gabros y gabronoritas y acumulados locales ultrabásicos.

2.3.6 ZONA SUDPORTUGUESA

La Zona Sudportuguesa está constituida esencialmente por materiales terrígenos y magmáticos que han sufrido procesos de enterramiento muy profundo y deformaciones muy intensas, por lo que han perdido gran parte de su porosidad primaria por compactación y recristalización. Sin embargo, algunos tramos litológicos pueden presentar porosidad secundaria por fracturación (es el caso de las cuarcitas y areniscas) de manera que puede considerarse su utilización como almacén en el caso de tramos litológicos de gran espesor.

Los tramos litológicos más relevantes en la Zona Sudportuguesa por su potencialidad como almacén de CO₂ son:

- Tramo superior arenoso del techo del Grupo de Pizarras y Cuarcitas (PQ). Presentes en toda la zona con espesor notable.
- Pérmico. Contiene materiales porosos abundantes, como areniscas y conglomerados, y contienen también capas de carbón y vulcanitas, pero solamente se encuentran en un sector y su espesor máximo es escaso (400 m). Estos

materiales podrían tener interés si se encuentra alguna porción de una de estas cuencas cobijada en profundidad bajo una superficie de falla.

- Rocas ígneas básicas y ultrabásicas. Relativamente abundantes en las intrusiones que forman el Batolito de la Sierra Norte de Sevilla.

2.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN EL MACIZO IBÉRICO

A continuación se describen para cada zona las unidades potencialmente favorables para el almacenamiento geológico de CO₂, así como las posibles unidades que actuarían como sello. Estas unidades han sido deducidas a partir de las columnas litológicas de los sondeos petrolíferos, donde los hay, y por estratigrafía regional. En este trabajo no se han considerado valores cuantitativos de porosidad, permeabilidad y salinidad del agua de la formación. Estos datos son necesarios para evaluar las posibilidades de los distintos almacenes, por lo que es necesario realizar estudios más detallados para cuantificar estos parámetros, ya que determinarán la idoneidad de las diferentes unidades.

2.4.1 ZONA CANTÁBRICA (ZONA B-4)

- **Confinante 1: Tramos lutíticos de la cobertera mesozoica**

La cobertera mesozoica se encuentra presente únicamente en el sector septentrional (alrededores de Oviedo y plataforma marina). Su espesor es insuficiente en tierra firme, pero aumenta rápidamente mar adentro.

- **Confinante 2: Tramos lutíticos de la parte superior del Carbonífero**

Salvo en algunos sectores de la Cuenca Carbonífera Central, donde dominan las facies detríticas groseras, en el resto de la zona con carbonífero aflorante la parte superior de la serie es predominantemente lutítica con intercalaciones de carbón.

- **Almacén 1: Capas de carbón en la parte superior del Carbonífero**

Son muy numerosas y se encuentran afectadas por multitud de sondeos y labores mineras. En general cada capa suele encontrarse confinada entre tramos lutíticos, aunque en algunos sectores de la Cuenca Carbonífera Central dominan los conglomerados y areniscas.

- **Almacén 2: Carbonatos del Carbonífero medio e inferior**

La Formación Barcaliente (de espesor hectométrico) se encuentra presente en gran parte de la zona de afloramiento de materiales carboníferos, y en muchos sectores se encuentra sucedida por los carbonatos de la Fm. Valdeteja, constituyendo el conjunto la denominada "Caliza de Montaña". Bajo este conjunto suele encontrarse también un

tramo carbonatado de reducido espesor (Fm. Alba) al que en algunos sectores se le añade (por su base) la Fm. Baleas.

Localmente se añade por arriba la Fm. Picos de Europa, también carbonatada y muy potente, o bien, como en la Unidad del Ponga, existe algún tramo carbonatado superior separado de este conjunto (Fm. Escalada, de 200-800 m de espesor).

- **Confinante 3: Tramos lutíticos superiores del Devónico**

Grandes variaciones laterales de espesor y facies. Ausentes en muchos sectores.

- **Almacén 3: Tramos carbonatados del Devónico**

Fm. Candas-Portilla en la Unidad de Somiedo, con 40-400 m de espesor. En las unidades occidentales se encuentra el conjunto formado por el Grupo Rañeces - La Vid y las formaciones Moniello y Santa Lucía, conjunto que puede tener más de 500 m de espesor.

- **Confinante 4: Tramos lutíticos potentes del Ordovícico y Silúrico**

Fundamentalmente las Pizarras de Luarca (hasta 350 m), ordovícicas, de gran desarrollo en la Unidad de Somiedo y muy reducidas o ausentes en otros sectores donde podría utilizarse algún tramo silúrico menos desarrollado.

- **Almacén 4: Cuarcitas de Barrios y equivalentes**

Conjunto cuarcítico de 80 a 1.020 m de espesor presente en la práctica totalidad de la zona. Equivalente a la Cuarcita Armoricana de sectores más meridionales del Macizo Ibérico.

- **Almacén 5: Carbonatos de la Fm. Láncara**

Conjunto de calizas y dolomías del Cámbrico de 150-225 m , aflorante en casi toda la Zona Cantábrica, en la base de las escamas de cabalgamiento (salvo en la Unidad de Pisuega-Carrión), con especial desarrollo en la Unidad de Somiedo.

Como posible confinante para este conjunto podrían actuar localmente las pizarras y areniscas de la Fm. Oville (80-800 m).

2.4.2 ZONA ASTUROCCIDENTAL LEONESA (ZONA B-5)

- **Confinante y almacén 1: Estefaniense B-C**

Conjunto de hasta 2.000 m de sedimentos distribuidos en cuencas aisladas relativamente poco deformadas. Suele abundar en términos areniscosos y conglomeráticos confinados entre capas lutíticas, más abundantes en la parte superior, que podrían servir de confinamiento. Capas de carbón frecuentes.

- **Confinante 2: Pizarras negras silúricas**

Tramo de pizarras negras de gran uniformidad en toda la Zona Asturoccidental-Leonesa, con espesores de hasta 700 m al Este (Dominio del Navia y Alto Sil) y de 100 m en el Oeste (Dominio del Manto de Mondoñedo).

- **Almacén 2: Cuarcita de Vega**

Tramo de cuarcitas de 50 a 200 m de espesor, presente en afloramiento únicamente en la parte meridional del Dominio del Navia y Alto Sil (al Este).

- **Confinante 3: Pizarras de Luarca**

Tramo de pizarras negras homogéneas de hasta 1.200 m de espesor máximo en el Dominio del Navia y Alto Sil, disminuyendo en las zonas o dominios adyacentes, de forma que en el Dominio del Manto de Mondoñedo se reduce considerablemente y vuelve a aumentar de espesor en el Dominio del Caurel-Truchas (Zona Centroibérica).

- **Almacén 3: Cuarcitas Arenigienses (equivalentes a la Armoricana y Fm. Barrios)**

Conjunto cuarcítico de espesor variable (hasta 800 m al Este y menos de 100 m al Oeste) presente en toda la zona y áreas adyacentes. A su espesor puede sumarse localmente el de parte de las areniscas y cuarcitas infrayacentes de la Serie de los Cabos.

- **Confinante 4: Tramo lutítico basal de la Serie de los Cabos**

De espesor variable y litológicamente heterogéneo (aunque presente en la práctica totalidad de la zona), no suele alcanzar espesores muy superiores al centenar de metros.

- **Almacén 4: Caliza de Vegadeo**

Tramo de 50 a 200 m de dolomías y calizas, equivalentes a la Fm. Láncara de la Zona Cantábrica.

- **Almacén 5: Tramos cuarcíticos y arenosos principales de la Fm. (y Grupo) Cándana**

Presentes en toda la zona, de desarrollo y distribución variables, generalmente constituyendo tramos de escala hectométrica. Suelen consistir en areniscas feldespáticas, pizarras y niveles subordinados de dolomías y microconglomerados, de edad esencialmente Cámbrico Inferior.

2.4.3 ZONA CENTROIBÉRICA: DOMINIO OLLO DE SAPO (ZONA B-6)

- **Confinante 1: Pizarras silúricas**

Normalmente es el tramo más moderno aflorante, por lo que se dispone de pocos datos para determinar su espesor, estimado en 100 a 300 m. Parece reposar en

discordancia sobre diversos términos de la serie ordovícica. A favor de este tramo pelítico se desarrollan numerosas superficies de cizalla que dan lugar a escamas tectónicas imbricadas, de forma que se superpone a diversos términos de la serie.

- **Confinante 2: Pizarras de Luarca**

Presente en toda la zona. Tramo de pizarras gris-azuladas monótonas con escasas intercalaciones cuarcíticas. Varían de espesor entre 0 y 800 m en Galicia, 650 m en Sanabria y Alcañices, y en torno a 1.000 m en la Sierra de Guadarrama, recibiendo distintas denominaciones.

- **Almacén 1: Cuarcita Armoricana**

Tramo cuarcítico muy continuo, de edad arenigiense, con espesor y nomenclatura también variables, entre 0-300 m en Galicia, 200-350 m en Sanabria y Alcañices, y 70-200 m en la Sierra de Guadarrama. Junto con el anterior constituyen el doblete confinante-almacén más importante a priori en un amplio sector del Macizo Ibérico. De interés únicamente en los grandes núcleos sinclinales de la zona, al igual que las formaciones confinantes.

2.4.4 ZONA CENTROIBÉRICA: DOMINIO DEL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVÁQUICO (ZONA B-7)

Esta zona está ocupada por grandes masas graníticas que dominan en su sector NO y N. Las posibles zonas utilizables para almacenamiento de CO₂ quedan restringidas a grandes núcleos sinformales que recorren la zona en dirección NO-SE y que ocupan la mayor parte de la superficie en el sector meridional y oriental de la zona. Entre estas áreas sinformes se disponen bandas antiformes con núcleo precámbrico aflorante principalmente en el sector occidental.

Presentan interés las rocas volcánicas ultrabásicas del Campo de Calatrava, de edad reciente, así como las escasas intrusiones máficas y ultramáficas, la más importante de las cuales es la de Mérida.

- **Confinante y almacén 1: Estefaniense B**

Limitado a la Cuenca Carbonífera de Puertollano. Se trata de una sucesión discordante subhorizontal, con más de 500 m de sedimentos fluviolacustres cíclicos que constan de conglomerados, arenas, limos, arcillas y capas de carbón. Algunos sectores concretos de la cuenca pueden situarse a profundidad adecuada, si bien las labores mineras limitan las posibles zonas de utilización como almacén de CO₂.

- **Confinante y almacén 2: Carbonífero sinorogénico continental**

En el extremo más meridional de la zona (área del Guadiato) existen dos bandas NO-SE de sedimentos carboníferos sinorogénicos, la meridional (Sierra del Castillo y San Antonio-La Juliana) es de carácter parálico y consta de conglomerados, arenas y limos, con olistolitos de calizas recifales viseenses, mientras la septentrional (Peñarroya-Belmez-Espiel), de carácter límnico, consta de un conglomerado basal y

una sucesión de ciclotemas de conglomerados, arenas, limos y carbón. En su seno se encuentran, pues, tramos con potencial de almacén confinados entre tramos lutíticos.

Otro conjunto de sedimentos de esta edad pero de muy diferente naturaleza se dispone según bandas de dirección NO-SE, situadas junto al Batolito de Los Pedroches, tanto al N como al S. Se trata de una potente secuencia de más de 6.000 m de alternancias de pizarras y grauvacas en facies Culm, con intercalaciones, preferentemente hacia la base, de conglomerados, abundantes rocas volcánicas ácidas y, sobre todo, básicas, y escasas calizas. En conjunto se trata de un posible tramo confinante, si bien localmente puede contener masas de litologías apropiadas como almacén.

- **Confinante 3: Pizarras silúricas**

Tramo pizarroso muy continuo, con base eminentemente pizarrosa de unas decenas de metros, sobre la cual se dispone una potente alternancia de pizarras y niveles arenosos que alcanza el Devónico, parcial o totalmente sustituida en grandes áreas por un complejo vulcanosedimentario de gran espesor. El conjunto supera los 2.000 m donde no está erosionado.

- **Almacén 3: Cuarcita del Criadero**

Es un tramo cuarcítico de espesor reducido (generalmente inferior a 50 m), aunque con engrosamientos locales. Presenta una gran continuidad a lo largo de prácticamente toda la extensión de la zona y se encuentra confinado a techo por las pizarras silúricas.

- **Confinante 4: Pizarras de Canteras (+ Bancos Mixtos + Pizarras Chavera)**

Las Pizarras de Canteras son muy continuas, pero con espesor reducido (15-100 m), pero por encima se sitúa un conjunto de 150-200 m de alternancias areniscas-lutitas (bancos Mixtos) sobre el que se disponen las Pizarras Chavera (unos 100 m), de forma que el conjunto puede constituir un posible tramo confinante cuya calidad habría que determinar en los posibles sectores de interés.

- **Almacén 4: Cuarcita Botella**

Tramo eminentemente cuarcítico de hasta 120 m de espesor, muy continuo aunque con variaciones laterales. En algunos sectores a su espesor se le puede sumar el de los términos areniscosos superiores de las Alternancias de El Caño, infrayacentes.

- **Confinante 4: Pizarras de Río**

Tramo pizarroso muy potente y continuo, presente en la práctica totalidad de la zona. Su espesor oscila entre 300 y 700 m, pudiendo constituir un magnífico confinamiento.

- **Almacén 4: Cuarcita Armoricana**

Tramo cuarcítico potente (200-400 m), presente en todos los sectores de la zona, al que podría sumarse localmente el espesor de parte de la Formación de Base, situada por debajo, y parte de las Capas de Pochico, situadas por encima. Este potente conjunto es a priori la mejor opción de almacenamiento en buena parte del Macizo Ibérico, y cuenta a su techo con el tramo lutítico más potente y continuo de la región.

Localmente pueden presentar interés otros tramos inferiores: hasta 650 m de Areniscas de Tamames y hasta 500 m de Calizas de Tamames, confinadas bajo 150 m de Pizarras de Endrinal.

2.4.5 ZONA DE OSSA-MORENA (ZONA B-8)

Esta zona está caracterizada por la relativa abundancia de intrusiones de rocas máficas y ultramáficas, de posible interés para el secuestro de CO₂. Las más importantes son las Anfibolitas de Beja-Acebuches, los Gabros de Beja, el Complejo Circular de Barcarrota, el Plutón del Almendral, el Stock de Aguablanca, el Complejo de Burguillos del Cerro y el vulcanismo cámbrico del flanco meridional del Anticlinal de Olivenza. En cuanto a las rocas sedimentarias, son escasos los tramos de interés, que generalmente no presentan gran continuidad.

- **Confinante y almacén 1: Series sinorogénicas devono-carboníferas**

Solamente se preservan materiales de este intervalo en afloramientos localizados, algunos de cierta extensión, como el afloramiento de Terena, en el que el núcleo de un sinclinal alberga una serie turbidítica en cuya base se observa puntualmente una brecha intraformacional. El resto de afloramientos se concentra en la franja septentrional de la zona, y suelen comenzar con un tramo conglomerático o arenoso sobre el que se dispone una serie de grauvacas y rocas volcánicas (afloramiento de Los Santos de Maimona), brechas y conglomerados (afloramiento de Valdeinfierno), o areniscas y lutitas con pasadas de carbón (afloramientos de Benajafe y Berlanga).

- **Confinante 2: Pizarras silúricas**

Las sucesiones silúricas de la Zona de Ossa-Morena son eminentemente pelíticas, muy continuas y de espesor reducido (en total 100-150 m), continuándose las facies pelíticas a lo largo de todo el Devónico, si bien con mayor proporción de niveles arenosos.

- **Almacén 2: Tramos cuarcíticos principales del Ordovícico medio y superior**

Tienen localmente gran espesor pero continuidad limitada. Destacan algunos tramos de la Fm. Sierra Colorada (20-200 m de cuarcitas y areniscas), en la región de Barrancos-Encinasola, la Fm. Membrillo (80-100 m de areniscas), en Venta del Ciervo y un tramo de 60-80 m de areniscas, en el Sinclinal del Valle.

- **Confinante 3: Tramos lutíticos del techo del Cámbrico**

Potente tramo pizarroso bien conocido en la Sierra de Córdoba (Fm. Los Villares, más de 450 m) y en la Cubeta de Alconera (parte superior de las Capas del Playón, con más de 600 m de espesor).

- **Almacén 3: Cuarcitas de la Fm. Castellar (Cámbrico)**

Consisten en un tramo de conglomerados y areniscas de espesor variable, entre 0 y 84 m. Presentes en gran parte de la zona, con frecuencia bajo un potente conjunto lutítico.

- **Confinante 4: Lutitas del Miembro La Hoya de la Fm. Alconera (Cámbrico)**

Tramo de unos 400 m de espesor en la Cubeta de Alconera.

- **Almacén 4: Calizas del Miembro Sierra Gorda de la Fm. Alconera (Cámbrico)**

Hasta 500 m de calizas bajo las lutitas anteriores. Solamente en la Cubeta de Alconera.

- **Confinante 5: Tramo lutítico superior de la Fm. Torreárboles (Cámbrico)**

Tramo de unos 100 m de lutitas que se extiende por toda la zona.

- **Almacén 5: Tramo arenoso basal del Cámbrico (parte inferior de la Fm. Torreárboles)**

Tramo de unos 100 m de arenas que se extiende por la mayor parte de la zona.

2.4.6 ZONA SUDPORTUGUESA (ZONA B-9)

En esta zona presenta interés la abundancia de rocas básicas y ultrabásicas en el sector NE, constituyendo el Batolito de la Sierra Norte de Sevilla, formado por rocas básicas y ultrabásicas, granitos, granodioritas y tonalitas. Las rocas básicas constituyen cuerpos en forma de bandas kilométricas que incluyen a cuerpos subredondeados de rocas ultrabásicas acumuladas con espesor variable entre decenas de metros y un kilómetro. Estas rocas ultrabásicas afloran principalmente en el embalse de La Minilla y el Cerro del Moro y Algarrobito.

- **Confinante y almacén 1: Pérmico**

Aflorante únicamente en el extremo NE de la zona (Cuenca del Viar). Contiene términos arenosos, conglomerados, carbón, vulcanitas y lutitas, pero su espesor global no rebasa los 400 m. Habría que buscar retazos de estos materiales cobijados bajo superficies de cabalgamiento para que pudieran ser interesantes para el secuestro de CO₂.

- **Confinante 2: Grupo Culm. (Carbonífero)**

Incluye una Serie Pizarrosa Basal de unos 50 m de espesor medio y un conjunto superior turbidítico de varios miles de metros. En algunas zonas a su espesor como conjunto confinante se le añade el de los materiales infrayacentes, predominantemente lutíticos con cierta proporción de materiales vulcanosedimentarios (en otros sectores la mayoría del tramo es vulcanosedimentario).

- **Almacén 2: Tramo superior arenoso del Grupo de Pizarras y Cuarcitas**

Presentes en toda la zona, con espesor notable.

3. CORDILLERA BÉTICA

3.1 MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La Cordillera Bética es la gran unidad orográfica y geológica del S y SE de la Península Ibérica (fig. 2.1). Incluye los relieves montañosos situados al S del río Guadalquivir y los que continúan hacia el NE por la provincia de Albacete, Murcia y la mitad meridional de la Comunidad Valenciana, limitando al N con el Macizo Ibérico y con la Cordillera Ibérica. Los límites SO, S y SE coinciden con el litoral atlántico y mediterráneo, pero no hay duda de que la cordillera se prolonga bajo los mares adyacentes para conectar con el dominio alpino del Rift norafricano. Por tanto, la totalidad del sustrato del Mar de Alborán, gran parte del sustrato del Golfo de Cádiz y una parte de los fondos del Mediterráneo entre las costas de Valencia y Murcia y las islas pueden considerarse porciones sumergidas de esta cadena.

Instaladas en franca discordancia sobre el orógeno bético, se reconocen extensas y potentes sucesiones del Mioceno Superior, Plioceno y Cuaternario, que forman parte del relleno de las denominadas cuencas postorogénicas, entre las que destacan la Cuenca del Guadalquivir, que separa la mitad occidental de la Cordillera Bética del Macizo Ibérico, y las cuencas intramontañas, localizadas en el interior de la propia cadena.

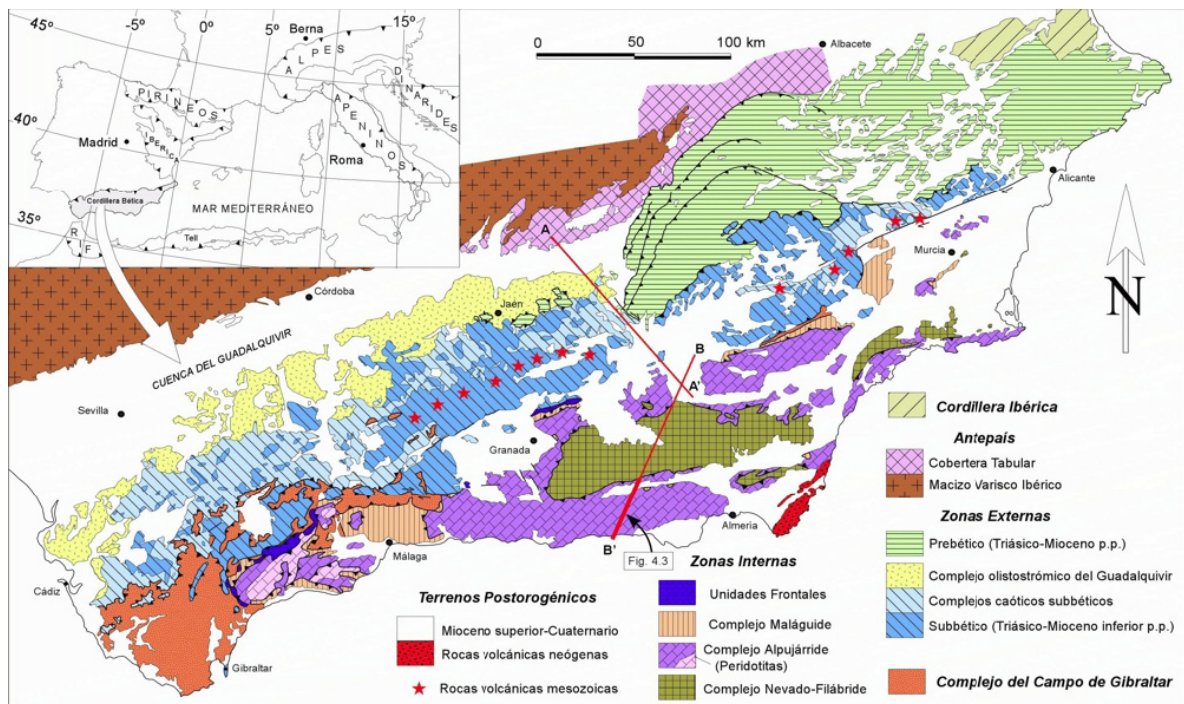


Figura 3.1 Mapa geológico de la Cordillera Bética, en el que se muestra la extensión de los afloramientos de cada una de las unidades diferenciadas. A-A' y B-B', trazas de los perfiles sísmicos profundos ESCIBETICAS 1 y 2, respectivamente. (Vera y Martín-Algarra, 2004)

En la Cordillera Bética se diferencian clásicamente tres grupos de unidades geológicas de rango mayor (fig. 3.1): la Zona Interna Bética, el Complejo del Campo de Gibraltar y la Zona Externa Bética. Todas ellas están constituidas por complejos de unidades tectónicas alóctonas, cuyo grado de aloctonía disminuye hacia el antepaís. A continuación se describen de forma somera:

- **Zona Externa Bética.**- Aflora extensamente al S y SE del Macizo Ibérico y el Valle del Guadalquivir, desde el Golfo de Cádiz a la provincia de Alicante, y constituyen una cobertera, deformada y despegada, de un zócalo varisco que es la continuación hacia el S del Macizo Ibérico. Éste, junto con su Cobertera Tabular de sedimentos meso-cenozoicos no plegados, constituye el antepaís bético. Se dividen en dos grandes dominios tectonoestratigráficos: el Prebético y el Subbético.

Ambos están formados por sucesiones de rocas sedimentarias de edad Triásico a Mioceno fuertemente deformadas pero no afectadas por metamorfismo alpino.

- **Prebético.**- Comprende unidades parautóctonas (en sus sectores más externos) a moderadamente alóctonas que afloran casi exclusivamente en la mitad oriental de la Cordillera. Al O de Jaén no aflora, bien por estar tapado por el Subbético o por los sedimentos de la Cuenca del Guadalquivir.

- **Subbético.**- Cabalga ampliamente sobre el Prebético y aflora al S de éste y al N de la Zona Interna. Su estructura interna es mucho más compleja por estar constituido por unidades tectónicas intensamente deformadas y ampliamente alóctonas. En sectores muy extensos, estas unidades han perdido su coherencia interna y han sido transformadas en masas caóticas brechificadas que constituyen los Complejos Caóticos Subbéticos.

- **Complejo del Campo de Gibraltar.**- Aflora principalmente en las provincias de Cádiz y Málaga, pero sus afloramientos, muy tectonizados, pueden seguirse hacia el Este hasta las proximidades de Murcia a lo largo del contacto entre la Zona Externa y la Zona Interna. Las unidades de este complejo están formadas por coberteras sedimentarias mesozoicas y cenozoicas despegadas de su sustrato original y no afectadas por metamorfismo alpino. Son sedimentos de facies marinas muy profundas: arcillas, margas y sobre todo turbiditas (facies flysch), principalmente siliciclásticas durante el Cretácico Inferior y, especialmente, en el Oligoceno Superior-Mioceno Inferior. A lo largo del frente de la Zona Interna el Complejo del Campo de Gibraltar muestra una estructura caótica, con una deformación tan intensa que las sucesiones estratigráficas están totalmente fragmentadas en bloques de diversos tamaños y procedencias, embalados en una formación arcillo-areniscosa denominada *Numidoide*, de colores pardos, edad oligo-miocena y textura escamosa por intensa tectonización. Esta franja caótica ha sido agrupada dentro de un complejo denominado *Predorsaliense*, pero bajo esta denominación se han incluido terrenos pertenecientes a unidades tectónicas de muy diversas procedencias, tanto externas como internas. Los rasgos geológicos de esta región, adyacente a una frontera tectónica mayor (el contacto con la Zona Interna), son propios de una zona de *melange* tectonosedimentaria asociada con una antigua zona de subducción.

- **Zona Interna Bética.**- Aflora desde Estepona (Málaga) hasta los alrededores de Cartagena. Forma la región más intensamente deformada del orógeno y está esencialmente constituida por un apilamiento antiformal de unidades tectónicas superpuestas, a la que se añade una zona frontal de imbricaciones en el área de contacto con el Complejo del Campo de Gibraltar y la Zona Externa Bética.

Tradicionalmente la pila antiformal ha sido subdividida en los siguientes complejos, de abajo a arriba: Nevadofilábride, Alpujárride y Maláguide. Éstos fueron considerados inicialmente mantos de corrimiento, aunque sus contactos actuales indican casi siempre movimientos en régimen de falla normal o de despegue extensional. En la pila antiformal de unidades internas los terrenos del zócalo preeozoico aparecen tectónicamente movilizados conjuntamente con las sucesiones mesozoicas de cobertera. Los terrenos del zócalo y de la cobertera suelen alternar reiteradamente en las sucesivas unidades superpuestas y ambos pueden aparecer afectados por un metamorfismo alpino polifásico y plurifacial que está bastante generalizado, aunque es notablemente menos intenso o incluso ausente en el Complejo Maláguide. En los zócalos de algunas unidades nevadofilábrides y alpujárrides se preservan localmente vestigios importantes de magmatismo, metamorfismo y orogénias prealpinas. En el Complejo Nevadofilábride aparecen asimismo afloramientos importantes de metabasitas y metaultramafitas. Algunas unidades superiores del Complejo Alpujárride incorporan a su zócalo extensas porciones de la corteza continental profunda intensamente metamorfizada e, incluso, del manto superior subcontinental, como sucede en los Macizos Peridotíticos de la Serranía de Ronda. Las unidades situadas en el frente de la Zona Interna Bética (Unidades Frontales de la Zona Interna Bética) afloran ampliamente en la Serranía de Ronda, donde fueron parcialmente incluidas por diversos autores en el *Rondaide* y también al N de Granada, donde constituyen el *Complejo Dorsaliano* o *Dorsal*, al que más adelante se le añadió la ya mencionada *Predorsal*.

En las Unidades Frontales de la Zona Interna predominan unidades tectónicas compuestas por sucesiones de cobertera despegadas de su zócalo y poco o nada metamorfizadas (excepto en el sector al SE de Ronda).

La estructura general de las Béticas responde a la colisión entre dos dominios corticales: el Macizo Ibérico y el Dominio de Alborán. La Zona Externa corresponde a la cobertera del primero, que subduce bajo el segundo, constituido por la Zona Interna. El Complejo del Campo de Gibraltar correspondería a un dominio intermedio entre ambos, un surco de Flyschs con depósito de potentes series turbidíticas sobre corteza oceánica que fue subducida enteramente en la colisión, constituyendo parte de su relleno sedimentario un prisma de acreción asociado a la zona de subducción.

- **Cuencas postorogénicas intramontañosas de la Cordillera Bética.**- Entre el Mioceno Superior y el Cuaternario, con las directrices principales del orógeno ya consolidadas, se desarrollan las Cuencas Postorogénicas, que se sitúan indistintamente sobre la Zona Interna, la Zona Externa o sobre el contacto entre ambas.

El contexto geodinámico que reina durante esta etapa en la Cordillera Bética se caracteriza por una compresión regional N-S a NO-SE responsable de la generación de una compleja red de fracturas NO-SE y NE-SO a NNE-SSO, que actúan conjuntamente con otras fracturas preexistentes N70E y E-O. Asociadas a esta red de fracturación se forman las Cuencas Postorogénicas, que presentan morfología poligonal (limitadas por fallas). Las cuencas se encuentran sometidas a una notable subsidencia, con frecuencia parcialmente conectadas entre sí y separadas por sectores que experimentan levantamiento.

Ejemplos de cuencas asociadas a fallas NO-SE y N70E son las cuencas de Ronda, Granada, Guadix-Baza, Lorca y las cuencas instaladas sobre el Prebético al N de Alicante. Asociadas a fallas NE-SO a NNE-SSO, las cuencas de Níjar, Vera, Puerto Lumbreras e Hinojar. Asociadas a fallas E-O, las cuencas de Málaga, Alpujarras,

Sorbas, Almazora y Huércal-Overa. Otras cuencas, como la del Bajo Segura, comparten rasgos estructurales de varios de los anteriores modelos.

El relleno de las Cuencas Postorogénicas puede dividirse en seis unidades aloestratigráficas separadas por discontinuidades mayores reconocidas a escala de toda la Cordillera Bética. Las tres primeras son de edad Tortoniense, la cuarta es del Tortoniense Terminal - Mesiniense (o Tuoliense superior), la quinta pertenece al Plioceno inferior y la sexta al Plioceno Superior-Pleistoceno. La sedimentación comienza con depósitos marinos y finaliza con depósitos continentales.

La arquitectura de los rellenos de las diferentes cuencas es compleja, pero en muchos casos tienen en común la existencia de facies de areniscas y conglomerados en la base que en los sectores centrales de las cuencas gradan hacia techo a facies lutíticas, sobre las cuales yacen facies heterolíticas complejas. Puede presentar interés la existencia de estas parejas de facies permeables limitadas por facies impermeables a techo en las partes más profundas de las cuencas, algunas de las cuales pueden encontrarse a profundidad adecuada para su utilización como almacén de CO₂.

También es llamativo e interesante el intenso vulcanismo reciente del SE peninsular, con manifestaciones en superficie desde Jumilla hasta el Cabo de Gata. En el entorno del Cabo de Gata, los materiales volcánicos son calcoalcalinos y pueden alcanzar gran desarrollo.

3.2 SONDEOS PETROLÍFEROS

3.2.1 PREBÉTICO

Carcelén-1 (nº 228)

156 m de arenas albenses con niveles de arcillas, lignitos y dolomías. 90 m de dolomías aptenses y 189 m de Weald (areniscas, arcillas, calizas y yesos). Debajo, tramo Oxfordiense – Kimmeridgiense de 269 m formado por calizas a techo y margas en la base. Debajo, unos 300 m de dolomías y calizas del Dogger que a 996 m pasan a un Lías medio y superior de unos 230 m, formado por anhidrita, arcilla y carbonatos. Por debajo de 1.226 m, potente tramo de anhidrita del Lías inferior (871 m) con sal en la base que intercala niveles de dolomía. Las arcillas del Keuper comienzan a 2.097 m, e intercalan areniscas y anhidrita y sal masiva en la base, a 2.511 m, donde una barra dolomítica de 63 m representa el Muschelkalk, que yace a 2.574 m sobre areniscas del Buntsandstein.

Salobral-1. (nº 309)

62 m de areniscas y conglomerados terciarios recubren 58 m de arcillas, calizas y arenas del Cretácico Inferior. Debajo, unos 200 m de arcillas dan paso a algo más de 600 m de dolomías con anhidrita en la mitad inferior, correspondientes al Lías y Retiense.

El Keuper comienza a 957 m y se prolonga a lo largo de casi 900 m en un tramo arcilloso que incorpora sal progresivamente hacia la parte inferior. 12 m de dolomías representan el Muschelkalk, sobre 145 m de areniscas del Buntsandstein que reposan sobre cuarcitas silúricas a 2.007 m.

Sierra Larga-1. (nº 167)

Unos 1.000 m de calizas que comprenden el intervalo Kimmeridgiense-Barremiense cabalgan a favor de un tramo arcillo-arenoso de 40 m del Weald sobre 326 m de calizas del Portlandiense-Berriasiense que a 1.380 m yacen sobre 140 m de arenas y arcillas del Weald que nuevamente constituyen un nivel de despegue de un cabalgamiento. Debajo, 580 m de alternancia de grandes tramos calcáreos y grandes tramos limolíticos, correspondiente al Aptense. A 2.100 m pasan a limolitas y areniscas del Weald que se prolongan a lo largo de casi 500 m hasta la terminación del sondeo, a 2.581,5 m.

Socovos-2. (nº 242)

Sondeo de 3.257,5 m que alcanza el Keuper y corta una potente serie Jurásico Superior – Cretácico Inferior. Comienza con 108 m de areniscas albienses sobre 468 m de alternancia de lutitas con areniscas y carbonatos (Weald-Urgoniano), estando ausentes los carbonatos en los 130 m inferiores. A 576 m comienza un tramo calcáreo de unos 600 m (Purbeck) que yace sobre más de 300 m de margas del Malm. Debajo, casi 1.700 m de calizas sublitográficas kimmeridgienses (seguramente con repeticiones de serie por uno o más cabalgamientos). La base de este tramo, a 3.198 m, es el Keuper arcilloso con anhidrita y sal.

Río Segura-G-1. (nº 564)

Perforado hasta 5.300 m, sin datos.

3.2.2 SUBBÉTICO

Nueva Carteya-1. (nº 272)

40 m de caliza arcillosa miocena sobre 735 m de alternancia de arcillas y calizas arcillosas del Cretácico Inferior. A partir de 775 m se perfora un potente tramo carbonatado de 2.463 m que comprende todo el Jurásico y la base del Cretácico. Incluye algún tramo algo arcilloso, y es anhidrítico y dolomítico en la base y calcáreo en el resto. A 3.238 m, bajo las anhidritas de la base, tramo de 288 m de arcillas atribuidas al Mioceno, con brecha en su base. Debajo, 28 m de arcillas sobre dolomías, arcillas, areniscas y calizas atribuidas al Paleozoico.

Fuensanta de Martos-1. (nº 253)

135 m de areniscas barremienses sobre unos 450 m de alternancia de margas y calizas del Malm-Cretácico Inferior. El resto del sondeo son 1.200 m de calizas y dolomías jurásicas, hasta el Hettangiense al final del sondeo, a 1.800 m.

Cuenca del Bajo Segura

La Marina-1. (nº 9)

275 m de Pliocuatnario (arenas y margas, con anhidrita en la base y calizas a techo) sobre 279 m de anhidrita y margas del Plioceno. Debajo, 371 m de arcillas y margas Messinienses con areniscas y conglomerados basales. A partir de 925 m, tramo de unos 650 m de calizas y dolomías triásicas (Alpujárride) con intercalaciones arcillosas y, hacia la base, conglomerados. El sondeo finaliza a 1.610 m tras atravesar unos metros de ofita.

Rojales-1. (nº 11)

1.225 m de arcillas messiniense-pliocenas y cuaternarias con una intercalación de 113 m de anhidrita entre 387 y 500 m. Debajo, 212 m de calizas dolomíticas seguramente alpujárrides que yacen sobre pizarras metamórficas también alpujárrides.

Costa meridional de Almería

Cabo de Gata-1. (nº 456)

1.128 m de alternancia de tobas andesíticas y cenizas feldespáticas, salvo la parte superior, recubierta por 35,5 m de arcillas y cantos pliocuaternarios.

Andalucía A-1. (nº 455)

Sondeo marino con agua hasta 117 m, frente al Campo de Dalías, que corta 2.844 m de Mioceno, Plioceno y Cuaternario sobre filitas y cuarcitas béticas. El Plioceno y Cuaternario son arcillas con pasadas arenosas y alcanzan 625 m de profundidad. Hasta 1.689 m el Mioceno es arcilloso con intercalaciones de rocas volcánicas y areniscas, mientras por debajo son margas con potentes tramos intercalados de calizas, areniscas y tobas volcánicas.

3.3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

3.3.1 ZONA INTERNA

En la Zona Interna domina las formaciones antiguas, muy compactadas y recristalizadas, en las que la porosidad primarias es muy reducida, de manera que en principio su interés es menor desde el punto de vista de su capacidad de almacenamiento de CO₂, siendo más interesantes por sus posibilidades como capa confinante en situaciones de superposición tectónica sobre formaciones más recientes y permeables, si bien esta situación no es nada frecuente en la Cordillera.

En una posterior fase de investigación habría que seleccionar estructuras trampa en el subsuelo que permitieran la ubicación del conjunto confinante-almacén en la profundidad adecuada.

Posibles formaciones almacén:

- Tramos carbonatados triásicos de las Unidades Frontales de la Zona Interna.- De gran espesor en algunas Unidades Frontales Externas. En las Unidades Frontales Internas su espesor es desconocido por hallarse truncadas tectónicamente, si bien en ellas adquiere un espesor notable el tramo carbonatado basal del Lías.
- Carbonatos de la Fm. Santi Petri (Paleozoico maláguide).- Adquieren cierta potencia en algunos sectores, pero su porosidad es seguramente muy baja, circunstancia que habrá que valorar con datos de mediciones en campo y/o laboratorio. Los términos areniscosos y conglomeráticos del Paleozoico maláguide se encuentran en general muy cementados y su porosidad es muy reducida, y no suelen presentarse con gran espesor.
- Permotrías del Complejo Maláguide.- Las facies arenosas y conglomeráticas de la Fm. Saladilla pueden tener interés, junto con el tramo dolomítico intermedio asimilable al Muschelkalk.
- Jurásico carbonatado del Complejo Maláguide.- Es posiblemente el tramo más interesante por su extensión y espesor.

-
- Tramos carbonatados del Eoceno del Complejo Maláguide.- Especialmente en el sector de Sierra Espuña, donde muestran gran desarrollo. A estos tramos carbonatados se les une puntualmente alguna formación arenosa adyacente.
 - Areniscas, conglomerados y calizas de la Fm. Bosque (Oligoceno maláguide).- Pueden tener interés localmente, donde adquieran mayor espesor, ya que son facies permeables confinadas bajo materiales turbidíticos potentes.
 - Carbonatos del Complejo Alpujárride.- De edad predominantemente triásica, adquieren un considerable espesor especialmente en el Alpujárride Intermedio e Inferior.
 - Peridotitas de Ronda y cortejos de rocas básicas asociadas.- Se encuentran ligadas a las unidades del Alpujárride Superior y constituyen masas tabulares de grandes dimensiones. También existen evidencias geofísicas de su presencia bajo el Mar de Alborán.
 - Rocas ultrabásicas y básicas del Complejo Nevado-Filábride.- Son muy abundantes, pero parecen distribuirse en masas de volumen reducido. No se consideran de interés otros términos litológicos del Complejo Nevado-Filábride.

Posibles formaciones confinantes:

- Los principales tramos litológicos impermeables de la Zona Interna son los potentes micaesquistos paleozoicos del Complejo Alpujárride, que pueden confinar posibles almacenes en carbonatos de unidades alpujárrides infrayacentes, así como en carbonatos triásicos de las Unidades Frontales recubiertas tectónicamente por el Alpujárride. Habría que investigar en detalle los frentes de las zonas de mayor desplazamiento tectónico de las unidades alpujárrides. También pueden servir de sello de almacenes de materiales del Complejo Nevado-Filábride.
- El Paleozoico maláguide también puede constituir un buen tramo confinante, sobre carbonatos alpujárrides o sobre materiales de las Unidades Frontales recubiertas tectónicamente por el Maláguide.
- Arcillas y evaporitas triásicas de la parte superior de la Fm. Saladilla (Maláguide). Posible confinamiento de otros tramos potencialmente permeables del Triásico.
- Cretácico maláguide.- Mayoritariamente margoso, puede servir de confinamiento para las calizas jurásicas.
- Grupo Ciudad Granada (Terciario maláguide).- Mayoritariamente turbidítico (Fm. Pliego), es posible confinamiento de almacenes en carbonatos del Eoceno y en la Fm. Bosque.
- Grupo Viñuela.- Predominantemente lutítico, yace generalmente en discordancia sobre las unidades superiores de las Zonas Internas (Maláguide y Alpujárride Superior).

3.3.2 ZONA EXTERNA

En la Zona Externa son muy numerosas las formaciones litoestratigráficas que merecen especial atención desde el punto de vista del almacenamiento de CO₂, unos por sus posibilidades como almacén y otros por sus posibilidades como capa confinante.

En una fase posterior de investigación habría que seleccionar estructuras trampa en el subsuelo que permitieran la ubicación del conjunto confinante-almacén en la profundidad adecuada. Especial atención merecen a priori las abundantes estructuras diapíricas.

Posibles formaciones almacén:

- Areniscas y conglomerados del Buntsandstein.- Presentes en gran parte del Prebético y en la Cobertera Tabular. Se encuentran generalmente a gran profundidad en el Prebético, y a poca profundidad en gran parte de la Cobertera Tabular.
- Dolomías del Muschelkalk.- En el Prebético el espesor es reducido al aproximarse a la Cobertera Tabular, donde se encuentran ausentes. En el Subbético se encuentran también incorporadas a la base de muchas láminas cabalgantes, y adquieren un desarrollo excepcional en el Penibético, donde la Fm. Meleguetín, con gran cantidad de anhidrita, supera los 250 m de espesor.
- Carbonatos del conjunto (Retiense)-Hettangiense-Lías pre-domeriense.- Extendidos por la práctica totalidad de la Zona Externa, su espesor supera generalmente el centenar de metros, llegando a alcanzar el millar de metros en algunos puntos del Subbético Externo.
- Tramos carbonatados y arenosos en el Paleógeno del Prebético.- Son característicos de la parte septentrional del Prebético de Murcia, Albacete y Alicante.
- Carbonatos del Dogger.- Con potencias superiores al centenar de metros en el Prebético y el Dominio Intermedio, en muchos sectores del Subbético presenta espesor reducido (incluyendo las facies condensadas del Malm), llegando a estar ausentes en el Subbético Medio.
- Tramos carbonatados y tramos arenosos del Cretácico en el Prebético.- La serie cretácica del Prebético presenta diversos tramos litológicos favorables (incluyendo las Arenas de Utrillas), pero con frecuentes cambios laterales de facies y de espesor muy bruscos que requieren estudios de detalle. Pasan a facies más margosas hacia el S y SE.
- Materiales del relleno de las Cuencas Postorogénicas Intramontañosas.- Se requieren estudios particulares de cada una de las cuencas para determinar con precisión los términos de la serie que ofrecen posibilidades como almacén, teniendo en cuenta sus características y su ubicación y profundidad. En principio, los términos detríticos basales del relleno de estas cuencas ofrecen condiciones favorables (en los sectores centrales de cada cuenca), y quizás haya cuencas con otros tramos favorables.
- Acumulaciones importantes de materiales volcánicos.- Especialmente en el sector del Cabo de Gata, donde un sondeo ha perforado más de 1.000 m de tobas

y cenizas volcánicas recientes. También pueden tener interés, dudoso, las manifestaciones volcánicas principalmente mesozoicas del Subbético Medio.

Posibles formaciones confinantes:

- Triásico en facies Keuper, arcilloso-evaporítico y/o evaporitas retienses y liásicas.- El Keuper está presente en toda extensión de la Zona Externa, sirviendo de confinamiento a posibles almacenes en términos inferiores de la serie estratigráfica o en materiales más modernos cabalgados por láminas con nivel de despegue triásico. Solamente está ausente en zonas puntuales y en sectores de láminas cabalgantes con nivel de despegue más alto en la serie estratigráfica. En algunos sectores del Prebético los sondeos indican que a este tramo se le añade un conjunto evaporítico retiense-liásico situado inmediatamente encima y que puede adquirir potencia considerable.
- Tramo predominantemente margoso del Lías Superior.- Ausente solamente en algunos sectores del Prebético y en el Penibético, aunque en algunos sectores su espesor se reduce considerablemente.
- Conjunto Cretácico-Paleógeno en el Subbético.- Es una potente serie de litología compleja, pero predominantemente margosa o arcillosa que puede constituir un magnífico confinamiento de posibles almacenes en carbonatos jurásicos. En el Subbético Medio este conjunto incorpora también buena parte del Jurásico y presenta sectores con abundancia de intercalaciones volcánicas que pueden alcanzar espesores acumulados de cientos de metros. En sectores puntuales algunos tramos de la serie incorporan olistolitos y olistostromas que pueden constituir posibles almacenes confinados entre facies predominantemente turbidíticas, pero su prospección en profundidad es muy difícil.
- Tramos lutíticos o margosos del Cretácico y Paleógeno en el Prebético.- La distribución vertical y espacial de facies permeables e impermeables de este intervalo estratigráfico en el Prebético es muy compleja y presenta cambios laterales de facies y de espesor muy bruscos que requieren estudios de detalle.
- Margas del Burdigaliense-Tortonense.- En el Prebético se disponen a techo de la serie, mientras en el Subbético constituyen la matriz de los Complejos Caóticos Subbéticos y el Complejo Olistostrómico del Guadalquivir, donde pueden constituir un buen confinamiento de posibles almacenes en formaciones inferiores o en olistolitos incluidos en su seno.
- Materiales del relleno de las Cuencas Postorogénicas Intramontañosas.- En principio, los términos litológicos del centro de las cuencas son mayoritariamente lutíticos en la mayor parte de la serie, con episodios más o menos importantes de carbonatos y/o evaporitas, de forma que el relleno de estas cuencas puede constituir, a priori, un buen confinamiento en los sectores centrales de cada una para posibles almacenes en materiales más antiguos o en posibles tramos permeables del interior de estas cuencas. Los dos sondeos profundos de la Cuenca del Bajo Segura (nº 9 y 11) revelan un espesor de relleno eminentemente lutítico del orden del millar de metros, con algunas intercalaciones notables de anhidrita.

3.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN LA CORDILLERA BÉTICA

3.4.1 PREBÉTICO Y SUBBÉTICO

Confinante 1: Tramos lutíticos del Cretácico-Paleógeno y relleno reciente de cuencas intramontañosas.

- **Espesor:** Muy variable. En algunas cuencas intramontañosas el relleno reciente puede alcanzar el millar de metros (dato no contrastado por carencia de información de sondeos). En cuanto a los tramos intercalados en la serie cretácico-paleógena, pueden tener desde unas decenas a varios centenares de metros.
- **Profundidad base:** Desde 0 a más de 1.000 m.
- **Continuidad:** Las series cretácico-paleógenas presentan frecuentes cambios laterales de facies, de forma que la continuidad de las facies lutíticas queda restringida a áreas discretas. El relleno de cuencas intramontañosas se limita a dichas cuencas, en algunas de las cuales no alcanza el espesor adecuado.
- **Observaciones:** Los sondeos de los que se dispone información no perforan estos materiales a la profundidad adecuada, pero los datos regionales indican que pueden encontrarse en el rango de profundidad apropiado.

Almacén 1: Carbonatos del Jurásico y Cretácico inferior.

- **Espesor:** Aunque en afloramiento su espesor es menor, en la mayoría de los escasos sondeos disponibles constituyen un conjunto único de 500 a 1.200 m con intercalaciones lutíticas menores. En algunos sectores del Subbético (Nueva Carteya) el espesor supera los 2.400 m.
- **Profundidad techo:** En los escasos sondeos disponibles se encuentra entre 300 y 800 m, pero resulta evidente que habrá sectores donde la profundidad aumente considerablemente.
- **Continuidad:** Los carbonatos jurásicos se encuentran presentes en la práctica totalidad de la zona (salvo en el Subbético Medio), pero los datos de superficie indican que suelen encontrarse divididos por, al menos, un tramo margoso importante, el Lías medio-superior.
- **Observaciones:** Los materiales cretácicos del techo del tramo incorporan con frecuencia términos arenosos cuyo espesor se suma al del conjunto carbonatado permeable.

Confinante 2: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper y evaporitas del Lías en sectores del Prebético.

- **Espesor:** Muy variable. Los sondeos solamente alcanzan este tramo en parte del Prebético, donde oscila entre 400 y 800 m de Keuper. El sondeo que perfora 400 m de Keuper (Carcelén) atraviesa también 1.100 m de evaporitas liásicas que descansan sobre él, dando un espesor conjunto de 1.500 m.
- **Profundidad base:** Desde 0 a más de 2.500 m.
- **Continuidad:** El Keuper parece estar presente en la práctica totalidad del dominio, si bien localmente su espesor puede reducirse considerablemente (fundamentalmente por causas tectónicas). En cuanto al Lías evaporítico, solamente se ha encontrado en un sondeo situado en el sector más septentrional del Prebético.
- **Observaciones:** Posible confinamiento a favor de superficies de cabalgamiento.

Almacén 2: Areniscas del Buntsandstein y dolomías del Muschelkalk.

- **Espesor:** Solamente hay dos sondeos que atraviesan parcial o totalmente este tramo (ambos en el Prebético): 200 m de areniscas del Bunt y unos 20 m de dolomías del Muschelkalk a techo (en el otro sondeo son 70 m de dolomías, pero la perforación finaliza tras atravesar unos pocos metros de areniscas).
- **Profundidad techo:** En los escasos sondeos disponibles se encuentra entre 1.800 y 2.500 m.
- **Continuidad:** Solamente se encuentran en el Prebético, ya que las series del Subbético comienzan en el nivel de despegue constituido por el Keuper.

3.4.2 CAMPO DE GIBRALTAR

Confinante: Flysch terciario predominantemente lutítico.

- **Espesor:** En torno al millar de metros.
- **Profundidad base:** 1.100 a 1.300 m en los sondeos.
- **Continuidad:** Se extiende por toda la zona.
- **Observaciones:** Consta de una alternancia de lutitas y areniscas con sectores de gran complejidad tectónica. Su utilidad como confinante es reducida en los sectores con gran proporción de tramos arenosos y en los muy tectonizados.

Almacén 1: Niveles de areniscas de mayor espesor dentro del Flysch.

- **Espesor:** En los sondeos del sector situado al NO de Tarifa se atraviesan al menos dos tramos arenosos de 75 a 100 m de espesor confinados entre tramos arcillosos.
- **Profundidad techo:** en torno a 900-1.000 m.
- **Continuidad:** Han sido atravesados en el sector del NO de Tarifa, pero no en los demás sectores.
- **Observaciones:** Dada la constitución litológica y estructural del Flysch resulta muy complicado comprobar la continuidad lateral de estos tramos más potentes.

Almacén 2: Calizas y dolomías del Jurásico hasta el Cretácico Superior.

- **Espesor:** 800 m en los sondeos que las atraviesan.
- **Profundidad techo:** 1.100 – 1.300 m.
- **Continuidad:** Solamente se han perforado en el sector oriental de la zona (Guadiaro).
- **Observaciones:** Inmediatamente por debajo de este tramo se encuentra un potente (más de 1.400 m) tramo de evaporitas y arcillas triásicas cuya base supera ampliamente los 3.000 m de profundidad, de manera que solamente puede servir de confinamiento a almacenes ubicados en esporádicas intercalaciones carbonatadas existentes en su seno.

3.4.3 CUENCA DEL BAJO SEGURA

Confinante: Lutitas del Messiniense-Pliocuaternario.

- **Espesor:** 800-1.400 m.
- **Profundidad base:** 800-1.400 m.
- **Continuidad:** Se extiende por toda la cuenca.
- **Observaciones:** En ocasiones la base es arenosa e incluso conglomerática, en cuyo caso dicho tramo basal permeable se sumaría al espesor de posibles tramos permeables infrayacentes.

Almacén: Carbonatos alpujárrides atribuidos al Triásico.

- **Espesor:** 200-400 m en los sondeos reconocidos.
- **Profundidad techo:** 800-1.400 m.
- **Continuidad:** Difícil de conocer, por el recubrimiento terciario de la cuenca.
- **Observaciones:** Este tramo podría constituir un posible almacén en sectores con un espesor mucho mayor (a falta de datos de permeabilidad, en principio no se considera que un espesor de 200-400 m sea suficiente).

3.4.4 ALPUJÁRRIDE, MALÁGUIDE Y UNIDADES FRONTALES

Confinante 1: Tramos lutíticos de rellenos de cuencas cenozoicas, Grupo Viñuela y Grupo Ciudad Granada (Fm. Pliego). O bien recubrimientos tectónicos por unidades del Complejo del Campo de Gibraltar.

Presentes sólo de forma local, muy discontinua. En sectores muy localizados el conjunto puede tener suficiente espesor, pero generalmente no supera los 300 m. Los recubrimientos tectónicos se limitan principalmente a los bordes de la zona, pero pueden adquirir espesores notables.

Almacén 1: Areniscas, conglomerados y calizas de la Fm. Bosque (Oligoceno maláguide) y carbonatos del Eoceno maláguide.

En el sector de Sierra Espuña estos tramos adquieren gran desarrollo y se disponen (en conjunto) bajo potentes turbiditas. En el resto de la zona los afloramientos son más escasos y reducidos.

Confinante 2: Cretácico margoso maláguide.

Aflora escasamente, pero en los sectores donde presenta más desarrollo puede servir de confinamiento a las calizas jurásicas del Maláguide.

Almacén 2: Jurásico maláguide carbonatado.

Es posiblemente el tramo con más posibilidades en el Maláguide por su extensión y espesor.

Confinante 3: Arcillas y evaporitas triásicas de la parte superior de la Fm. Saladilla.

Presentes en gran parte de los afloramientos del Maláguide. Situados a techo de tramos permeables (carbonatos, areniscas y conglomerados) de la misma formación.

Almacén 3: Parte inferior del Triásico maláguide: Conglomerados, areniscas y dolomías de la Fm. Saladilla.

Conjunto detrítico coronado por carbonatos que se halla presente en la práctica totalidad de los afloramientos del Maláguide.

Confinante 4: Paleozoico maláguide en su conjunto.

A pesar de contener tramos areniscosos y carbonatados a veces de gran desarrollo, el conjunto es eminentemente lutítico y dichos tramos se encuentran muy cementados y con porosidad seguramente muy reducida. La sucesión paleozoica en general puede servir de confinamiento a almacenes situados en unidades cabalgadas (Alpujárride o Unidades Frontales).

Almacén 4: Carbonatos alpujárrides y de las Unidades Frontales.

Se trata de sucesiones eminentemente carbonatadas que pueden superar el millar de metros de espesor. Como confinante ha de recurrirse principalmente a los tramos pelíticos de las unidades tectónicas que los recubren (fundamentalmente Maláguide o la base de otras unidades alpujárrides), descartando sus zonas de afloramiento.

Confinante 5: Tramos metapelíticos inferiores de las unidades alpujárrides.

Su espesor es con frecuencia superior al millar de metros. Se encuentran en la mayor parte del área y pueden servir de confinante para almacenes de unidades cabalgadas.

Almacén 5: Peridotitas alpujárrides.

Se encuentran aflorantes solamente en el extremo occidental de la zona, donde constituyen masas de grandes dimensiones.

4. CORDILLERA PIRENAICA

4.1 MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La formación de la Cordillera Pirenaica se debe al proceso de acercamiento y colisión oblicua de las placas Ibérica y Europea que tuvo lugar desde el Cretácico Superior al Mioceno. Durante el Mesozoico, el área Pirenaica fue sometida a condiciones distensivas intermitentes, reflejándose en procesos de extensión y adelgazamiento cortical, vulcanismo y desarrollo de cuencas sedimentarias fuertemente subsidentes. En el proceso de convergencia de placas se deformaron y elevaron los sedimentos mesozoicos acumulados en los márgenes de dichas placas y parte del basamento.

Desde un punto de vista geológico, dentro de esta Cordillera se distinguen los Pirineos y la Cordillera Cantábrica, separadas por la falla de Pamplona (figura 3.1). En los Pirineos se diferencian: la Zona Axial, la Zona Norpirenaica y la Zona Surpirenaica.

La Zona Axial coincide aproximadamente con el eje de la cadena, separando las zonas Norpirenaica y Surpirenaica. Está constituida por rocas del Precámbrico superior al Carbonífero, muy deformadas y afectadas por un metamorfismo desde alto grado a grado bajo o muy bajo. Durante el Ordovícico Superior se registraron numerosos episodios volcánicos y posteriormente a la deformación varisca importantes intrusiones ígneas, más importantes en los niveles estructurales inferiores. En discordancia sobre los materiales deformados durante la orogenia varisca se depositan materiales del Estefaniense-Pérmico, rellenando pequeñas cuencas postorogénicas.

Las zonas Norpirenaica y Surpirenaica están constituidas fundamentalmente por materiales postvariscos, aunque incorporan también porciones del basamento varisco en algunas láminas cabalgantes. La Zona Norpirenaica está limitada al Norte por la Cuenca de Aquitania y se encuentra mayoritariamente en territorio francés. La Zona Surpirenaica, en la vertiente española, se extiende hacia el sur hasta la cuenca del Ebro.

En la Zona Surpirenaica se diferencian tres sectores en función de sus características estratigráficas y tectónicas. La Zona Surpirenaica Oriental, que abarca desde el Mediterráneo hasta el río Segre, en la que se reconocen tres unidades alóctonas (Pedraforca, Bac Grillera-Biure y Figueres-Montgrí) y una cuarta formada por un basamento varisco con una cobertera del Cretácico terminal continental (facies Garum) y del Eoceno. La Zona Surpirenaica central, que se extiende desde el río Segre hasta el Cinca, en la que se diferencian dos grandes unidades alóctonas septentrionales (Boixols y Montsec) y una tercera más inferior y meridional (Sierras Marginales) que cabalga hacia el sur, llegando a afectar a materiales del Mioceno inferior. La Zona Surpirenaica occidental se localiza entre el río Cinca y la Falla de Pamplona; incluye la cuenca de Jaca-Pamplona, la cual está rellena por sedimentos del Eoceno y se encuentra limitada al norte por las Sierras Interiores y al sur por las Sierras Exteriores, en cuyo borde meridional se localiza el cabalgamiento frontal de los Pirineos sobre la Cuenca del Ebro.

La Cordillera Cantábrica se ha definido como el segmento de la Cordillera Pirenaica emergido y situado al oeste de la Falla de Pamplona. Se divide en zona Oriental o Cuenca Vasco-Cantábrica, zona central o Macizo Asturiano y zona occidental (figura 4.1). La zona oriental o Cuenca Vasco-Cantábrica está formada principalmente por

rocas mesozoicas, mientras que las zonas central y occidental están constituidas fundamentalmente por materiales paleozoicos y precámbricos, exceptuando una estrecha orla de afloramientos mesozoicos situada al norte y al sur de la cordillera.

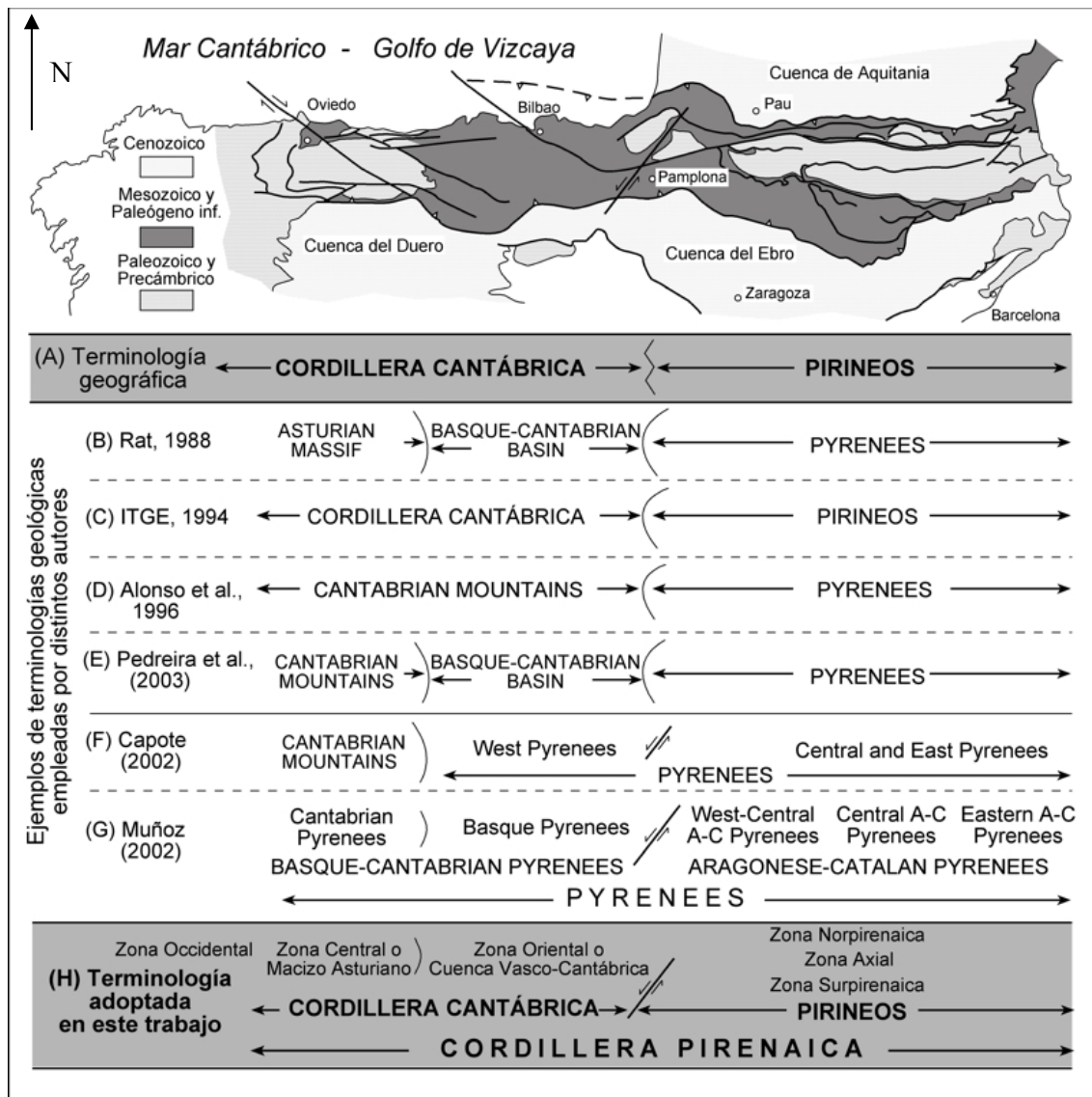


Figura 4.1 Terminología geográfica y ejemplos de terminologías geológicas de la Cordillera Pirenaica (Barnolas y Pujalte, 2004).

4.1.1 PIRINEOS

Un esquema estructural de los Pirineos con las distintas zonas diferenciadas, así como varios cortes geológicos de la vertiente española de los Pirineos, aparecen, respectivamente, en las figuras 4.2 y 4.3.

ZONA NORPIRENAICA

Está constituida por una serie de afloramientos del basamento varisco desenraizados (Macizos Norpirenaicos), por los macizos paleozoicos vascos de Cinco Villas y Ursuya y por los afloramientos del Mesozoico plegados incluyendo las facies turbidíticas del Cretácico Superior. El límite meridional de esta zona es la Falla Norpirenaica, que es

una franja más o menos estrecha que se reconoce en toda la vertiente francesa de los Pirineos y se prolonga hacia el oeste en territorio español por los macizos vascos hacia el sinclinorio de Bilbao.

ZONA AXIAL Y MACIZOS VASCOS

La Zona Axial es el extenso afloramiento varisco que se encuentra inmediatamente al Sur de la Zona de la Falla Norpirenaica. Es una elevación de basamento con vergencia sur, con cabalgamientos alpinos que involucran al basamento de la Zona Axial y parte de su cobertera mesozoica.

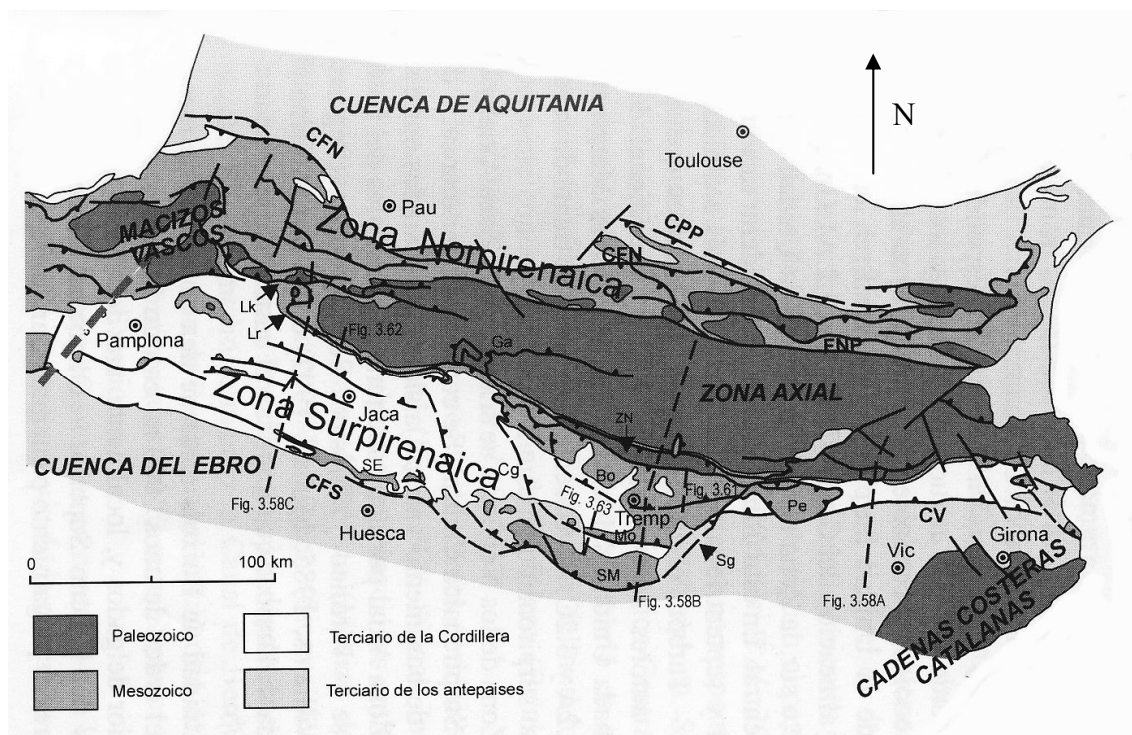


Figura 4.2 Esquema estructural de los Pirineos. Denominación de las principales estructuras: CFS: Cabalgamiento Frontal Surpirenaico, CFN: Cabalgamiento Frontal Norpirenaico, CPP: cabalgamiento de los *Petites Pyrénées*, Lk: cabalgamiento de Lakora, Lr: cabalgamiento de Larra, SE: Sierras Exteriores, Ga: cabalgamiento de Gavarnie, ZN: Zona de las Nogueres, Bo: cabalgamiento de Bóixols, Mo: cabalgamiento del Montsec, SM: Sierras Marginales, Sg: Zona de rampas oblicuas del Segre (límite entre los Pirineos orientales y centrales), Cg: Zona de rampas oblicuas del Cinca (límite occidental de la Unidad Surpirenaica Central), Pe: manto del Pedraforca, CV: cabalgamiento de Vallfogona. (Barnolas y Pujalte, 2004)

ZONA SURPIRENAICA

Esta zona está constituida por los materiales post-variscos de vergencia sur que forman la cobertera de la Zona Axial y que se encuentran entre la Falla Norpirenaica y el Frente de Cabalgamiento Surpirenaico (las láminas cabalgantes pueden incluir porciones del basamento varisco). Dentro de ésta se consideran tres subzonas delimitadas por las alineaciones estructurales del Segre, del Cinca y de Pamplona:

- la Zona Surpirenaica Oriental, comprendida entre el mar Mediterráneo y la alineación del Segre; en ella se diferencian la Unidad del Pedraforca, la Unidad de Bac Grillera-Biure, la Unidad de Figueres-Montgrí y la Unidad del Cadí,

- la Zona Surpirenaica Central, abarca desde la estructura del Segre a los afloramientos mesozoicos y cenozoicos del valle del Cinca; en ella se distinguen la Zona de los Nogueros y la Unidad Surpirenaica Central,
- la Zona Surpirenaica Occidental, que se corresponde aproximadamente con la Cuenca de Jaca-Pamplona. Su límite oriental es la Unidad Surpirenaica Central y su límite occidental la Falla de Pamplona; dentro de ella se distinguen varios dominios: las Sierras Interiores, el dominio del flysch, las depresiones margosas de la Canal de Berdún o Val Ancha y de Pamplona, el sinclinorio del Guarga y las Sierras Exteriores.

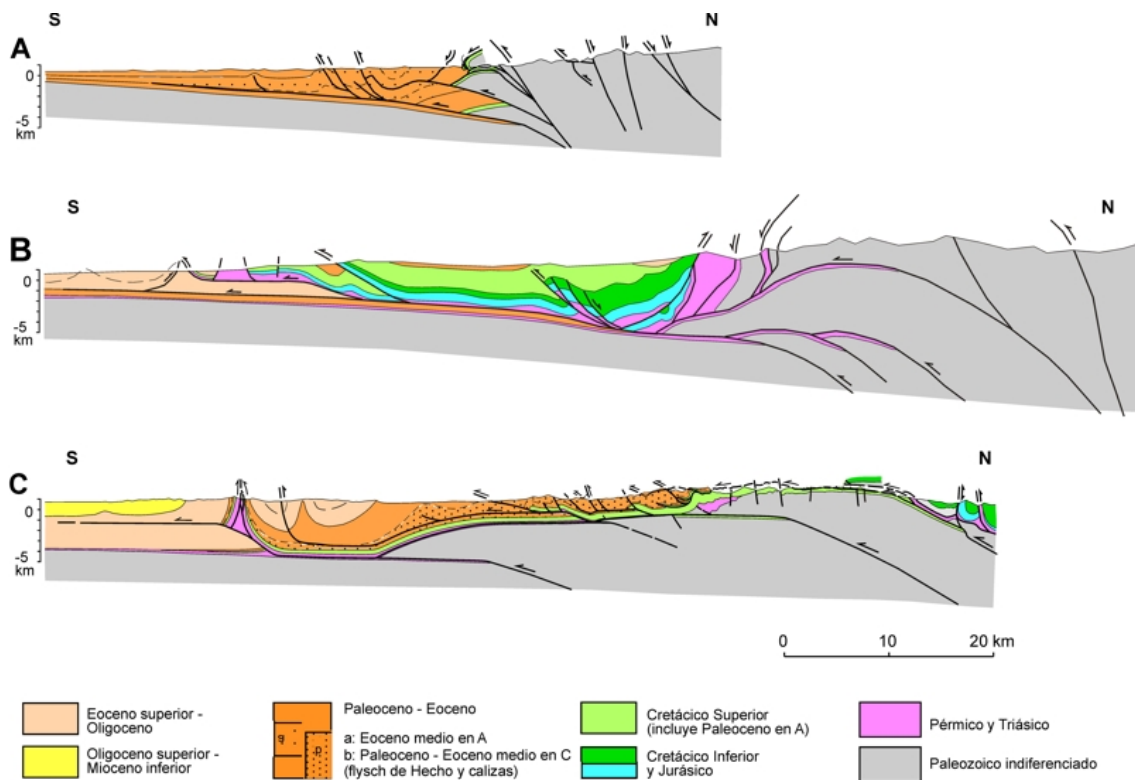


Figura 4.3 Cortes geológicos representativos de la vertiente española de los Pirineos (ver Fig. 4.2 para su localización). A: Corte a través de los Pirineos orientales, por los valles del Ter y Freser; B: Corte de los Pirineos centrales por el valle del Noguera Pallaresa (sector de Tremp-Graus); C: Corte de los Pirineos centrales por el sector de Jaca-Pamplona. (Teixell, 2004).

4.1.2 CORDILLERA CANTÁBRICA

La Cordillera Cantábrica comprende el segmento de la Cordillera Pirenaica emergido y situado al oeste de la Falla de Pamplona. Se subdivide a su vez en Zona Oriental o Cuenca Vasco-Cantábrica, Zona Central o Macizo Asturiano y Zona Occidental (figura 4.1).

CUENCA VASCO-CANTÁBRICA

La Cuenca Vasco-Cantábrica abarca el oeste de Navarra, el País Vasco, el norte de Burgos y Palencia y gran parte de Cantabria. Se caracteriza principalmente por las potentes series sedimentarias que presenta, especialmente las del Cretácico. En función de estas características se distinguen tres dominios: la Plataforma Norcastellana, el Surco Navarro-Cántabro y el Arco Vasco (figura 3.4). En la figura 3.5 se muestra un cuadro cronoestratigráfico sintético de la sucesión Mesozoica y Terciaria de la Cuenca Vasco-Cantábrica con las características distintivas de sus tres

dominios. La Plataforma Norcastellana representa el sector proximal del margen noribérico Cretácico-Paleógeno, el Surco Navarro-Cantabro el sector distal y el Arco Vasco fue, a partir del Cretácico medio, una depresión interplacas con importantes episodios volcánicos entre el Albiense superior-Santoniense, en la que se acumularon potentes series turbidíticas durante el Albiense superior-Eoceno.

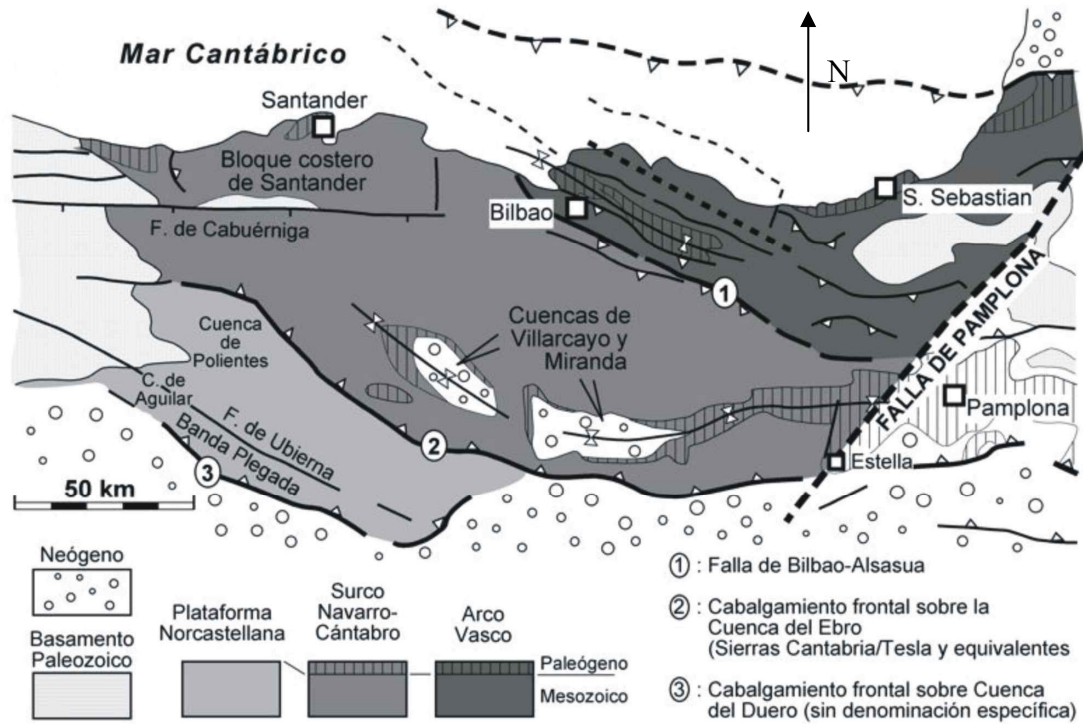


Figura 4.4 Esquema de división de la Cuenca Vasco-Cantábrica (Barnolas y Pujalte, 2004) .

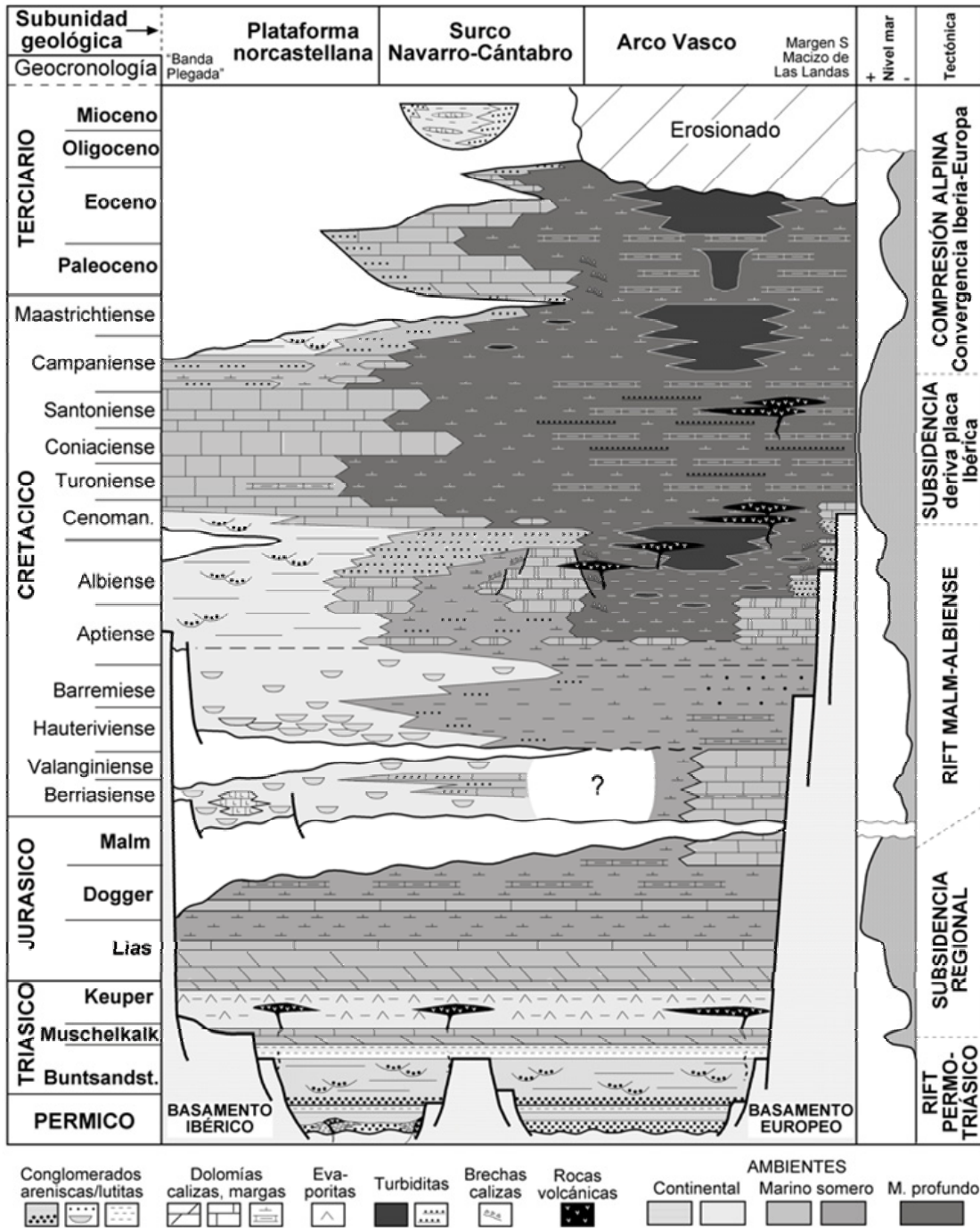


Figura 4.5 Esquema cronoestratigráfico simplificado de la sucesión Mesozoico-Terciaria de la Cuenca Vasco-Cantábrica. (Barnolas y Pujalte, 2004).

ZONA CENTRAL O MACIZO ASTURIANO

La Cordillera Cantábrica central, o Macizo Asturiano, representa una parte del Macizo Ibérico afectada por deformaciones alpinas. En esta zona, la cobertera postvarisca

quedó en gran parte erosionada tras la elevación alpina, quedando tan sólo retazos en dos bandas de afloramientos localizadas al norte y sur de la cordillera.

4.2. SONDEOS PETROLÍFEROS

4.2.1. PIRINEOS

Son muy numerosos los sondeos de investigación de hidrocarburos en la vertiente surpirenaica. Evitan el Paleozoico de la Zona Axial y se concentran especialmente en la Unidad Surpirenaica Central (figura 3.5). Señalamos a continuación una selección de los más representativos de cada zona. En la Zona Surpirenaica Oriental no existen sondeos petrolíferos.

ZONA SURPIRENAICA CENTRAL

Isona-1 bis (nº 332)

Hasta 2.150 m se encuentra una potente serie carbonatada con intercalaciones margosas menores (la principal, liásica, de 60-80 m, a una profundidad próxima a los 2.000 m) que comprende el Cretácico Superior, un Cretácico Inferior muy reducido, el Jurásico completo y el Retiense. Debajo, unos 1.000 m de Keuper arcilloso evaporítico que engloban un tramo dolomítico de unos 50 m (posiblemente Muschelkalk) y un tramo de 100 m de calizas y arcillas eocenas, seguramente asociados a una intensa tectonización.

Boixols-1 (nº 179)

Perfora 2.168 m en Cretácico Inferior predominantemente margoso que incluye un tramo calcáreo de unos 300 m de espesor entre 696 y 1.022 m. Repetición de parte de la serie por falla.

Comiols-1 (nº 571)

Carbonatos del Cretácico Superior, Inferior y Jurásico hasta 2.327 m, con un tramo margoso liásico de unos 100 m en torno a 2.000 m de profundidad. El conjunto cabalga sobre otro intervalo carbonatado cretácico-Jurásico con base en el Keuper a 3.551 m, donde reposa sobre un conjunto margoevaporítico eoceno.

Eriña-1 (nº 262)

Carbonatos cretácicos (fundamentalmente Cretácico Inferior) hasta 1.428 m, donde un tramo eminentemente anhidrítico situado a techo del Jurásico se prolonga hasta unos 2.100 m, sobre carbonatos del resto de la serie jurásica, que finalizan en evaporitas del Keuper a unos 3.000 m. El único tramo arcilloso destacable son unos 100 m de margas liásicas entre 2.700 y 2.800 m.

Cajigar-1 (nº 344)

884 m de margas eocenas con abundantes niveles arenosos sobre Calizas de Alveolinas ilerdienses que reposan a 974 m sobre el Garum arcilloso con niveles de arenas, yesos y calizas. Éste reposa a 1.277 m sobre calizas arenosas del Cretácico Superior que a 1.462 m pasan a margas con intercalaciones arenosas. Por debajo, a 1.745 m, un potente conjunto carbonatado alcanza los 2.594 m, incluyendo el resto del Cretácico Superior un reducido Cretácico Inferior y buena parte del Jurásico (Dogger y Malm). El Lías es una alternancia de margas y calizas y se encuentra tectonizado y

replegado, repitiéndose la serie jurásica por despegue a favor de dicho tramo y del Retiense evaporítico.

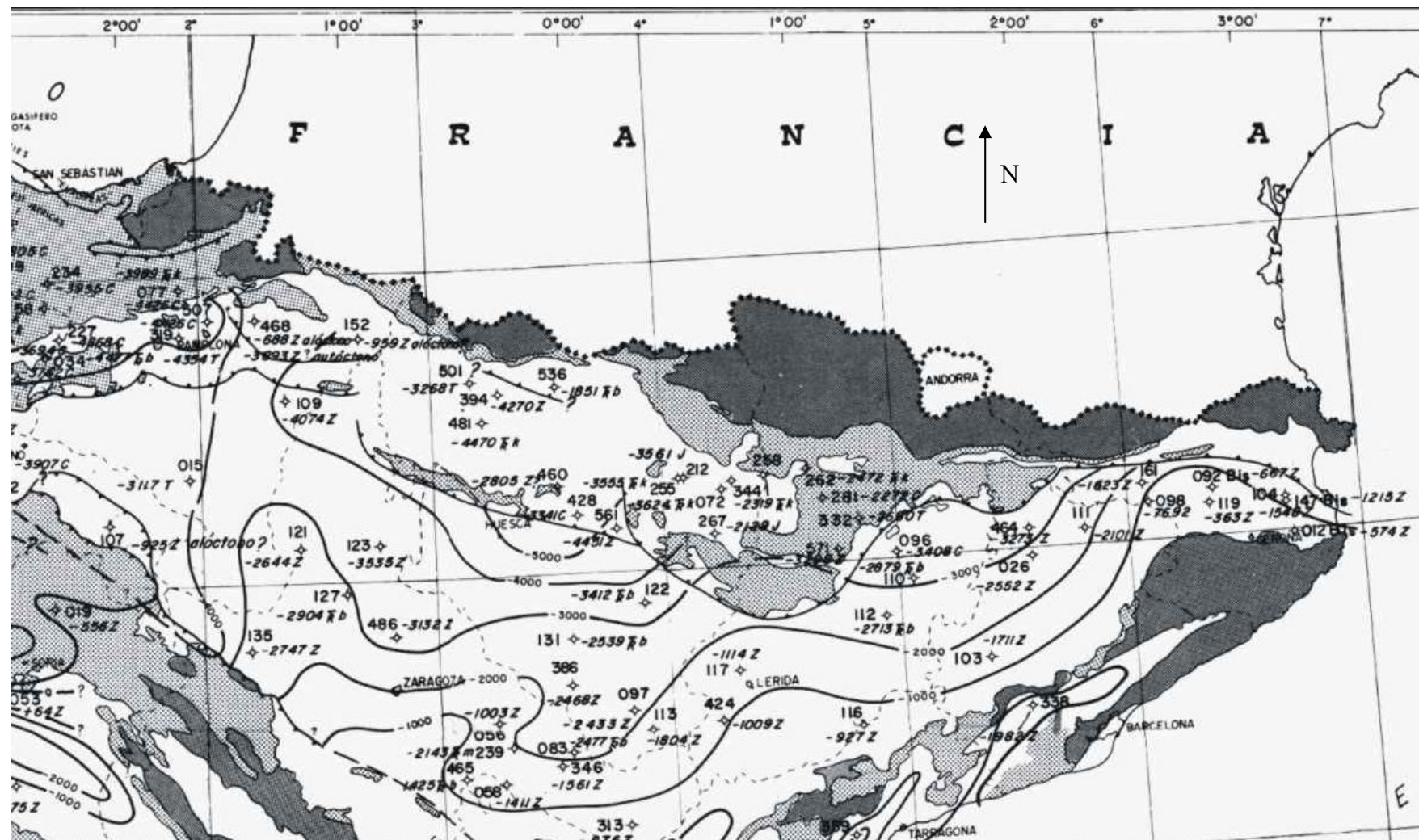


Figura 4.6 Mapa de isobatas del techo del Paleozoico con situación de los sondeos petrolíferos principales (datum nivel del mar). (Extracto de I.G.M.E., 1987)

Monesma-1 (nº 72)

Situado muy próximo al Sur del anterior, la serie es muy similar, pero con notables diferencias de espesor. Las Calizas de Alveolinas se encuentran más altas (entre 656 y 730 m), el Garum es más potente y contiene abundante anhidrita, y las calizas arenosas y areniscas del Cretácico Superior se encuentran entre 1.181 y 1.380 m. El tramo margoso cretácico es más potente y alcanza los 2.915 m, llegando hasta 4.358 m el conjunto carbonatado que comprende el resto del Cretácico Superior y el Jurásico Superior y medio, con una escasa representación de Cretácico Inferior.

Centenera-2 (nº 255)

Alternancia de arcillas y areniscas lutecienses hasta 550 m, sobre conjunto carbonatado también Luteciense que, con intercalaciones margosas menores, supera los 1.800 m de profundidad, comprendiendo el Garum (con tramo arcilloso reducido) y las areniscas y calizas arenosas del techo del Cretácico. Debajo, un potente tramo eminentemente margoso de unos 400 m de espesor por debajo del cual el Cretácico Superior continúa con facies predominantemente carbonatadas a lo largo de otros 1.800 m aproximadamente, hasta un tramo de dolomías del Malm a 4.144 m que a 4.240 m reposan sobre el Keuper.

Centenera-1 (nº 212)

Muy próximo al anterior, a pesar de lo cual el Cretácico Superior es totalmente calcáreo (y arenoso a techo), sin el potente tramo margoso intermedio. Se prolonga desde 1.721 m (bajo el Garum) hasta 4.305 m, donde se encuentra el Keuper, siendo los 200 m basales del Jurásico Superior y Cretácico Inferior. El confinamiento en este caso puede proporcionarlo el Eoceno (por encima de 1.392 m), que es predominantemente margoso, al contrario que en el anterior sondeo.

Graus-1 (nº 240)

1.600 m de margas lutecienses con intercalaciones de arenas, muy abundantes por debajo de los 1.000 m, sobre unos 170 m de calizas y dolomías paleocenas. Entre 1.768 m y 1.851 m, margas con pasadas calcáreas del Garum sobre un potente conjunto de calizas del Cretácico Superior (hasta el final del sondeo, a 2.989 m), arenosas a techo.

Benabarre-1 (nº 153)

981 m de serie carbonatada que incluye 558 m de Cretácico Superior, unos 100 m de Cretácico Inferior y el resto Jurásico, con un único tramo margoso destacable, de unos 80 m en el Lías superior. Bajo la serie carbonatada el sondeo atraviesa más de 300 m de anhidrita y debajo arcillas y evaporitas del Keuper hasta su terminación a 1.708,5 m.

ZONA SURPIRENAICA OCCIDENTAL

Huesca-1 (nº 561)

832 m de conglomerados, areniscas y arcillas oligo-miocenos sobre un conjunto eminentemente carbonatado paleoceno-eoceno que a unos 1.240 m yace sobre 300 m de arcillas y evaporitas del Garum. Entre 1.551 y 1.889 m, calizas del Cretácico Superior. Un tramo de ofitas masivas se extiende hasta 2.212 m, testimoniando la presencia de Keuper. Es la base de un cabalgamiento, por debajo del cual se repite parcialmente la serie cretácico-eocena varias veces en posición primero invertida, luego normal y nuevamente invertida, debido a la presencia de pliegues. El sondeo

termina al final de esta repetición con el Cretácico Superior discordante sobre el Paleozoico a 5.044 m.

Ebro-3 (nº 428)

600 m de conglomerados miocenos con intercalaciones de arcillas y lutitas yacen sobre un conjunto carbonatado que se prolonga hasta 3.065 m y abarca el Cretácico Superior, Paleoceno y parte del Eoceno. Las intercalaciones arcillosas destacables son dos, una de menos de 50 m (entre 950 y 1.000 m), atribuida al Paleoceno, y otra entre 1.400 y 1.530 m, intercalada en el Cretácico Superior carbonatado. La serie se repite por un cabalgamiento, pero con características diferentes: caliza eocena entre 3.065 y 3.115 m, margas y arcillas (y evaporitas) paleocenas hasta 3.225 m y arcillas con abundantes niveles arenosos hasta el final del sondeo, a 4.003 m (Garum).

Surpirenaica-1 (nº 460)

El sondeo comienza con unos 800 m de margas eocenas con potentes intercalaciones de calizas y menores de areniscas; debajo, un potente tramo de calizas con areniscas en los 200 m superiores atribuido al Paleoceno y Cretácico Superior alcanza los 2.215 m. Presenta un intervalo arcilloso de unos 50 m en torno a 1.650 m de profundidad atribuido a parte del Garum. Debajo se encuentra un conjunto arcilloso de unos 900 m con abundantes evaporitas y masas de ofita. Se trata del Keuper, que a 3.110 m descansa sobre una barra dolomítica (Muschelkalk) de 170 m. El sondeo finaliza con un Buntsandstein arcillo-arenoso de 130 m, discordante sobre el Paleozoico a 3.410 m.

Boltaña-1 (nº 13)

El sondeo perfora 2.124 m de calizas con algún tramo menor de areniscas. Corresponde a una serie replegada que comprende el Eoceno Inferior, Paleoceno y Cretácico Superior.

Broto-1 (nº 536)

Perfora el Flysch eoceno hasta 1.172 m, consistente mayoritariamente en areniscas con cemento carbonatado e intercalaciones margosas. Debajo, calizas, areniscas y dolomías en un conjunto que alcanza los 2.613 m y que corresponde mayoritariamente al Cretácico Superior, siendo atribuidos los 230 m superiores al Paleoceno-Eoceno y los 76 m inferiores al Muschelkalk. Por debajo, el sondeo termina a 2.743 m en un tramo arcilloso con intercalaciones arenosas atribuido al Buntsandstein.

Serrablo-1 (nº 394)

Perfora un espesor de Flysch eoceno próximo a los 3.000 m, al igual que los numerosos sondeos realizados en el entorno del yacimiento de gas del Serrablo, situado en las inmediaciones de Sabiñánigo (Huesca). Este tramo, eminentemente arcillo-margoso, presenta intercalaciones arenosas rítmicas de forma generalizada, y en su tercio inferior presenta, además, importantes tramos de calizas con resedimentaciones que corresponden a olistolitos denominados "megabrechas". Son estas megabrechas carbonatadas las que contienen el gas del yacimiento, confinado por los términos lutíticos del flysch. El sondeo continúa con un tramo calizo de 850 m (hasta 3.857 m) con un tramo arcilloso intermedio (Garum) entre 3.446 y 3.518 m. Un cabalgamiento produce la repetición de la serie carbonatada cretácico-eocena, que yace sobre el Triásico.

San Vicente-1 (nº 481)

El sondeo perfora inicialmente una potente alternancia lutitas-areniscas continentales oligocenas (Formación Campodarbe) hasta 1.906 m. Debajo, el Flysch eoceno hasta 4.496 m, con los 1.000 m superiores margosos y el resto arenoso y arcilloso. Debajo, un conjunto carbonatado Cretácico Superior-Eoceno Inferior que termina a 5.329 m sobre el Keuper y que contiene un Garum arcilloso reducido entre 5.100 y 5.165 m.

Roncal-1 (nº 152)

Tras unos 270 m de alternancia rítmica de margas y calizas lutecienses, conjunto carbonatado del Luteciense-Daniense-Cretácico Superior que a 790 m pasa a anhidrita con pasadas de arcilla (Keuper). Por debajo, a 890 m serie estefanopérmica de 900 m eminentemente arenosa con pasadas conglomeráticas y arcillosas. A 1.826 m descansa sobre caliza dolomítica devónica (hasta el final del sondeo, a 1.943,3 m).

Sangüesa-1 (nº 109)

3.106 m de Oligoceno continental margo-arcilloso con pasadas de areniscas, sobre casi 500 m de Eoceno marino eminentemente arcilloso con techo arenoso, intercalación anhidrítica y base calcáreo-margosa. Debajo, 1.000 m de areniscas, arcillas y conglomerados del estefanopérmico y Buntsandstein (entre 3.580 y 4.662 m) que reposan sobre caliza dolomítica devónica.

Aoiz-1 (nº 468)

Unos 400 m de margas alternantes con calizas y areniscas (Flysch eoceno) sobre unos 400 m de calizas, dolomías y areniscas que comprenden parte del Eoceno, Garum y techo del Cretácico. Casi 300 m de margas del Cretácico Superior dan paso a 1.057 m a unos 70 m de dolomías (Cretácico Superior) que yacen sobre arcillas del Cretácico Inferior con intercalaciones de areniscas. A 1.345 m reposan sobre el Paleozoico arcillo-arenoso, que cabalga sobre el Triásico arcilloso evaporítico 2.900 m más abajo (a 4.247 m). Unos 300 m más abajo está nuevamente el Paleozoico, bajo areniscas triásicas o pérmicas.

Pamplona Sur 1 (nº 102)

303 m de margas eocenas sobre unos 800 m de calizas del Cretácico Superior con algún tramo arenoso. Entre 1.088 y 1.560 m, Cretácico inferior arenoso a techo y progresivamente arcilloso hacia la base. 40 m de margas arenosas del Dogger sobre unos 60 m de margas del techo del Lías. El resto del Lías, hasta 1.771 m, son dolomías y calizas. Debajo, potente serie del Keuper arcilloso (casi 700 m perforados) con un tramo de sal de 325 m.

Astrain-1 (nº 319)

942 m de margas eocenas sobre cerca de 1.700 m de calizas (Turonense-Eoceno) con algún tramo arenoso intercalado. A 2.626 m comienza un potente tramo arcilloso con intercalaciones arenosas que da paso a 3.800 m a margocalizas y calizas jurásicas. Sobre anhidritas y arcillas retienses y triásicas que cabalgan sobre margas y calizas eocenas a 4.500 m.

4.2.2 CORDILLERA CANTÁBRICA

En la Cordillera Cantábrica los sondeos petrolíferos son bastante numerosos, estando concentrados principalmente en la mitad meridional de la Cuenca Vasco-Cantábrica. A continuación se describen los más representativos e interesantes de la zona.

Ajo-1 (nº 294)

Este sondeo alcanzó los 4.970m de profundidad. Los materiales atravesados son mayoritariamente de edad cretácica, salvo tres niveles fundamentalmente arcillosos triásicos, a favor de los cuales aparece repetida la serie cretácica. El sondeo comienza con una serie carbonatada aptiense-albiense hasta los 1.334m de profundidad; por debajo de ella aparece un tramo formado por arcillas, areniscas y calizas del Triásico de unos 115 m de espesor. Bajo este tramo aparecen de nuevo materiales cretácicos formados por un Cretácico Superior margoso y calizo-margoso y un conjunto Aptiense-Cenomaniense, mayoritariamente carbonatado situado entre 2.077 y 2.905m de profundidad. Por debajo aparece un tramo de unos 100 m de espesor constituido por arcillas y anhidritas triásicas. Por debajo de este tramo aparece de nuevo un tramo carbonatado Aptiense-Albiense y un tramo arcilloso y salino triásico de unos 200 m de potencia. Bajo este Triásico se repite de nuevo la serie cretácica Albiense-Cretácico Superior hasta el final del sondeo.

Castro Urdiales-1 Bis

El sondeo alcanzó una profundidad de 1.678 m. El sondeo comienza con 500 m de areniscas y arcillas del Weald sobre 175 m de calizas pertenecientes al Calloviense-Oxfordiense y al Valanginiense. Por debajo de éstas se encuentran unas calizas arcillosas entre los 775 m y los 895 m de profundidad del Dogger, y entre los 895 m y los 1000 m se atraviesa un tramo pelítico margoso del Lías. La serie continúa con un paquete carbonatado de unos 200 m de espesor de correspondiente al Infralías y al Lías. Por debajo de estas calizas se encuentra el Keuper, constituido por anhidritas, dolomías y arcillas. Por debajo de éste, a 1480 m de profundidad aparece de nuevo la serie jurásico-cretácica invertida, desde el Calloviense al Albiense.

Ancillo-1

Este sondeo atraviesa una serie mesozoica y alcanza materiales paleozoicos a 1.418 m de profundidad. El sondeo comienza atravesando unos 350 m de una alternancia de areniscas, arcillas y limolitas del Weald. Por debajo aparece un conjunto fundamentalmente carbonatado con algún tramo arcilloso y margoso intercalado correspondiente a los materiales del Cretácico inferior, Dogger y Lias. A unos 1.000 m de profundidad se encuentran unos 50 m de arcillas del Keuper sobre 350 m de areniscas con pasadas dolomíticas de edad triásica. Por debajo de éstas, desde los 1.418 m a los 1.530 m de profundidad máxima del sondeo, se atraviesan areniscas y arcillas paleozoicas.

Trespaderne (nº 567)

El sondeo alcanzó los 4.734 m de profundidad, atravesando 2.087 m de serie terciaria y el resto del sondeo materiales del Cretácico Superior. Los 1.560 m iniciales corresponden a margas y areniscas del Mioceno-Oligoceno. Por debajo, aparecen materiales del Eoceno medio-superior constituidos por calizas y areniscas con un tramo intermedio de margas, yesos y anhidritas, y un tramo dolomítico y calizo del Paleoceno-Eoceno inferior. La serie continúa, desde los 2.277 m a los 3.786 m, con un importante tramo carbonatado del Cretácico Superior. Bajo éste aparecen los materiales detríticos de la Fm. Utrillas hasta el final del sondeo.

Marinda-1 (nº 323)

La mayor parte de la serie atravesada por el sondeo pertenece al Cretácico Superior. Comienza el sondeo cortando 200 m de calizas margosas y 200 m de margas arcillosas del Coniaciense. Por debajo se atraviesan unos 400 m de calizas arcillosas del Turoniense, 1.300 m de margas del Cenomaniense que pasan a una alternancia de areniscas y arcillas de 400 m de espesor. Por debajo, a 2.500 m de profundidad aparecen materiales arcillosos y arenosos del Albiense hasta una profundidad de 4.800 m. La serie continúa con 350 m de calizas y areniscas del Aptiense, un pequeño

tramo de anhidritas y dolomías atribuidas al Infralías y 200 m de arcillas, sal, anhidritas y ofitas pertenecientes al Triásico.

Corres-1 (nº 85)

El sondeo atraviesa 4.458 m de serie mesozoica, fundamentalmente del Cretácico Superior. Los 800 m iniciales del sondeo corresponden a areniscas y calizas arenosas que pasan a margas calcáreas hacia la base, de edad Campaniense. De 800 a 1.760 m aparece un potente tramo carbonatado de edad Santoniense compuesto mayoritariamente por calizas con pasadas arenosas, dolomías y calizas dolomíticas y, hacia la base calizas margosas y margas. Bajo éstas aparecen 300 m de margas y calizas margosas de Turoniense, 250 m de margas del Cenomaniense que pasan a una alternancia de areniscas y arcillas cenomanienses de 500 m de espesor. Por debajo se localizan 450 m de materiales albienses constituidos por arcillas, areniscas, calizas y conglomerados, los cuales yacen sobre un pequeño tramo carbonatado de unos 50 m de potencia del Lías. A continuación se cortan 1.100 m de serie triásica compuesta por sal, yeso, anhidritas y arcillas.

Ribero-1

Los materiales que atraviesan los 4.328 m de longitud total del sondeo son de edad mesozoica. El sondeo comienza cortando 224 m de margas y algún nivel calizo, del Cenomaniense-Turoniense inferior. Por debajo, entre los 224 m y los 731 m de profundidad, aparece un tramo detrítico de areniscas y arcillas del Albiense-Cenomaniense inferior, el cual se apoya sobre un pequeño tramo carbonatado de unos 50 m de espesor atribuido al Aptiense. La serie continúa con materiales en facies Weald, constituidos por unos 100 m de arcillas a techo y 100 m de areniscas y conglomerados en la base. A continuación, a 1.000 m de profundidad, se cortan materiales jurásicos (Dogger y Lias) formados de techo a muro por unos 200 m de calizas, 250 m de margas y 150 m de calizas. Bajo éstos se atraviesa un tramo de unos 130 m de dolomías y anhidritas atribuido al Infralías, y una potente serie formada por anhidrita, sal, dolomías y arcillas atribuida al Keuper. Por debajo, a 4.150 m de profundidad se corta un tramo de 170 m de espesor formado por calizas, dolomías, anhidrita y arcilla.

4.3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

4.3.1 PIRINEOS

Los materiales paleozoicos afectados por la orogenia varisca presentan una gran complejidad estructural y litológica, de manera que resulta muy difícil su prospección bajo los materiales de la cobertera mesozoico-terciaria, lo que obliga a prescindir, en principio, de su consideración como almacén de CO₂. En cuanto al sector en el que afloran en superficie (fundamentalmente la Zona Axial), podría estudiarse la potencialidad de algún tramo litológico de forma localizada (por proximidad a una posible instalación emisora de CO₂ de forma masiva), si bien se trata en general de las áreas de mayor relieve topográfico de la cordillera.

En cuanto a las formaciones litoestratigráficas post-variscas (Zona Surpirenaica), merecen especial atención algunos tramos de la serie, unos por sus posibilidades como almacén y otros por sus posibilidades como capa confinante. En una posterior fase de investigación habría que seleccionar estructuras trampa en el subsuelo que permitieran la ubicación del conjunto confinante-almacén en la profundidad adecuada. Especial atención merecen a priori las estructuras diapíricas.

Posibles formaciones almacén:

- Conjunto estefano-pérmico.- Los sedimentos estefano-pérmicos incluyen abundancia de facies arenosas y conglomeráticas, generalmente con importante proporción de material piroclástico, e incluyen también rocas volcánicas y frecuentes niveles de carbón, circunstancias todas ellas favorables para su utilización como almacén. Además, solamente presentan deformaciones alpinas, por lo que es factible reconstruir la geometría de los cuerpos litológicos en el subsuelo, que quedan limitados a la extensión de las cuencas originarias. Hace falta una labor de prospección geofísica para su localización en zonas a profundidad adecuada.
- Areniscas y conglomerados del Buntsandstein.- Presentes en gran parte de la Cuenca Surpirenaica, aunque puntualmente pueden presentarse con escaso desarrollo e, incluso, estar ausentes. Se encuentran generalmente a profundidad excesiva, salvo en la franja septentrional.
- Dolomías del Muschelkalk.- En el Pirineo solamente está presente una barra carbonatada del Muschelkalk, generalmente de espesor moderado (en torno a 50 m). Está incorporada a la base de muchas láminas cabalgantes.
- Carbonatos del conjunto Retiense-Lías.- Principalmente en la Unidad Central Surpirenaica, aunque las dolomías retienses están presentes a techo del Keuper en una extensión mucho mayor.
- Dolomías y calizas del Jurásico Medio y Superior.- Restringidas a la Unidad Surpirenaica Central, pueden adquirir espesor notable en posiciones septentrionales.
- Tramos carbonatados y tramos arenosos del Cretácico Inferior.- Los sedimentos del Cretácico Inferior se encuentran únicamente en sectores limitados y presentan cambios laterales de facies y de espesor muy bruscos que requieren estudios de detalle.
- Tramos carbonatados y arenosos del Cretácico Superior.- El Cretácico Superior es mayoritariamente carbonatado y/o arenoso en gran parte del Pirineo, aunque en los sectores meridionales su espesor es reducido (Sierras Exteriores y Sierras Marginales). En gran parte de los sondeos se atraviesa un espesor considerable de carbonatos (y arenas) de esta edad, espesor al que se suman con frecuencia formaciones carbonatadas o arenosas en contacto tanto por encima como por debajo. En muchos sondeos es el posible almacén más favorable a priori.
- Tramos carbonatados del Eoceno.- En el sector meridional de la Zona Surpirenaica en casi toda su extensión se encuentran formaciones carbonatadas que con frecuencia adquieren potencias notables. También hay que incluir aquí algunos tramos de carbonatos interpretados como paleocenos en los sondeos.
- Tramos arenosos del Eoceno.- Especialmente la Fm Belsué-Atarés, en la mitad oriental de la Cuenca de Jaca-Pamplona, las formaciones San Esteban, Campanué y Sis en la Cuenca de Graus-Tremp, y las formaciones Bellmunt, Terrades y Coronas en la Zona Surpirenaica Oriental.

-
- Megacapas carbonatadas del Flysch eoceno de la Cuenca de Jaca-Pamplona.- En ellas se encuentran los yacimientos de gas del Serrablo; se hallan confinadas por las lutitas del flysch a profundidades variables, comprendidas generalmente entre 1.500 y 3.000 m.
 - Oligo-Mioceno continental de la Cuenca del Ebro cabalgado por láminas surpirenaicas, especialmente en zonas de facies proximales, con dominancia de areniscas y conglomerados.

Posibles formaciones confinantes:

- Triásico en facies Keuper y/o evaporitas retienses y liásicas.- El Keuper está presente en toda la Zona Surpirenaica, sirviendo de confinamiento a posibles almacenes en términos inferiores de la serie estratigráfica o en materiales más modernos cabalgados por láminas con nivel de despegue triásico. Solamente está ausente en zonas puntuales y en sectores de láminas cabalgantes con nivel de despegue más alto en la serie estratigráfica. En sectores puntuales no bien definidos se le añade un conjunto evaporítico retiense-liásico situado inmediatamente encima y que puede adquirir potencia considerable. Tiene interés también como confinante de posibles almacenes en materiales continentales oligocenos y miocenos de la Cuenca del Ebro, cabalgados por láminas pirenaicas.
- Tramo predominantemente margoso del Lías superior.- Los sondeos revelan que se encuentra presente en casi toda la extensión de la Unidad Central Surpirenaica, y ausente en el resto (como la mayor parte del Jurásico), volviendo a aparecer en el subsuelo del extremo occidental (alrededores de Pamplona).
- Margas ocasionales en el Cretácico, especialmente en el Cretácico Superior.- El Cretácico Superior es predominantemente carbonatado, pero algunos sondeos detectan la presencia local de una intercalación margosa importante, si bien desaparece lateralmente con rapidez (sondeos 212 y 255, Centenera 1 y 2). En cuanto al Cretácico Inferior, se encuentra únicamente en sectores limitados y presenta cambios laterales de facies y de espesor muy bruscos que requieren estudios de detalle.
- Tramos lutíticos de la facies Garum.- El Garum o Formación Tresp se extiende por la mayor parte de Pirineo meridional, pero no en todos los sectores puede constituir un buen tramo confinante, porque el espesor de los tramos lutíticos es variable. Hacia el Este dominan las areniscas e, incluso, conglomerados, y en la parte navarra dominan los carbonatos, llegando a desaparecer la formación misma.
- Flysch eoceno.- Presenta gran espesor y gran variabilidad en la proporción de lutitas, areniscas y carbonatos, pero generalmente puede considerarse un buen confinamiento. Suele presentar pliegues de diversas escalas y otro tipo de deformaciones difíciles de definir en superficie, tal como muestran los sondeos.
- Oligo-Mioceno continental.- Especialmente la potente Fm Campodarbe, en el Sinclinal del Guarga.

4.3.2 CORDILLERA CANTÁBRICA

Posibles formaciones almacén:

- Areniscas y conglomerados del Buntsandstein. El espesor del Buntsandstein, incluyendo las facies lutíticas que aparecen a techo de la serie, es muy variable, pudiendo oscilar entre 120 y 950 m. Los máximos espesores se alcanzan en la zona central de la Cuenca Vasco-Cantábrica, siendo aquí donde aparecen desarrolladas las unidades conglomeráticas basales.
- Calizas y dolomías de facies Muschelkalk. Su potencia es variable, alcanzando los 120 m como máximo. Su continuidad lateral es difícil de precisar, ya que sus límites superior e inferior suelen coincidir con contactos mecánicos.
- Dolomías del Retiense y carbonatos del Lías. Las dolomías del Retiense desaparecen en algunos puntos por una discordancia erosiva hacia la parte occidental de la cuenca. Los carbonatos del Lías presentan un espesor variable debido a la subsidencia diferencial aunque están presentes en toda la cuenca.
- Dolomías y calizas del Jurásico Medio y Superior. La secuencia carbonatada del Malm sólo aparece en la parte oriental de la Cuenca Vasco-Cantábrica. Presentan espesores variables.
- Tramos carbonatados y terrígenos del Malm-Barremiense. Presentan gran variabilidad lateral. La potencia varía según las zonas, alcanzándose los máximos espesores en la Plataforma Norcastellana y el Surco Navarro-Cantabro (hasta 2.000 m de potencia).
- Tramos carbonatados y areniscosos del Aptiense-Albiense. Presentan gran variabilidad lateral y una potencia muy variable.
- Tramos carbonatados del Cretácico Superior. El Cretácico Superior es mayoritariamente carbonatado y/o margoso en gran parte de la Cuenca Vasco-Cantábrica. En gran parte de los sondeos se atraviesa un espesor considerable (superior a 500 m) de carbonatos de esta edad.

Posibles formaciones confinantes:

- Lutitas del Buntsandstein y Triásico en facies Keuper. Las unidades lutíticas del Buntsandstein que aparecen a techo de la sucesión, a diferencia de las facies conglomeráticas, aparecen en todos los sectores. Las facies Keuper están constituidas por lutitas rojizas, azuladas y verdes con intercalaciones de yeso y, localmente, inclusiones de ofitas; su espesor es muy variable debido a procesos halocinéticos.
- Tramo predominantemente margoso del Lías superior.
- Tramos lutíticos o margosos del Aptiense-Albiense. Presentan cambios laterales de facies y de espesor acusados.
- Tramos lutíticos o margosos del Cretácico Superior.

-
- Terciario continental arcillo-arenoso. Estos materiales, predominantemente lutíticos, presentan un espesor importante tan sólo en las cuencas de Villarcayo y Miranda.

4.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN LA CORDILLERA PIRENAICA

A continuación se describen para cada zona las unidades potencialmente favorables para el almacenamiento geológico de CO₂, así como las posibles unidades que actuarían como sello.

4.4.1 PIRINEO: ZONA SURPIRENAICA ORIENTAL (ZONA B-1)

- **Confinante 1: Eoceno margoso.**

Comprende diversas formaciones alternantes con formaciones predominantemente carbonatadas, y se extienden en conjunto por la totalidad del Sinclinorio de Ripoll, siendo más frecuentes y potentes hacia el Norte.

- **Almacén 1: Eoceno carbonatado.**

Las formaciones carbonatadas se encuentran en la práctica totalidad de la zona y son más abundantes y potentes en su parte meridional. Suelen culminar en los tramos margosos eocenos que pueden servir de confinante. Bajo los mantos del Pedraforca se encuentran a profundidad excesiva por superposición tectónica.

- **Confinante 2: Garum arcilloso y Cretácico Superior margoso.**

En la parte occidental de la zona (Mantos del Pedraforca) presentan gran desarrollo, formando conjuntamente un tramo lutítico importante (cuyo espesor aumenta hacia el Norte) que puede servir de confinante de almacenes situados en formaciones más antiguas, o en formaciones más recientes con superposición tectónica a favor de este tramo plástico.

- **Almacén 2: Cretácico carbonatado.**

El Cretácico Superior carbonatado se encuentra limitado principalmente al sector occidental de la zona (Mantos del Pedraforca), y es más potente en la parte meridional de dicho sector, en transición a facies lutíticas hacia el Norte y hacia techo.

El Cretácico Inferior es predominantemente carbonatado y se encuentra bien desarrollado en el extremo oriental (Mantos del Ampurdán), donde localmente se dispone sobre formaciones carbonatadas jurásicas, ausentes en el resto de la zona. En la parte más alta del Pedraforca (en el extremo opuesto de la zona) el Cretácico inferior es extraordinariamente potente y de constitución más compleja, formado por la sucesión de diversos tramos carbonatados (frecuentemente con arenas y conglomerados) y lutíticos.

- **Confinante 3: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper.**

Se encuentran en la práctica totalidad de la zona, con un espesor estimado de unos 200 m, si bien localmente pueden haber sido laminadas tectónicamente. Abundan las facies evaporíticas. Posible tramo confinante en situaciones de repetición tectónica. Especialmente importante en el frente surpirenaico, donde láminas surpirenaicas cabalgantes se disponen sobre el Terciario continental de la Cuenca del Ebro.

- **Almacén 3: Dolomías del Muschelkalk, areniscas y conglomerados del Buntsandstein y Estefano-Pérmico.**

El Muschelkalk está formado por una sola barra carbonatada de espesor generalmente no superior a 50 m en esta zona. En general se encuentra a profundidad excesiva, salvo en las proximidades de algunos frentes de cabalgamiento y en la franja más próxima a la Zona Axial.

El Buntsandstein solamente se encuentra a profundidad adecuada en la franja septentrional de la zona, al igual que el Estefano-Pérmico, el cual está restringido a pequeñas cubetas aisladas, pudiendo alcanzar espesores próximos al millar de metros constituidos mayoritariamente por areniscas.

Estos tres tramos litológicos se consideran conjuntamente ya que no existen entre ellos tramos impermeables de suficiente entidad como para constituir confinamientos apropiados. Los materiales de relleno de cubetas estefano-pérmicas suelen contener abundante proporción de material piroclástico, así como frecuentes niveles de carbón, circunstancias especialmente favorables para la retención de CO₂.

4.4.2 PIRINEO: ZONA SURPIRENAICA CENTRAL (ZONA A-4)

Confinante1: Paleógeno margoso.

- Espesor: 0 a más de 1.500 m.
- Profundidad base: 0 a más de 1.500 m.
- Continuidad: Limitado a la parte occidental de la zona.
- Observaciones: Gran cantidad de intercalaciones arenosas de reducido espesor que pueden comprometer localmente la estanqueidad de un posible almacén. El Terciario continental del sector occidental de la zona también puede servir de confinamiento, bien por sí mismo o bien sumándose al Paleógeno margoso.

Almacén 1: Calizas paleógenas.

- Espesor: 100 a 1.000 m, si bien frecuentemente su espesor aumenta por contacto con carbonatos del Cretácico.
- Profundidad techo: 0 a 1.600 m.
- Continuidad: El Paleógeno, limitado a la parte occidental de la zona, presenta frecuentes y bruscos cambios de facies desde términos carbonatados a términos lutíticos que pueden servir de confinamiento.
- Observaciones:

Confinante 2: Arcillas y evaporitas del tránsito Cretácico-Terciario (facies Garum).

- Espesor: 10 a 300 m.
- Profundidad base: Desde 0 a más de 2.000 m.
- Continuidad: Limitadas al sector occidental y meridional.
- Observaciones: En algunos lugares el Garum incorpora gran proporción de areniscas y/o carbonatos, que pueden disminuir su

capacidad confinante, quedando unido el tramo carbonatado paleógeno con los carbonatos del Cretácico. Sólo puede considerarse un tramo confinante efectivo cuando el espesor sea elevado. A veces no es el Garum el tramo arcilloso más potente, sino otros tramos intercalados en la serie cretácica eminentemente carbonatada.

Almacén 2:

Calizas del Cretácico. Generalmente se encuentra un conjunto carbonatado potente que comprende el Cretácico Superior, el Cretácico Inferior y el Jurásico o parte de él.

- **Espesor:** El conjunto Cretácico-Jurásico alcanza espesores variables entre 1.000 y 2.000 m. En los sectores meridional y occidental el espesor es mucho más reducido, faltando los términos jurásicos y del Cretácico Inferior.
- **Profundidad techo:** Desde 0 a más de 2.000 m.
- **Continuidad:** En puntos del extremo oriental el Cretácico es predominantemente lutítico, al contrario que en la mayor parte de la zona, donde es carbonatado.
- **Observaciones:** Dentro de la Unidad Surpirenaica Central, el espesor del tramo carbonatado aumenta rápidamente hacia el Norte y hacia las láminas cabalgantes superiores, al tiempo que aumenta la representación del Cretácico Inferior y Jurásico. En los casos en los que el Garum no constituye un tramo confinante efectivo el espesor del posible tramo-almacén se incrementa con la adición de los carbonatos paleógenos a techo.

Confinante 3:

Lías superior margoso.

- **Espesor:** Ausente en el extremo occidental. De 50 a 100 m en el resto.
- **Profundidad base:** Desde 0 a más de 2.500 m.
- **Continuidad:** Presente preferentemente en los sectores oriental y septentrional.
- **Observaciones:** En ocasiones no es éste el tramo confinante más apropiado, por su reducido espesor, sino que se encuentran tramos margosos o evaporíticos de hasta 700 m intercalados entre los carbonatos jurásicos en algunos puntos.

Almacén 3:

Calizas y dolomías del Lías inferior.

- **Espesor:** 50 a 300 m cuando está presente.
- **Profundidad techo:** Desde 0 a más de 2.500 m.
- **Continuidad:** Limitado a los mismos sectores que el Lías superior margoso.
- **Observaciones:**

Confinante 4: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper.

- Espesor: 0 a 1.000 m.
- Profundidad base: 0 a más de 3.000 m.
- Continuidad: Se encuentran en la práctica totalidad de la zona, si bien localmente pueden haber sido laminadas tectónicamente.
- Observaciones: Posible tramo confinante en situaciones de repetición tectónica a favor del Keuper. Especialmente importante en el frente surpirenaico, donde láminas surpirenaicas cabalgantes se disponen sobre las facies de borde de la cuenca terciaria del Ebro, con predominio de términos detríticos groseros. En algunos sectores no bien definidos se suma a techo del Keuper un potente conjunto evaporítico liásico. En el extremo occidental de la zona abundan las estructuras diapíricas aflorantes con núcleo de Keuper, que podrían constituir trampas apropiadas para el almacenamiento.

Almacén 4: Dolomías del Muschelkalk, areniscas y conglomerados del Buntsandstein y Estefano-Pérmico.

- Espesor: El Muschelkalk está formado por una sola barra carbonatada de espesor generalmente no superior a 50 m, aunque localmente supera los 100 m.
El Buntsandstein no está bien representado en los sondeos, al encontrarse generalmente a profundidad muy grande, estando representado por espesores generalmente reducidos, del orden del centenar de metros.
El Estefano-Pérmico se encuentra restringido a pequeñas cubetas aisladas, pudiendo alcanzar espesores próximos al millar de metros constituidos mayoritariamente por areniscas.
- Profundidad techo: Desde 0 a más de 3.000 m. Preferentemente en la franja septentrional de la zona, en las proximidades de la zona de afloramiento de estos materiales.
- Continuidad: Muschelkalk y Buntsandstein se encuentran seguramente presentes en casi toda la zona (si bien a profundidad excesiva), con ausencias puntuales de uno u otro. El Estefano-Pérmico se encuentra esporádicamente, ya que se localiza en cubetas aisladas aflorantes únicamente inmediatamente al Norte de esta zona.
- Observaciones: Estos tres tramos litológicos se consideran conjuntamente ya que no existen entre ellos tramos impermeables de suficiente entidad como para constituir confinamientos apropiados.
Los materiales de relleno de cubetas estefano-pérmicas suelen contener abundante proporción de material

piroclástico, así como frecuentes niveles de carbón, circunstancias especialmente favorables para la retención de CO₂.

4.4.3 PIRINEO: ZONA SURPIRENAICA OCCIDENTAL (ZONA A-3)

- Confinante 1: Terciario continental arcillo-arenoso.**
- Espesor: Los sondeos perforan desde 600 a más de 3.000 m.
 - Profundidad base: Desde 0 a más de 3.000 m.
 - Continuidad: Ampliamente representado en el Sinclinorio del Guarga, y ausente en el resto de la zona.
 - Observaciones: Su calidad como confinante dependerá de la proporción de tramos lutíticos respecto a los arenosos, muy variable en el espacio (en las inmediaciones de Huesca la proporción de lutitas es muy reducida, de forma que no puede constituir un sello de almacén alguno), así como de su estructura. En algunas zonas podrían considerarse posibles almacenamientos en tramos permeables incluidos en su interior.
- Confinante 2: Flysch eoceno de la Cuenca de Jaca.**
- Espesor: De 0 a varios miles de metros.
 - Profundidad base: Desde 0 a más de 4.500 m.
 - Continuidad: Presente en la mayor parte de la zona, salvo en los sectores próximos a los bordes N y S.
 - Observaciones: También se incluyen en este apartado los potentes tramos margosos del Eoceno que no corresponden a sedimentación turbidítica.
- Almacén 1: Megabrechas carbonatadas incluidas en el Flysch.**
- Espesor: Son intercalaciones de potencia generalmente decamétrica y extensión hectométrica.
 - Profundidad techo: En el yacimiento de gas del Serrablo se encuentran a profundidad variable, más frecuente en torno a 2.000 m.
 - Continuidad: Se trata de grandes olistolitos inmersos en las lutitas del Flysch, y se presentan esporádicamente, con distribución aleatoria. Solamente se han detectado en un pequeño sector situado en las inmediaciones de Sabiñánigo.
 - Observaciones: El yacimiento de gas del Serrablo se halla agotado y se utiliza como almacenamiento estratégico de gas.
- Almacén 2: Paleógeno carbonatado y/o arenoso (fundamentalmente Eoceno), unido frecuentemente a los carbonatos del Cretácico Superior.**
- Espesor: Cuando puede separarse el Paleógeno del Cretácico (mediante las facies Garum, alrededores de Huesca) el

-
- primero suele tener espesores del orden de los 300 m. En el resto de la zona se encuentra una serie carbonatada-arenosa continua desde el Cretácico Superior al Eoceno que puede alcanzar espesores de más de 1.000 m.
- Profundidad techo: Con frecuencia entre 0 y 1.000 m, pudiendo encontrarse localmente a profundidades mucho mayores.
 - Continuidad: Presente en la mayor parte de la zona, si bien con desarrollo muy dispar y con frecuentes cambios laterales de facies hacia términos más lutíticos, especialmente hacia el Norte.
 - Observaciones: En el extremo occidental de la zona a este conjunto se suma el Cretácico Inferior arenoso-carbonatado.

Confinante 3: Arcillas del tránsito Cretácico-Terciario. (facies Garum).

- Espesor: 0 a 300 m.
- Profundidad base: Desde 0 a más de 1.700 m.
- Continuidad: Presentan buen desarrollo en el extremo oriental de la zona y borde meridional, disminuyendo rápidamente su espesor al Oeste hasta desaparecer.
- Observaciones: En la mayor parte de la zona no presenta espesor suficiente para constituir un confinamiento adecuado, salvo en el extremo oriental y parte del borde meridional.

Almacén 3: Cretácico Superior carbonatado y/o arenoso.

- Espesor: En los sectores en los que el Garum es suficientemente potente como para suponer un buen confinamiento (extremo oriental y parte del borde meridional) este tramo puede tener 400 m, llegando en ocasiones a superar ampliamente el millar de metros.
- Profundidad techo: Desde 0 a más de 1.700 m.
- Continuidad: El Cretácico Superior carbonatado y/o arenoso se encuentra prácticamente en toda la extensión de la zona, si bien se halla generalmente conectado a potentes términos carbonatados paleógenos (o muy próximo a ellos) y, en el extremo occidental, a términos permeables del Cretácico Inferior.
- Observaciones: De forma muy local se encuentran tramos carbonatados jurásicos, generalmente de espesor inferior a 100 m, que podrían también sumarse a este conjunto o bien constituir un almacén separado.

Confinante 4: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper.

- Espesor: 0 a 1.000 m.
- Profundidad base: 0 a más de 3.000 m.

- Continuidad: Se encuentran en la práctica totalidad de la zona, si bien localmente pueden haber sido laminadas tectónicamente (Broto).
- Observaciones: Posible tramo confinante en situaciones de repetición tectónica. Especialmente importante en el frente surpirenaico, donde láminas surpirenaicas cabalgantes se disponen sobre las facies de borde de la cuenca terciaria del Ebro, con predominio de términos detríticos groseros.
En ocasiones, la totalidad del tramo se encuentra ocupado puntualmente por grandes masas de ofita, en cuyo caso puede peligrar la calidad del confinamiento.

Almacén 4: Dolomías del Muschelkalk, areniscas y conglomerados del Buntsandstein y Estefano-Pérmico.

- Espesor: El Muschelkalk alcanza una potencia media de 50 m, si bien, localmente, puede llegar a superar los 200.
El Buntsandstein por encontrarse a altas profundidades en esta zona no se alcanza en un buen número de sondeos, no pudiendo definirse en muchos otros su espesor total, aunque se estima en pocos centenares de metros.
El Estefano-Pérmico se presenta en pequeñas cubetas aisladas, alcanzando los 1.000 m de potencia, en su mayoría en forma de areniscas.
- Profundidad techo: Desde 0 a más de 3.000 m. En el sondeo del Roncal el Estefano-Pérmico se encuentra a 900 m, inmediatamente bajo el Keuper.
- Continuidad: Muschelkalk y Buntsandstein se depositan, salvo excepciones locales, en toda la cuenca, mientras que el Estefano-Pérmico se encuentra esporádicamente, ya que se localiza en cubetas aisladas.
- Observaciones: Estos tres tramos litológicos se valoran como un solo almacén, por no existir entre ellos capas impermeables de suficiente entidad.
Los materiales de relleno de cubetas estefano-pérmicas son ricos en materiales piroclásticos y, en diversas áreas, presentan capas de carbón, siendo tales circunstancias favorables para la selección de almacenes de CO₂.

4.4.4 CUENCA VASCO-CANTÁBRICA: ARCO VASCO Y SU PROLONGACIÓN EN EL MAR (ZONA A-1)

Confinante: Turbiditas del Cretácico Superior - Paleógeno.

- Espesor: Variable en función de la estructura. Mayoritariamente en torno a 2.500 m.
- Profundidad base: Variable en función de la estructura. Mayoritariamente en torno a 2.500 m.

- Continuidad: Las facies turbidíticas se extienden a lo largo de todo el Arco Vasco.
- Observaciones: Tramos con abundancia de intercalaciones arenosas y otros con abundancia de intercalaciones carbonatadas, a veces de espesor decamétrico o superior.

Almacén: **Calizas del Cretácico Inferior (Urgon) y areniscas asociadas (Weald).**

- Espesor: Mayoritariamente en torno a 200-300 m, pero los datos regionales indican grandes variaciones de espesor, pudiendo superar el millar de metros.
- Profundidad techo: Variable en función de la estructura. Mayoritariamente en torno a 2.500 m.
- Continuidad: Presentes en la mayor parte del Arco Vasco, se extienden a zonas adyacentes.
- Observaciones: Constituyen el tramo productivo de gas del yacimiento Gaviota, situado en la plataforma marina, donde su techo se encuentra a 2.500 m (podría buscarse una ubicación en las proximidades, donde el tramo se encontrara más somero). Generalmente el tramo arenoso se encuentra por debajo de los carbonatos (caso del yacimiento Gaviota), pero regionalmente se observan transiciones laterales entre ambos términos.

4.4.5 CUENCA VASCO-CANTÁBRICA: PLATAFORMA NORCASTELLANA Y SURCO NAVARRO-CÁNTABRO Y SU PROLONGACIÓN EN EL MAR (ZONA A-2)

Confinante 1: **Terciario continental arcillo-arenoso.**

- Espesor: El conjunto terciario, únicamente importante en las cuencas de Villarcayo y Miranda, es predominantemente lutítico, pudiendo alcanzar espesores de más de 1.500 m.
- Profundidad base: Desde 0 a más de 1.500 m.
- Continuidad: Restringido a las cuencas de Villarcayo y Miranda, especialmente en sus sectores centrales, donde el espesor es mayor.
- Observaciones: Gran heterogeneidad litológica, con indeterminación en cuanto a su distribución lateral y vertical. En las proximidades de los bordes la proporción de detríticos groseros puede ser muy elevada, disminuyendo la capacidad confinante del conjunto.

Almacén 1: **Carbonatos paleógenos, a veces en continuidad con carbonatos cretácicos.**

-
- **Espesor:** Muy variable, pudiendo alcanzar los 1.800 m si se hallan conectados a los carbonatos del Cretácico Superior (bajo la Cuenca de Villarcayo).
 - **Profundidad techo:** Desde 0 a más de 1.500 m.
 - **Continuidad:** Únicamente se encuentran muy localmente, en torno a las cuencas de Villarcayo y Miranda, preservados por sendas estructuras sinclinales.
 - **Observaciones:**

Confinante 2: Facies lutíticas del Cretácico.

- **Espesor:** El conjunto cretácico es muy variable en espesor y distribución lateral y vertical de facies, y se alcanzan con frecuencia espesores superiores al millar de metros.
- **Profundidad base:** La base de los términos lutíticos puede situarse entre 0 y más de 4.000 m.
- **Continuidad:** Las variaciones laterales de facies y espesor de cada una de ellas son muy bruscas y frecuentes, pero en casi cualquier lugar hay algún tramo lutítico potente en profundidad.
- **Observaciones:** Las continuas indentaciones de litologías impermeables entre litologías permeables hacen que las primeras puedan servir de confinamiento de almacenes ubicados en las segundas en buena parte de la extensión de esta zona.

Almacén 2: Facies carbonatadas, arenosas y conglomeráticas del Cretácico. (Cretácico Superior, Utrillas, Urgon, Weald).

- **Espesor:** Los tramos permeables de la serie cretácica varían rápidamente de espesor y composición litológica, y con frecuencia se encuentran tramos de más de 1.000 m.
- **Profundidad techo:** El techo de los términos carbonatados y/o arenosos puede encontrarse desde 0 a más de 4.000 m.
- **Continuidad:** Las variaciones laterales de facies y espesor de cada una de ellas son muy bruscas y frecuentes, pero en casi cualquier lugar hay algún tramo permeable potente en profundidad.
- **Observaciones:** Los frecuentes cambios de facies permiten la presencia de potentes tramos permeables confinados por términos lutíticos, en muchas ocasiones a profundidad adecuada. El Cretácico Superior es con frecuencia predominantemente carbonatado, o presenta tramos carbonatados de considerable espesor (con frecuencia el Turoniense). También son importantes los carbonatos del Urgon, del Aptiense-Albiense. Las facies arenosas y conglomeráticas más potentes y extensas son las facies Utrillas (predominantemente albienses) y las facies Weald (aptenses).

-
- Almacén 3: Carbonatos jurásicos (Dogger-Malm).**
- Espesor: 0 a 300 m.
 - Profundidad techo: En los sondeos se encuentra entre 1.000 y 1.700 m.
 - Continuidad: Se encuentran en la mayor parte de la Plataforma Norcastellana, en la plataforma marina del Cantábrico y en puntos esporádicos del Surco Navarro-Cántabro (sector de Ribero), donde el Cretácico suele reposar directamente sobre el Triásico Superior.
 - Observaciones: Generalmente el Jurásico suele constar de dos conjuntos carbonatados separados por los términos margosos del Lías superior, que sirve de confinamiento al conjunto carbonatado del Lías Inferior. Localmente (en el Mar Cantábrico) este tramo margoso intermedio está ausente, pudiendo constituir el Jurásico un único tramo carbonatado de unos 700 m (con su techo a 1.700 m de profundidad).
- Confinante 3: Lías superior margoso.**
- Espesor: 150-250 m. En la plataforma del Mar Cantábrico no existe.
 - Profundidad base: 1.400 a 2.400 m.
 - Continuidad: Se encuentra en casi toda la Plataforma Norcastellana, y muy esporádicamente en el Surco Navarro-Cántabro, donde apenas hay representación del Jurásico.
 - Observaciones: En los sectores donde se encuentra es muy constante su espesor y facies, pudiendo abarcar también parte del Dogger.
- Almacén 4: Lías Inferior carbonatado.**
- Espesor: 150-300 m.
 - Profundidad techo: 1.400 a 2.400 m.
 - Continuidad: Se encuentra en casi toda la Plataforma Norcastellana, y muy esporádicamente en el Surco Navarro-Cántabro, donde apenas hay representación del Jurásico.
 - Observaciones: Suele ser calcáreo en la parte superior y dolomítico en la inferior.
- Confinante 4: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper.**
- Espesor: Oscila entre unas pocas decenas de metros en la base de unidades cabalgantes hasta varios miles de metros en acumulaciones diapíricas.
 - Profundidad base: Desde 0 a más de 4.000 m.
 - Continuidad: Parece encontrarse en todos los sectores de esta zona, si bien con frecuencia a profundidad excesiva.
 - Observaciones: Dado el enorme espesor del Cretácico, este tramo solamente sirve de confinamiento a profundidad

adecuada para términos más antiguos de la serie (carbonatos del Muschelkalk, areniscas y conglomerados del Buntsandstein y del Estefaniense-Pérmico) en las proximidades de los bordes de la cuenca. En sectores más internos de la cuenca puede servir de confinamiento para tramos superiores en situación de repetición tectónica a favor del Keuper, o bien en trampas asociadas a los abundantes edificios diapíricos de la zona.

5. CORDILLERAS IBÉRICA Y COSTERO-CATALANA

5.1 MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La Cordillera Ibérica o Sistema Ibérico y la Cordillera Costero-Catalana, (esta última también conocida como Catalánides) son dos estructuras alpinas parcialmente arrasadas situadas al este de la Península Ibérica. Desde un punto de vista estructural, forman dos unidades tectónicas de similar edad y estilo, ya que se trata de cadenas alpinas de antepaís con tegumento potente y/o cobertera. Por ello se denominará Cadena Ibérica al conjunto, siendo los Catalánides uno de los sectores en que puede dividirse. Se trata de una serie de alineaciones montañosas de dirección NO-SE (Cordillera Ibérica) y NE-SO (Cordillera Costero Catalana) que enlazan en sus extremos oriental y meridional, a través de El Maestrazgo.

En conjunto, el grado de deformación es moderado, con una esquistosidad alpina muy escasa y apenas metamorfismo. El registro estratigráfico abarca desde el Precámbrico y Paleozoico hasta el Cuaternario, pero el rasgo esencial de estas cordilleras de antepaís viene dado por la existencia de una importante serie sedimentaria del Pérmico Superior y sobre todo del Mesozoico. Las distintas potencias y características de este relleno postvarisco y la presencia de niveles de despegue superficiales confiere un estilo de deformación de basamento, tegumento y cobertera. Así, puede definirse un basamento prepérmico (con niveles de despegue profundos y que acomoda una importante deformación cenozoica), un tegumento hasta las margas yesíferas del Triásico Superior (Keuper) y una cobertera.

Los materiales que forman el Sistema Ibérico son fundamentalmente de edad mesozoica y terciaria, aunque localmente afloran materiales del zócalo paleozoico integrados en el plegamiento alpino, como en los sectores de la Demanda, Moncayo, Ateca, Daroca, Molina de Aragón, Montalbán, Albarracín y Villamés, de NO a SE. Al mismo tiempo existen zonas deprimidas subsidentes en las que, especialmente durante el Cretácico Inferior, se acumularon grandes espesores de sedimentos, como las Cuencas de Cameros y Maestrazgo.

La forma de la Cordillera Ibérica es irregular y abarca parte de las comunidades autónomas de Castilla y León, de la Rioja, de Aragón, de Cataluña, de Castilla - La Mancha y Comunidad Valenciana. En la Cadena Ibérica se pueden diferenciar varios sectores con características diferentes (ver figura 4.1)

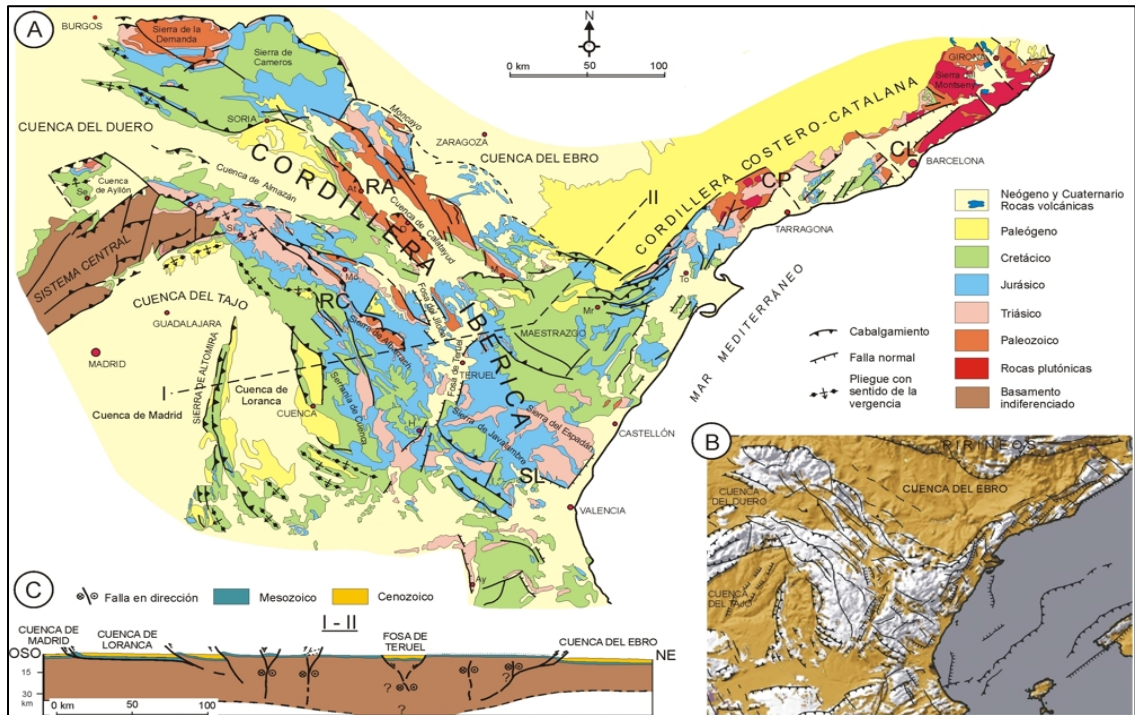


Figura 5.1 Esquema geológico de las Cadenas Ibéricas y subdivisiones. Leyenda: CL: Cordillera Litoral. CP: Cordillera Prelitoral Costero-Catalana. RA: Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. RC: Rama Castellana de la Cordillera Ibérica. SL: Sector Levantino de la Cordillera Ibérica. Localidades: A.- Atienza. At.- Ateca. Ay.- Ayora. D.- Daroca. H.- Henarejos. M.- Montalbán. Mo.- Molina de Aragón. Mr.- Morella. Se.- Sepúlveda. Si.- Sigüenza. To.- Tortosa. **B.-** Principales fracturas que conforman su estructura. **C.-**Corte esquemático y transversal de la Cordillera Ibérica. (Sopeña v de Vicente, 2004).

5.1.1 UNIDAD ESTRUCTURAL DE CAMEROS – DEMANDA

Esta unidad se encuentra en el extremo septentrional de la Cordillera Ibérica, y está formado por las sierras de La Demanda, Cameros, Urbión y Cebollera, en las que predominan las directrices E-O. La sierra de la Demanda está constituida esencialmente por materiales paleozoicos, mientras que en Cameros aflora sobre todo el Jurásico Superior y el Cretácico.

5.1.2 RAMA ARAGONESA

Se encuentra al SE de la unidad estructural de Cameros – Demanda. Está formada por las sierras del Moncayo, la de La Virgen, la de Víctor, la de Algairén y de Cucalón, configurando una orientación NO – SE muy marcada. Dentro de la Rama Aragonesa se sitúa la cuenca terciaria de Calatayud. Afloran materiales de edad paleozoica en los núcleos de las estructuras y materiales de edad mesozoica alrededor de éstos.

5.1.3 SECTOR DE ENLACE

Situado al este de la Rama Aragonesa, recibe este nombre debido al hecho de que de nuevo vuelven a predominar las direcciones estructurales E-O y estas direcciones cambian de forma progresiva hasta enlazar en el O con la Cordillera Costero – Catalana, con direcciones NE-SO, que comienza en la sierra de Puertos de Beceite, dibujando el arco de Montalbán. En este sector afloran materiales mesozoicos, principalmente del Cretácico.

5.1.4 RAMA CASTELLANO – VALENCIANA

Separada de la Rama Aragonesa por la cuenca terciaria de Almazán, está formada por la Serranía de Cuenca y las sierras de Tragacete y Albarracín, con directrices NO-SE. Predominan los sedimentos mesozoicos y el Paleozoico sólo aflora en los núcleos de los anticlinales o a favor de fallas con movimiento inverso importante. Al O de la Serranía de Cuenca, las directrices estructurales giran progresivamente en dirección N-S hasta la Sierra de Altomira, constituida esencialmente por afloramientos cretácicos. Esta sierra divide a la Cuenca del Tajo en dos: La cuenca de Madrid y la de Loranca (o intermedia).

5.1.5 SECTOR LEVANTINO

El sector levantino (o zona SE de la Rama Castellano – Valenciana) comprende desde el N del tramo medio del río Júcar, hasta el E de El Maestrazgo, según una línea subparalela a la costa. Su morfología está controlada por la interferencia de las directrices ibéricas con las relacionadas con el Surco de Valencia, NE-SO. Los materiales de este sector son también de edad mesozoica, aunque aquí es frecuente que el Terciario o Cuaternario rompan la continuidad de sus afloramientos.

5.1.6 CORDILLERA COSTERO – CATALANA

Es un cinturón estrecho de sierras que cierra la Cuenca del Ebro en el antepaís Pirenaico que se divide en tres grandes unidades: Cordillera Litoral, Depresión Prelitoral y Cordillera Prelitoral de E a O. Esta división morfológica longitudinal contrasta con su composición litológica, ya que la mitad N está constituida principalmente por granitos y rocas metamórficas del Paleozoico, mientras que en la mitad meridional, hasta el sector de enlace, predominan los afloramientos mesozoicos.

5.2 SONDEOS PETROLÍFEROS

Los sondeos de investigación de hidrocarburos en la Cordillera Ibérica son escasos y centrados en áreas determinadas. En la Cordillera Costero-Catalana son aún más escasos. Señalamos a continuación una selección de los más representativos de cada sector, incluyendo algunos sondeos marinos, especialmente los ligados a yacimientos de hidrocarburos (figura 4.2).

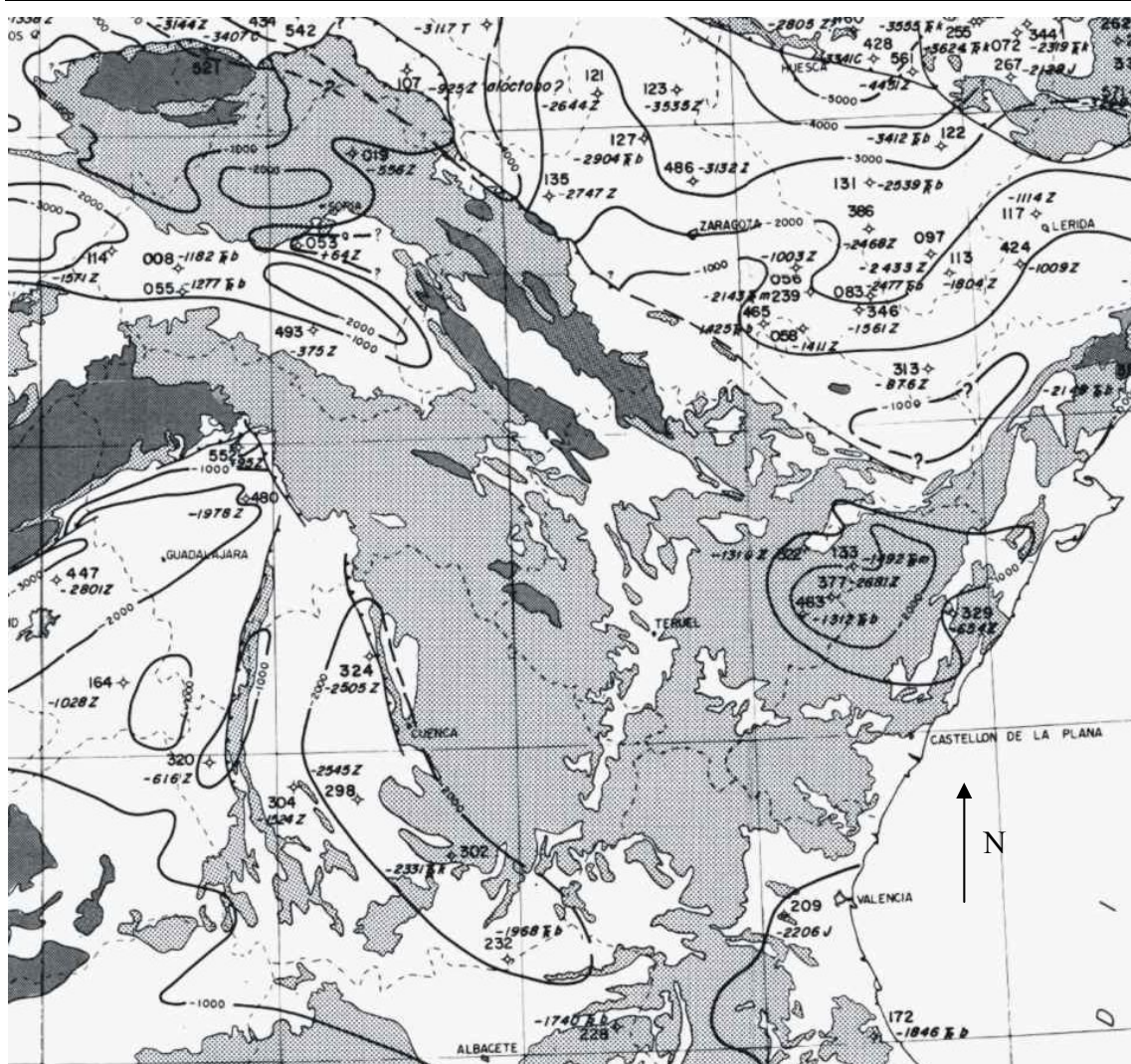


Figura 5.2 Mapa de isobatas del techo del Paleozoico con situación de los sondeos petrolíferos principales (datum nivel del mar). (Extractada de I.G.M.E., 1987)

5.2.1 SECTOR DE CAMEROS

Castilfrío-1 (nº 19)

El sondeo, de 2.200 m, corta la serie completa del Trías y del Jurásico sobre el zócalo paleozoico. Los 690 m superiores, atribuidos al Malm, son arcillas y areniscas alternantes con intercalaciones calcáreas y trazas de yeso. El Dogger consta de una parte superior de arenas y arcillas y un paquete de 45 m de calizas en la base, hasta 942 m. Debajo, algo más de 200 m de margas liásicas sobre un tramo calcáreo-dolomítico liásico de unos 120 m (entre 1.280 y 1400 m de profundidad). Debajo, 300 m de alternancia de bancos potentes de dolomía y de anhidrita, de probable edad Retiense que a 1.600 m da paso a 157 m de anhidrita masiva (Keuper). El Muschelkalk se reduce a un paquete dolomítico de unos 20 m, directamente sobre un tramo de unos 200 m de areniscas del Bunt que son conglomerados en la base. El Bunt reposa sobre cuarcitas y areniscas ordovícicas.

Ucero-1 (nº 94)

340 m de areniscas Albienses (Utrillas) con pasadas conglomeráticas y arcillosas sobre tramo margoso de escasa entidad (Weald) que yace sobre una alternancia en bancos potentes de calizas, margas y dolomías jurásicas hasta 1.046 m.

Aldehuela-1 (nº 277)

Sondeo de 2.650 m (hasta el Keuper) que perfora un Jurásico marino muy reducido bajo una potente serie cretácica. Comienza en un tramo de 565 m de calizas cenomano-turonenses con alguna intercalación margosa menor. Debajo, 1.870 m de un conjunto mayoritariamente arenoso que intercala tramos arcillosos más importantes en los 400 m superiores (Albense) y bancos de caliza (Urgon) entre 1.500 y 2.000 m de profundidad. Debajo, a 2.435 m, unos 100 m de calizas y dolomías marinas jurásicas que yacen sobre un conjunto de unos 120 m de dolomías y anhidrita (posible Retiense), ya en contacto con arcillas y anhidritas del Keuper.

5.2.2 SECTOR DEL MAESTRAZGO**Mirambel-1 (nº 322)**

Sondeo que alcanza el zócalo y perfora la serie completa desde el Triásico hasta el Cretácico inferior. Los 197 m superiores representan el Neocomiense-Aptiense formado por calizas con base margo-arenosa. Debajo, 1.179 m de calizas y calizas dolomíticas con intercalaciones de calizas margosas representa la totalidad del Jurásico y el Retiense, alcanzando los 1.376 m de profundidad. 261 m de arcillas con anhidrita y sal corresponden al Keuper, que se dispone sobre la barra dolomítica superior del Muschelkalk, de 137 m (entre 1.637 y 1.774 m). El tramo intermedio del Muschelkalk es muy potente (624 m), y está constituido por anhidrita, sal y arcilla. La barra dolomítica inferior del Muschelkalk tiene 82 m, y a 2.480 m reposa sobre el conjunto Bunt-Pérmico, que es arcilloso con intercalaciones arenosas y yace sobre areniscas y arcillas paleozoicas a 2.786 m.

Bobalar-2 (nº 133)

970 m de calizas y dolomías que representan todo el Jurásico (los 616 m superiores son calizas arcillosas y representan el Malm) reposan sobre 230 m de arcillas y evaporitas del Keuper. Debajo, 178 m de dolomías del Muschelkalk superior que a 1.378 m pasan a arcillas, sal masiva y anhidrita hasta el final del sondeo, a 2.591 m.

Maestrazgo-1 (nº 377)

2.515 m de calizas y dolomías que incorporan intercalaciones potentes de margas en los 385 m superiores. La parte superior con intercalaciones margosas representa el Cretácico Inferior, y el resto del tramo representa la totalidad de la serie jurásica y el Retiense (los 100 m de dolomías basales, con intercalaciones anhidríticas). Debajo, 267 m de arcillas con sal y anhidrita (Keuper) que yacen a 2.782 m sobre un conjunto de areniscas y arcillas del Bunt y Estefano-Pérmico, hasta la terminación del sondeo a 2.948,2 m.

Maestrazgo-2 (nº 463)

310 m de Cretácico consistente en calizas que hacia abajo pasan a margas y en la base a arenas. Debajo, 1.108 m de calizas del Jurásico y Retiense. A 1.418 m, arcillas, anhidrita y sal del Keuper (212 m) sobre la barra dolomítica superior del Muschelkalk, de 128 m. El potente tramo intermedio de arcillas, anhidrita y sal, descansa a 2.586 m sobre la barra dolomítica inferior, de 222 m. El sondeo termina a 2.861,8 m tras atravesar unos metros de arcillas y areniscas del Buntsandstein.

Salsadella-1 (nº 329)

400 m de calizas y dolomías del Dogger y Malm (parte) con alguna intercalación margosa yacen sobre 112 m de margas del Lías medio-superior que reposan directamente sobre 133 m de anhidrita, arcilla y dolomía atribuidas al tramo intermedio del Muschelkalk. Debajo, la barra dolomítica inferior, de 173 m da paso a 818 m a un tramo de arcillas y areniscas interpretado como Bunt y Estefano-Pérmico, hasta el final del sondeo, a 1.073, 2 m.

5.2.3 SERRANÍA DE CUENCA Y SECTOR LEVANTINO

El Gabaldón-1 (nº 302)

113 m de calizas del Cretácico Superior sobre 114 m de areniscas y dolomías del Cretácico Inferior. Siguen unos 770 m de calizas y dolomías jurásicas con un reducido intervalo margoso a 585 m de profundidad correspondiente al techo del Lías. Debajo, a partir de unos 1.000 m, 780 m de anhidritas, dolomías y sal atribuidos al Lías-Retiense sobre 965 m de arcillas y sal del Keuper. A 2.745 m barra dolomítica de 327 m (Muschelkalk) sobre un Buntsandstein formado por arcillas a techo y areniscas y conglomerados en el resto (hasta el final del sondeo, a 3.309 m).

Perenchiza-1 (nº 209)

435 m de calizas y dolomías del Cretácico Superior sobre 464 m de alternancia calizas-margas de edad Kimmeridgiense. A partir de 899 m, tramo de 309 m de calizas que comprenden la parte media y superior del Lías, el Dogger y el Oxfordiense. Desde 1.208 m hasta el final del sondeo (2.355 m) se desarrolla un conjunto anhidrítico con intercalaciones dolomíticas, atribuido al Lías inferior.

Jaraco-1 (nº 172)

100 m de dolomías del Kimmeridgiense superior sobre un conjunto del Kimmeridgiense inferior de 188 m, formado por margas a techo y calizas en la base. Debajo, 305 m de dolomías del Lías que a partir de 593 m pasa a un tramo complejo de 351 m compuesto principalmente de anhidrita y arcilla, cuya parte inferior, con ofitas, pertenece al Keuper. Un tramo dolomítico (Muschelkalk) de 313 m comienza a 944 m, pasando al Bunt, del cual se perforan 676 m, por encima arcillosos y por debajo arenosos, hasta el final del sondeo (1.933,5 m).

5.2.4 CORDILLERA COSTERO-CATALANA

Reus-1 (nº 359)

300 m de relleno pliocuaternario (gravas, arenas y arcillas) sobre 1.066 m de margas miocenas con limos y arenas finas. Debajo, 66 m de arcillas oligo-miocenas sobre 261 m de dolomías jurásicas karstificadas a techo. Entre 1.693 y 1.835 m, arcillas y anhidrita del Keuper (142 m) sobre 356 m atribuidos al Muschelkalk. La barra superior dolomítica no se presenta como tal, sino como una alternancia dolomía-arcilla de 200 m, y tras un tramo de arcilla y anhidritas se encuentra la barra dolomítica inferior, de 81 m. A 2.191 m anhidrita y arcilla del techo del Bunt.

Martorell-1 (nº 338)

2.247 m de relleno terciario constituido por arcillas alternantes con arenas. La base es arenosa y conglomerática y descansa sobre el zócalo paleozoico.

San Sadurní-1 (nº 420)

850 m de arcillas miocenas con intercalaciones de arenas, sobre Cretácico calcáreo.

5.2.5 SURCO DE VALENCIA

Amposta Marino C-1 (yacimiento de petróleo Amposta Marino) (nº 264)

Sondeo productor de petróleo, con agua hasta 62,2 m. Arcillas, areniscas y margas pliocuaternarias hasta 1101,5 m sobre 422 m de margas y arcillas pliocenas. 371 m de areniscas messinienses con calcarenitas en la base que a 1.895 m dan paso a 470 m de calizas y calizas dolomíticas del Cretácico Inferior. Por debajo siguen dolomías y calizas dolomíticas, pero del Malm, hasta el final del sondeo, a 2.522 m. El tramo productivo son los carbonatos del Cretácico Inferior.

Castellón B-5 (yacimiento de petróleo Tarraco) (nº 351)

Sondeo marino productor de petróleo, con agua hasta 141,1 m. Arcillas calcáreas pliocuaternarias hasta 1.864 m (hacia muro aumenta el contenido de arena y limo). Arcillitas del Mioceno Medio-Superior hasta 2.688 m, sobre 790 m de Jurásico compuesto de dolomías, calizas dolomitizadas y niveles arcillosos. A unos 3.500 m reposan sobre Triásico arcilloso con carbonatos y anhidrita. Hasta 3.768 m, donde finaliza el sondeo. El Jurásico es el tramo productivo.

Casablanca-2 (yacimiento de petróleo Casablanca) (nº 353)

Sondeo productor de petróleo, con agua hasta 261,5 m. Arcillas hasta 2.601 m, comprendiendo el Cuaternario (hasta 800 m), el Plioceno (hasta 1.829 m), el Mioceno Superior, con niveles de areniscas muy finas (hasta 2.301 m) y el Mioceno Medio, muy arcilloso. Yacen sobre un potente tramo de calizas y dolomías jurásicas (salvo los 40 metros superiores, miocenos) que se continúan hasta el final del sondeo, a 3.170 m. El tramo productor son los carbonatos jurásicos sobre los que se deposita el Mioceno.

Tarragona E-1 (yacimiento de petróleo Dorada) (nº 333)

Sondeo productor de petróleo, con agua hasta 123,2 m. Arcillas calcáreas con margas y calcarenitas pliocuaternarias hasta 940 m. Mil metros más de Mioceno, consistente en una alternancia de calcarenitas-areniscas-arcillas (de techo a muro), salvo los 240 m basales, que son margas y calizas. A partir de 1.940 m, potente tramo (725 m) de dolomías mesozoicas hasta 2.665 m, donde el sondeo corta 662 m de triásico (arcillas, anhidrita y dolomías, con calizas y areniscas en la base) hasta su finalización a 3.327 m. El tramo productor son los carbonatos mesozoicos.

5.3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

Entre los materiales prevariscos destacan diversos tramos arenoso-cuarcíticos de gran espesor regional, que podrían tenerse en cuenta por su fracturación. Sin embargo, en zonas con cobertera mesozoica no resulta sencilla la reconstrucción precisa de la geometría en el subsuelo de las capas del basamento.

En cuanto a las formaciones litoestratigráficas post-variscas, existen diversos tramos de interés, algunos de los cuales se extienden a lo largo de toda la región, mientras otros se encuentran localizados en sectores reducidos.

En una posterior fase de investigación habría que seleccionar estructuras trampa en el subsuelo que permitieran la ubicación del conjunto confinante-almacén en la profundidad adecuada.

Posibles formaciones almacén:

- Tramos arenosos y cuarcíticos del Cámbrico.- En el sector de La Demanda gran parte de la serie cámbrica conocida es arenoso-cuarcítica y de gran espesor: El conjunto de los Conglomerados de Anguiano (30 a 300 m) y Fm. Puntón (500 m) constituye un potente tramo de interés, así como las areniscas de la Fm Brieva, a techo del Cámbrico, a cuyo espesor (400 m) se añade el de parte de las formaciones areniscosas infra y suprayacentes (150 m de la Fm Najerilla y el tramo basal del Ordovícico). En la Rama Aragonesa se encuentra el tramo arenoso-cuarcítico basal del Cámbrico, la Cuarcita de Bámbola (300-450 m), que además se encuentra generalmente “arenizada”, de forma que parecen arenas sueltas. Otro tramo cuarcítico de cierto espesor es la Cuarcita de Daroca (90-250 m).
- Tramos cuarcíticos potentes del Ordovícico de la Cordillera Ibérica.- En la Rama Aragonesa, los tramos más potentes son los inferiores: la Fm. Deré (420-850 m) y la Cuarcita Armoricana (450-650 m), esta última también aflorante en la Rama Castellana.
- Ordovícico volcanosedimentario de la Cordillera Costero-Catalana.- La Fm. Els Metges, de 600 m de materiales volcánicos y volcanosedimentarios puede ser un almacén adecuado, a cuya base se añadirían localmente los conglomerados de la Fm. S.Cebriá, de hasta 50 m.
- Tramos cuarcítico-arenosos del Devónico.- Solamente tienen espesor relativamente grande las Formaciones Rodanas (250 m) y Huechaseca (140 m), ambas presentes únicamente en el sector de Tabuenca.
- Carbonífero.- En principio todo el Carbonífero tiene interés, por su abundancia en arenas y conglomerados y la presencia de carbón, aunque se pueden citar algunos tramos de las series conocidas. En el Anticlinal de Montalbán (Rama Aragonesa) destaca la Fm. Segura (200-250 m) y la parte inferior de la Fm. Torres. En la parte meridional de la Cordillera Costero-Catalana, la Unidad Arenosa de Bassetes (400 m) y los tramos arenosos potentes intercalados en la serie turbidítica de Poboleda, y en la parte septentrional, la Fm. Cánoves (más de 100 m).
- Conjunto Estefaniense-Pérmico Inferior.- Llega a alcanzar espesores de 1.500 m e incluye abundancia de facies arenosas y conglomeráticas, generalmente con importante proporción de material piroclástico, e incluyen también rocas volcánicas y frecuentes niveles de carbón, circunstancias todas ellas favorables para su utilización como almacén. Además, solamente presentan deformaciones alpinas, por lo que es factible reconstruir la geometría de los cuerpos litológicos en el subsuelo, que quedan limitados a la extensión de las pequeñas cuencas originarias. Hace falta una labor de prospección geofísica para su localización en zonas a profundidad adecuada.
- Pérmico Superior (facies *Saxoniense*).- Presenta características similares al Estefaniense-Pérmico Inferior, pero sin vulcanismo. Con frecuencia se encuentra en las mismas cubetas que éste, situado sobre él, aunque en muchos casos yace directamente sobre el basamento.

-
- Areniscas y conglomerados del Buntsandstein.- Presentes en gran parte de la Cuenca Ibérica, aunque puntualmente pueden presentarse con escaso desarrollo e, incluso, estar ausentes, especialmente en las zonas marginales y en el sustrato de la actual Cuenca de Almazán y sus inmediaciones.
 - Dolomías del Muschelkalk.- En la Cordillera Costero-Catalana, así como en el sector oriental de la Rama Aragonesa de la Ibérica, el Sector Levantino y parte del sector central de la Rama Castellana (hasta el “umbral del Tremedal”) se encuentran los dos tramos carbonatados (M1 y M3), separados por el tramo lutítico-evaporítico intermedio (M2), mientras en el resto de la Cordillera Ibérica solamente se encuentra representada la barra carbonatada superior (M3). El espesor de cada capa no es, en general, muy grande (del orden del centenar de metros), y sí lo es a veces el del tramo intermedio (M2). En algunos sondeos se aprecia que la capa superior (M3) a veces se encuentra formada por una alternancia de carbonatos y margas.
 - Carbonatos del Lías Inferior.- Se encuentran presentes en la práctica totalidad de la Cuenca Ibérica, separados de los tramos superiores carbonatados por el Lías Superior predominantemente margoso, si bien en muchas zonas este tramo margoso no se encuentra o es muy reducido, bien por causas sedimentarias o bien por causas tectónicas.
 - Carbonatos del Jurásico medio y superior.- En la Cordillera Ibérica, el Dogger es mayoritariamente carbonatado, mientras que falta o está reducido en gran parte de la Cordillera Costero-Catalana, y en el sector de Cameros la parte superior del Dogger es muy variada. Los carbonatos se prolongan en el Jurásico Superior en gran parte del el sector del Maestrazgo (donde se registran conjuntos de carbonatos jurásicos de más de 1.000 m), mientras en el resto los espesores de carbonatos son mucho más reducidos o con gran proporción de intercalaciones margosas.
 - Tramos carbonatados y tramos arenosos del Cretácico Inferior.- La distribución de facies del Cretácico Inferior es muy compleja, pero destaca la existencia de las Arenas de Utrillas en la práctica totalidad de la región a techo de la sucesión, a las que se les une la Fm. Escucha en el Maestrazgo. En el Maestrazgo, además, hay formaciones carbonatadas que pueden tener espesor notable en algunos puntos. El sector de Cameros es donde las facies arenosas del Cretácico Inferior presentan mayor desarrollo, llegando a sumar más de 3.000 m de serie en su parte oriental que incluye también facies carbonatadas. Se hace necesario un estudio detallado de la distribución lateral y vertical de facies de este intervalo, especialmente en el sector de Cameros.
 - Cretácico Superior.- El Cretácico Superior es mayoritariamente carbonatado en la mayor parte de la región, pero intercala con frecuencia tramos margosos, de manera que habría que localizar sectores con gran espesor de carbonatos. En muchas zonas se interdigitan estas facies con arenas en facies Utrillas.

Posibles formaciones confinantes:

- Tramos lutíticos potentes del Paleozoico.- Los confinamientos de posibles almacenes en el Paleozoico pre-varisco pueden depender de los tramos impermeables mesozoicos o de algunos tramos lutíticos paleozoicos

especialmente potentes o extensos, como las pizarras del Silúrico o formaciones turbidíticas del Carbonífero (Turbiditas de Poboleda, en los Catalánides).

- Tramo intermedio del Muschelkalk (M2).- Restringido a la parte oriental de la región, los sondeos muestran que su espesor puede ser muy notable, formado mayoritariamente por evaporitas.

- Triásico en facies Keuper y/o evaporitas retienses y liásicas (Fm. Lécera).- El Keuper está presente en toda la región, sirviendo de confinamiento a posibles almacenes en términos inferiores de la serie estratigráfica o en materiales más modernos cabalgados por láminas con nivel de despegue triásico. Solamente está ausente en zonas puntuales. En gran parte de los sondeos se le añade un conjunto evaporítico retiense-liásico (Fm. Lécera) situado inmediatamente encima y que puede adquirir potencia considerable. Tiene interés también como confinante de posibles almacenes en materiales continentales oligocenos y miocenos de la Cuenca del Ebro cabalgados en el sector de Cameros.

- Tramo predominantemente margoso del Liás Superior.- Los sondeos revelan que se encuentra presente en gran parte de la zona, limitando el tramo carbonatado del Liásico Inferior.

- Formaciones margosas del resto del Jurásico.- Con carácter local puede haber buenos confinamientos en estos tramos.

- Formaciones margosas del Cretácico Inferior.- La distribución de facies del Cretácico Inferior es muy compleja, pero puede haber buenos confinamientos de carácter local, especialmente interesantes en los sectores con mayor espesor de Cretácico Inferior (Cameros).

- Materiales de relleno de cuencas cenozoicas interiores de la Ibérica.- En las cuencas interiores de la Ibérica y los Catalánides con rellenos superiores a 800 m (límite de profundidad establecido para almacenamiento de CO₂) el relleno cenozoico puede constituir un buen confinamiento. La Cuenca de Calatayud presenta relleno evaporítico potente en las zonas centrales (500 m de evaporitas basales en el sector septentrional de la cuenca), siendo el espesor total de relleno de unos 700 a 1.200 m. Otras cuencas interiores no parecen tener suficiente espesor.

- Materiales de relleno de cuencas cenozoicas de la Depresión Prelitoral de los Catalánides.- En la Depresión Prelitoral se encuentran albergadas diversas pequeñas cuencas, unas exhumadas (Vallès-Penedès, El Camp, Vilanova i la Geltrú, Pla de Barcelona) y otras sumergidas (Barcelona, Tarragona), cuyo relleno (Oligoceno Superior-Cuaternario) llega a alcanzar los 4.000 m.

- Relleno cenozoico submarino del Surco de Valencia.- Los sondeos en el mar indican la presencia de un importante espesor de sedimentos finos sobre el sustrato mesozoico-paleozoico.

5.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN LA CORDILLERA IBÉRICA

A continuación se describen para cada zona las unidades potencialmente favorables para el almacenamiento geológico de CO₂, así como las posibles unidades que actuarían como sello.

5.4.1 SECTOR DE CAMEROS - DEMANDA

Almacén 1: Cretácico Superior carbonatado e Inferior arenoso y carbonatado.

- Espesor: Muy variable, pudiendo superar los 2.000 m.
- Profundidad techo: Muy variable. Generalmente aflora en superficie, pero hay bruscos cambios laterales de facies que suponen intercalaciones potentes de facies lutíticas a diversas profundidades que pueden constituir buenos confinamientos.
- Continuidad: Se encuentra presente en la práctica totalidad de la zona, pero presenta frecuentes cambios laterales bruscos de facies y espesor.
- Observaciones: El confinamiento puede confiarse a intercalaciones lutíticas potentes en las zonas de cambio de facies o bien a estructuras tectónicas (cabalgamientos a favor de materiales plásticos como el Keuper).
Con frecuencia se suma a este potente conjunto litológico permeable un tramo carbonatado jurásico que supone un incremento muy notable del espesor global.

Confinante 2: Lías medio – superior margoso.

- Espesor: Hasta 300 m.
- Profundidad base: Hasta 1.300 m en los sondeos consultados.
- Continuidad: Presente sólo de forma local con suficiente entidad.
- Observaciones: También pueden servir de confinamiento otros tramos lutíticos del Jurásico, que presenta cambios laterales de facies muy frecuentes.

Almacén 2: Calizas y dolomías del Lías Inferior.

- Espesor: 100-200 m.
- Profundidad techo: Hasta 1.300 m.
- Continuidad: Este tramo está presente en toda la zona, pero no el tramo margoso superior confinante, en cuyo caso se une su espesor al del conjunto cretácico permeable.

Confinante 3: Arcillas y evaporitas del Triásico superior en facies Keuper y Retiense evaporítico.

- Espesor: 300 m en los sondeos que perforan este conjunto.
- Profundidad base: Hasta más de 2.500 m.
- Continuidad: Presentes en toda la zona.
- Observaciones: Puede servir de confinamiento a formaciones más antiguas o a otras más recientes que se encuentren recubiertas de Keuper por repeticiones tectónicas.

Almacén 3: Dolomías del Muschelkalk y areniscas del Buntsandstein.

- Espesor: Unos 200 m en el sondeo que perfora estos materiales.
- Profundidad techo: 1.700 m en el sondeo que los perfora.
- Continuidad: Probablemente se encuentren en toda la zona, pero sólo a profundidad adecuada en las proximidades de los bordes.
- Observaciones: Los carbonatos del Muschelkalk se encuentran extraordinariamente reducidos (unos 20 m), siendo el Buntsandstein el que ocupa la práctica totalidad del espesor del conjunto.
Los datos de superficie indican que también pueden servir como almacén diversos tramos cuarcítico-arenosos del Cámbrico, de gran espesor en esta zona: Conglomerados de Anguiano (30-300 m) + Fm. Puntón (500 m), y Fm. Brieva (400 m) + parte de las formaciones superior e inferior (más de 200 m entre las dos).

5.4.2 MAESTRAZGO Y SECTOR DE ENLACE

Almacén 1: Carbonatos del Jurásico y Cretácico.

- Espesor: El conjunto suele superar ampliamente el millar de metros.
- Profundidad techo: Generalmente se encuentran en superficie, de forma que su confinamiento ha de confiarse a tramos lutíticos o estructuras tectónicas.
- Continuidad: Presentes en toda la zona. En algunos sectores el Cretácico Inferior contiene tramos arenosos (Fm. Utrillas) o frecuentes intercalaciones margosas, y también incluye capas de carbón que son objeto de explotación (Fm. Escucha)

Confinante 2: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper.

- Espesor: 200 a 300 m.
- Profundidad base: 0 a más de 2.500 m.
- Continuidad: Localmente ausente.
- Observaciones: Sirve de confinamiento a formaciones más antiguas y a formaciones más recientes recubiertas de Keuper por repetición tectónica.

Almacén 2: Dolomías superiores del Muschelkalk.

- Espesor: 120 – 200 m.
- Profundidad techo: 0 a más de 2.500 m.
- Continuidad: Localmente ausentes.

Confinante 3: Evaporitas y arcillas del tramo intermedio del Muschelkalk.

- Espesor: 600 a más de 1.200 m. Localmente ausentes.
- Profundidad base: Hasta más de 2.500 m.
- Continuidad: Localmente ausente, cuando no están tampoco las barras carbonatadas del Muschelkalk.

Almacén 3: Dolomías inferiores del Muschelkalk y Areniscas del Buntsandstein - Estefanopérmico.

- Espesor: 120 a más de 500 m (de los cuales son dolomías los 70-200 m superiores). Localmente ausentes las dolomías de la barra inferior del Muschelkalk.
- Profundidad techo: Hasta más de 2.500 m.
- Continuidad: Localmente ausente el tramo dolomítico (Muschelkalk).

5.4.3 SECTOR LEVANTINO

Almacén 1: Carbonatos del Jurásico y Cretácico.

- Espesor: El conjunto suele rondar el millar de metros, si bien en ocasiones se encuentra compartimentado por intercalaciones lutíticas.
- Profundidad techo: Generalmente se encuentran en superficie, de forma que su confinamiento ha de confiarse a tramos lutíticos o estructuras tectónicas.
- Continuidad: Presentes en toda la zona. En algunos sectores el Jurásico contiene intercalaciones margosas de cierta entidad que pueden compartimentar el conjunto permeable.

Confinante 2: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper y Retiense evaporítico.

- Espesor: 400 a 1.700 m.
- Profundidad base: 0 a más de 2.500 m.
- Continuidad: Ausente sólo localmente.
- Observaciones: Sirve de confinamiento a formaciones más antiguas y a formaciones más recientes recubiertas de Keuper por repetición tectónica.

Almacén 2: Dolomías del Muschelkalk + Areniscas del Buntsandstein.

- Espesor: Hasta 350 m de dolomías y más de 600 m de areniscas y lutitas del Bunt.
- Profundidad techo: Hasta más de 2.500 m.
- Continuidad: Presente en todos los sondeos.

5.4.4 COSTERO-CATALANA Y PLATAFORMA MARINA DEL DELTA DEL EBRO**Confinante 1: Cenozoico predominantemente lutítico.**

- Espesor: De 0 a más de 2.000 m en las cubetas cenozoicas de la Cordillera Costero-Catalana, y de 1.700 a más de 2.700 m en la plataforma marina del Delta del Ebro.
- Profundidad base: 2.000 m
- Continuidad: Presente en toda la plataforma y en el interior de las cubetas que forman la Depresión Prelitoral catalana.
- Observaciones: Inmediatamente al Norte de Barcelona el sustrato de la Depresión Prelitoral es directamente el Paleozoico. Solamente en posiciones más meridionales puede encontrarse alguna formación permeable mesozoica o cenozoica de cierta entidad (salvo posibles tramos arenosos potentes próximos a la base).

Almacén 1: Jurásico carbonatado y Cretácico Inferior carbonatado y Messiniense arenoso, localmente.

- Espesor: 250 m en sondeos de la Depresión Prelitoral, y 600 a más de 1.000 m en la plataforma marina del Delta del Ebro.
- Profundidad techo: 850 a 1.400 m en la Depresión Prelitoral. De 1.500 a 2.700 m en la plataforma marina del Delta del Ebro, donde se encuentra progresivamente más profundo al alejarse de la costa.
- Continuidad: Ausente solamente al Norte de Barcelona.
- Observaciones: Este conjunto litológico constituye el tramo productivo de los yacimientos de petróleo del Delta del Ebro: Tarraco, Casablanca, Dorada y Amposta Marino. Solamente los dos últimos se encuentran en el rango de profundidades considerado para el almacenamiento de CO₂, estando los otros a profundidad excesiva.

Confinante 2: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper.

- Espesor: 150 a más de 700 m.
- Profundidad base: En torno a 1.900 m en la Depresión Prelitoral y más de 3.200 m en sondeos de la plataforma marina.
- Continuidad: Parecen estar presentes en toda la zona, si bien generalmente a profundidad excesiva.

Almacén 2: Triásico carbonatado (Muschelkalk) y arenoso (Buntsandstein).

- **Espesor:** Los carbonatos del Muschelkalk atravesados por sondeos en la Depresión Prelitoral forman un conjunto de 550 m con gran proporción de tramos lutítico-evaporíticos. Las areniscas del Buntsandstein apenas han sido alcanzadas por los sondeos, pero es de esperar que tengan un espesor reducido.
- **Profundidad techo:** En torno a 1.900 m en sondeos de la Depresión Prelitoral y a profundidad excesiva en sondeos de la plataforma marina.
- **Continuidad:** Se observa una tendencia a la disminución de espesor hacia el interior del Mediterráneo.

5.4.5 RAMA ARAGONESA Y RAMA CASTELLANA

Confinante 1: Terciario continental.

Sólo presente con cierta potencia y extensión en cuencas intramontañosas, siendo especialmente profunda la de Calatayud (700 a 1.200 m). Otras cuencas no parecen tener suficiente espesor.

Almacén 1: Cretácico Superior carbonatado y Arenas de Utrillas.

El Cretácico Superior es mayoritariamente carbonatado, aunque con indentaciones lutíticas menores. La distribución y proporción de facies es variable a lo largo de la zona.

En la base de este conjunto carbonatado se encuentran las Arenas de Utrillas, presentes en prácticamente toda la zona y que se suman al espesor del conjunto carbonatado para la ubicación de posibles almacenes. Localmente se encuentran confinadas bajo tramos margosos.

El confinamiento ha de encontrarse en repeticiones tectónicas o bajo el relleno cenozoico de cuencas intramontañosas, ya que estos materiales afloran ampliamente en superficie.

Confinante y almacén 2: Alternancias de tramos carbonatados, arenosos y lutíticos en el Cretácico Inferior.

El Cretácico Inferior consta de diversos términos carbonatados y otros lutíticos alternantes, ocasionalmente arenosos, con rápidas variaciones laterales de facies y espesor, de forma que en unos sectores el conjunto puede ser predominantemente carbonatado y en otros, lutítico. En ocasiones dentro del Cretácico Inferior puede encontrarse el doblete confinante-almacén, sin tener que recurrir a confinamientos en términos superiores de la serie, pero son necesarios estudios de detalle para la prospección de este tipo de situaciones.

Almacén 3: Jurásico medio y superior carbonatado.

Se extiende a lo largo de la práctica totalidad de la cordillera, y suele incluir al menos un tramo margoso (Margas de Sot de Chera). Hay variaciones laterales, pero casi

siempre se mantiene la presencia de un tramo carbonatado potente, al menos en el Dogger.

Confinante 3: Tramos predominantemente margosos del Lías superior.

Es un conjunto margoso con intercalaciones carbonatadas, representado en general por las Margas de Turmiel, sobre las que yacen los carbonatos del Dogger. Muy continuo, se extiende a lo largo de toda la cordillera, con algunas variaciones de espesor. A pesar de no tener un espesor muy grande podría constituir un buen confinamiento dada su continuidad y relativa homogeneidad.

Almacén 4: Carbonatos del Lías Inferior y medio.

Se extiende también a lo largo de la práctica totalidad de la cordillera, estando constituido esencialmente por la Fm. Cuevas Labradas, de 100 a 180 m de espesor, a la que se añaden por debajo las Carniolas de Cortes de Tajuña (50-100 m) y las Dolomías de Imón (14 a 40 m). Sin embargo, en profundidad las carniolas suelen consistir en un conjunto esencialmente evaporítico con intercalaciones de dolomías (Fm. Lécera), de forma que pueden constituir un tramo confinante, quedando reducido el tramo carbonatado almacén a la Fm. Cuevas Labradas.

Confinante 4: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper y Fm. Lécera.

Se encuentran en la práctica totalidad de la zona, con un espesor estimado de unos 200 m, si bien localmente pueden haber sido laminadas tectónicamente. Abundan las facies evaporíticas. Posible tramo confinante también en situaciones de repetición tectónica, ya que constituye el nivel de despegue principal de las unidades cabalgantes. También es importante en estructuras diapíricas.

Almacén 5: Dolomías del Muschelkalk, areniscas y conglomerados del Buntsandstein y Estefano-Pérmico.

El Muschelkalk está formado por una sola barra carbonatada de espesor generalmente no superior a 50 m en la parte occidental de la zona, mientras en el sector oriental suele constar de dos tramos carbonatados separados por un conjunto lutítico-evaporítico intermedio que podría constituir un nivel confinante adicional. El Buntsandstein, eminentemente arenoso, está situado bajo los carbonatos del Muschelkalk, generalmente con un tramo de separación lutítico (a veces con evaporitas) que no suele presentar espesor suficiente para considerarlo un posible tramo confinante. Se encuentra presente en la práctica totalidad de la zona, aunque su espesor y granulometría disminuyen considerablemente en el sector NO de la Rama Castellana.

El Estefano-Pérmico, también de carácter arenoso y conglomerático dominante en general, se halla restringido a pequeñas cubetas aisladas, pudiendo alcanzar espesores de varios centenares de metros en algunos puntos, si bien cada pequeña cuenca posee características propias. Estos tres tramos litológicos se consideran conjuntamente ya que no existen entre ellos tramos impermeables de suficiente entidad como para constituir confinamientos apropiados. Los materiales de relleno de cubetas estefano-pérmicas suelen contener abundante proporción de material

piroclástico, así como frecuentes niveles de carbón, circunstancias especialmente favorables para la retención de CO₂.

Almacén 6: Carbonífero.

Restringido a zonas determinadas. Abundan las facies conglomeráticas y arenosas, localmente de gran desarrollo, así como los niveles de carbón. Algunos tramos lutíticos de las propias series carboníferas pueden constituir buenos confinamientos locales.

Almacén 7: Tramos cuarcítico-arenosos del Paleozoico varisco.

Su distribución espacial y vertical es compleja y no bien conocida, dada la relativa escasez de afloramientos paleozoicos, especialmente en la Rama Castellana. Destacan por su espesor y continuidad las formaciones Deré (420-850 m) y Armoricana (450-650 m), del Ordovícico, la Cuarcita de Daroca (90-250 m) y la Cuarcita de Bámbola (300-450 m), ambas del Cámbrico y la última generalmente "arenizada".

Además de la cobertera mesozoica y los depósitos cenozoicos, diversos tramos lutíticos paleozoicos pueden servir de confinante, especialmente los potentes tramos del Silúrico.

6. CUENCA DEL GUADALQUIVIR

6.1. MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La cuenca del Guadalquivir es una depresión alargada en dirección ENE-OSO casi completamente formada por sedimentos blandos. Desde los 800 m de cota, en que se sitúan los sedimentos más orientales, se produce un descenso topográfico gradual, hacia el oeste, hasta alcanzar en Huelva y Cádiz el nivel del mar. La sedimentación continúa hoy bajo el mar en el Golfo de Cádiz. Su límite norte está definido por una línea casi recta que separa los materiales paleozoicos del basamento de Sierra Morena de los cenozoicos. Este contacto ha sido comúnmente referido como “falla del Guadalquivir”, pero los sondeos y perfiles sísmicos actuales permiten afirmar que se trata de una flexura en el basamento.

En su mitad norte, los sedimentos que afloran en superficie son autóctonos, mientras que en su mitad sur son olistostromas con materiales del Mesozoico y Cenozoico, con disposición caótica, procedentes del Subético (figuras 6.1 y 6.2). Como en las cuencas típicas de antepaís, el margen norte (pasivo), se caracteriza por una gradual profundización del basamento hacia el sur. El margen sur presenta un frente mucho más irregular, debido a la actividad del orógeno bético.

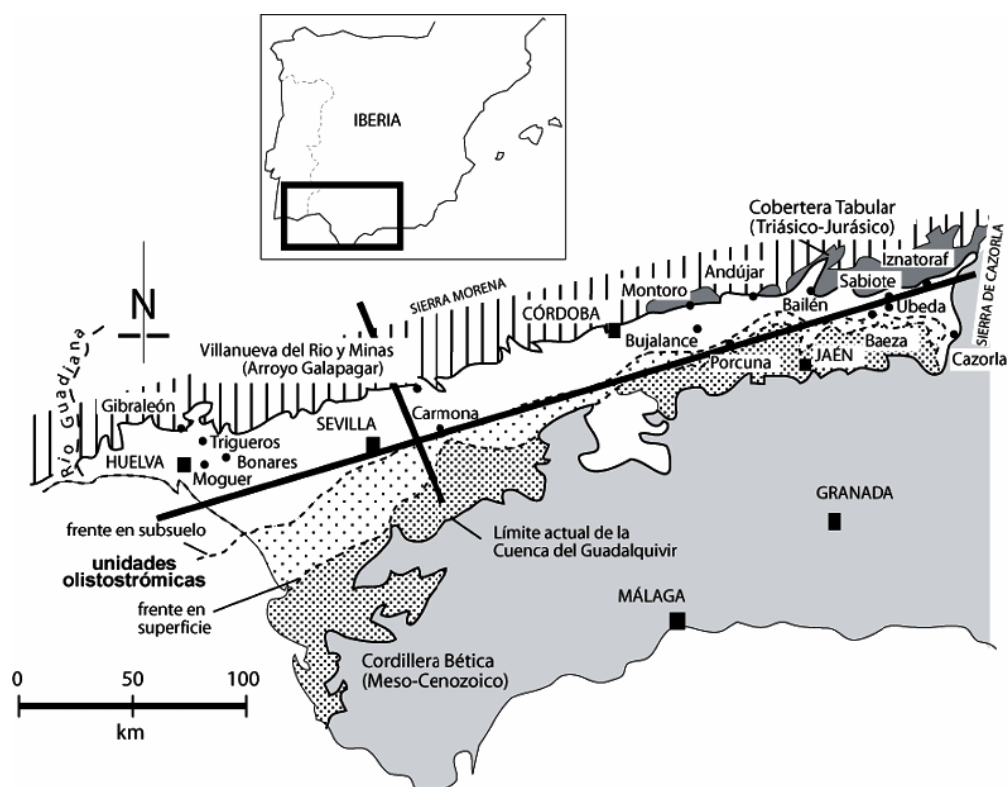


Figura 6.1 Esquema geológico de la Cuenca del Guadalquivir. Las líneas negras gruesas representan los cortes presentados en 5.2 (González-Delgado *et al.*, 2004)

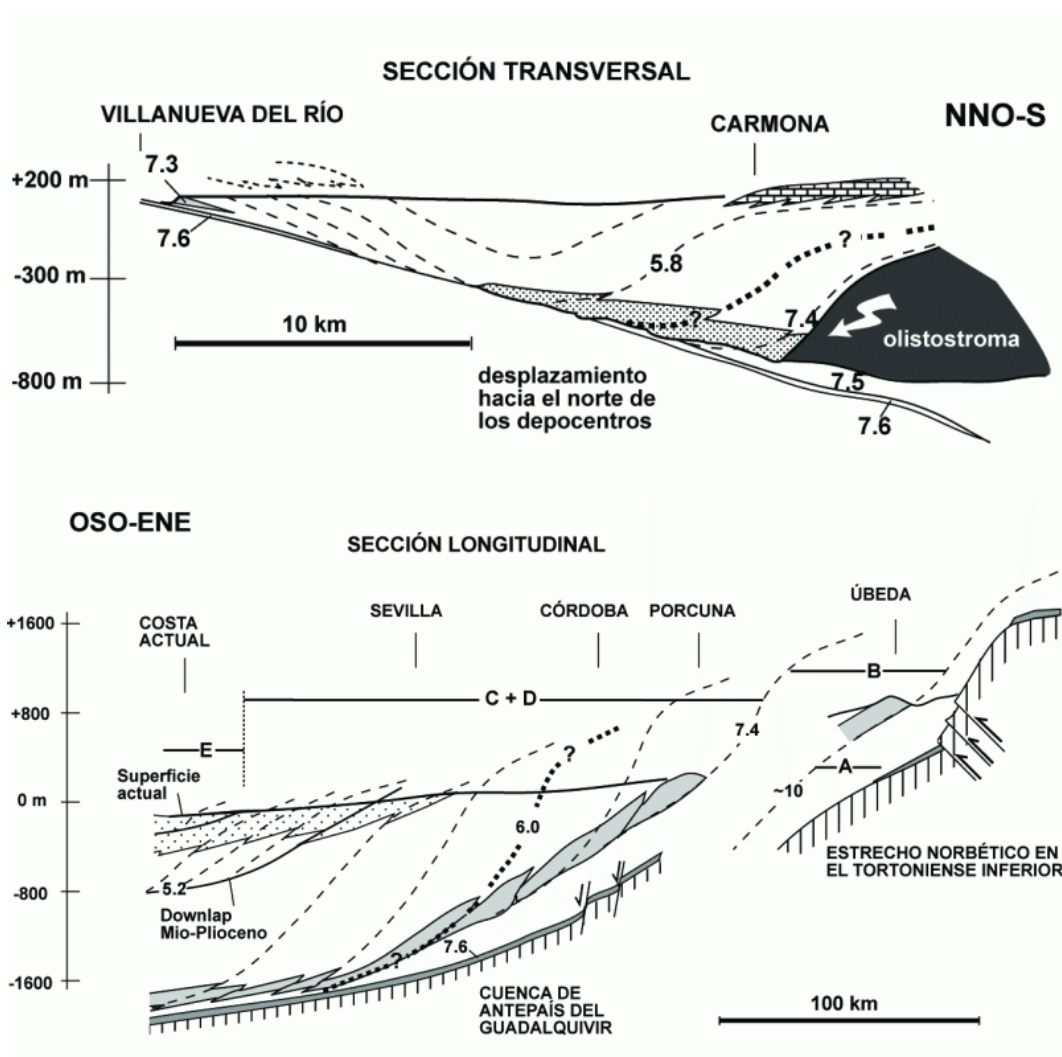


Figura 6.2 Secciones, cuya traza se representa en 5.1, de la Cuenca del Guadalquivir. a.- Sección transversal. b.- Sección longitudinal. (González-Delgado *et al.*, 2004)

6.2 SONDEOS PETROLÍFEROS

En la Cuenca del Guadalquivir se han consultado los siguientes sondeos (figura 5.3):

Para el sector oriental: números 014, 016, 017 y 017bis.

Para el sector central. (Córdoba-Sevilla): números 022, 046, 059, 071, 082, 092^a, 105 bis, 546, 583, 584, 585, 596, 597, 598, 603, 610, 628, 629, 630. Los describimos según su posición de E a O.

Para el sector occidental (Sevilla-Línea de costa. Huelva-Cádiz): números 626, 064, 069, 625, 483, 503, 544, 045, 604, 243, 225, 223, 030, 048, 550, 586, 581, 551, 582, 482, 180, 047, y 044.

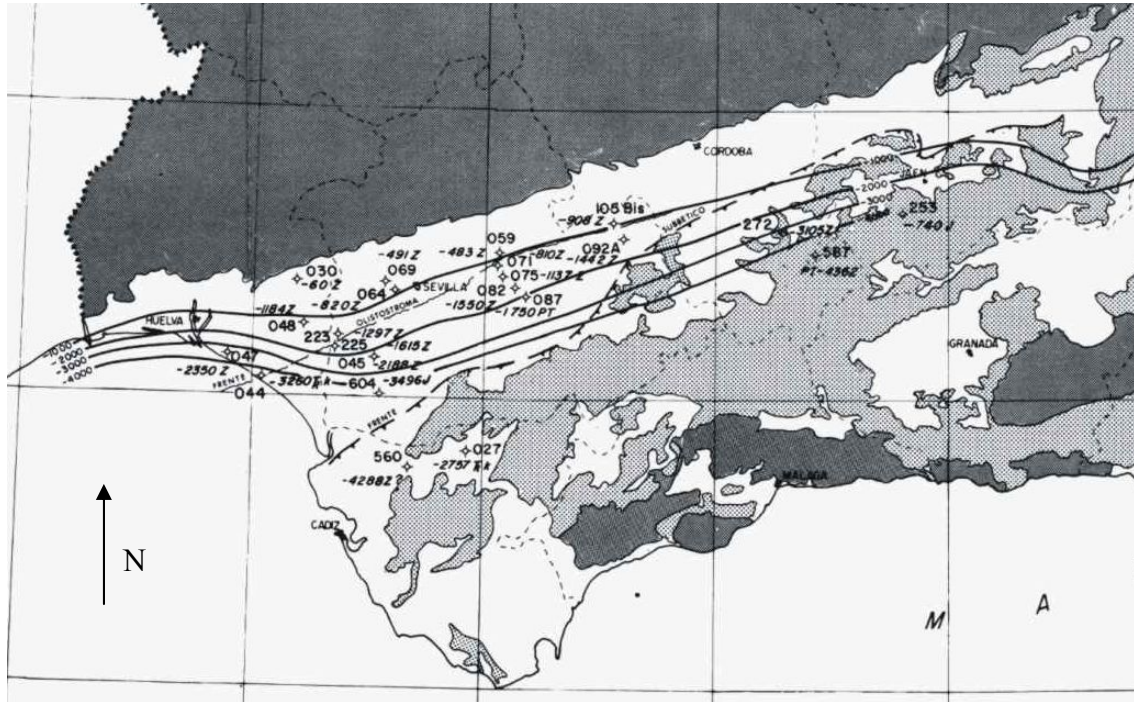


Figura 6.3 Situación de los sondeos petrolíferos en la Cuenca del Guadalquivir e isobatas del techo del Paleozoico (datum nivel del mar) (Extractada de I.G.M.E., 1987)

6.2.1. SECTOR ORIENTAL

Baeza – 1 (nº 014)

Corta una serie de margas con pasadas de areniscas y arenas en la base, asignadas al Mioceno. Bajo esta serie unos pocos metros de margas rojas que se asignan al Trías. El sondeo acabó a los 410 m de profundidad.

Baeza – 2 (nº 016)

Corta un conjunto de margas (0 a 467 m) asignadas al Tortonense, bajo las cuales y hasta 530 m se disponen unas areniscas y calizas arenosas, con 63 m de espesor. Desde 530 hasta 639,6 m, profundidad final, se cortan margas con pasadas de areniscas asignadas al Trías.

Bailén – 1. (Baeza- 4) (nº 017)

De 0 a 294 m margas del Mioceno.
De 294 a 400 m margas y areniscas del Trías.
De 400 a 458 m pizarras y calizas asignadas al Paleozoico.

Villanueva de la Reina – 1 (Baeza- 3) (nº 017bis)

De 0 a 200 m, margas del Mioceno.
De 200 a 230 m, arenisca basal del Mioceno.
De 230 a 294 m, margas con areniscas del Trías.
De 294 a 321,6 m, pizarras del Paleozoico.
Se corta una formación de areniscas, de forma discontinua, con 63 m de máximo espesor, entre formaciones impermeables. Sus características geométricas y profundidad a la cual se encuentran no las hace interesantes.

6.2.2. SECTOR CENTRAL (CÓRDOBA-SEVILLA)

Río Guadalquivir N- 1 (nº 610)

El más oriental del sector central. Corta de 0 a 968 m una serie de arcillas con pasadas de arenisca y arena, asignada al Tortoniense. De 968 hasta 988 m, profundidad final del sondeo, se perforaron rocas ígneas. Los tramos de areniscas se sitúan entre 400 y 500 m, así como entre 700 y 800 m, con un espesor no superior a los 50 m.

Écija – 3. bis (nº 105)

Presenta como más interesante un nivel basal, entre 914 y 993 m de arenas, areniscas y arcillas arenosas, sobre el que se sitúa un tramo, hasta la superficie, de margas con alguna pasada arenosa.

De 993 a 994 m, profundidad final del sondeo, corta gneises.

Écija - 1 (nº 022)

Sólo perfora hasta 353,7 m de margas con intercalaciones de arenas y areniscas.

Écija (nº 092)

Describe una serie de 1.542 m de alternancia de arcillas y areniscas. Las intercalaciones de arenisca con un espesor no superior a los 20 m pero con repeticiones rítmicas cada 200 m aproximadamente.

De 1.542 a 1.547 m, profundidad final del sondeo, corta pizarras.

Córdoba B - 1 (nº 630)

Parece que perforó hasta los 1.265 m. No se expone la columna en la publicación consultada.

Córdoba B - 2 (nº 603)

Parece que perforó hasta los 712'8 m. No se expone la columna en la publicación consultada.

Córdoba A - 2 (nº 597)

Corta de 0 a 25 m, arenas, conglomerados y arcillas. De 25 a 676 m, arcillas, arenas y arcillas limosas.

De 676 a 690 m, arenas y hasta 706'8 m, profundidad final del sondeo, corta granito.

Córdoba A - 4 (nº 628)

Perforó hasta 799 m. No se expone la columna.

Córdoba A - 1 (nº 596)

Corta hasta 959 m una serie de arcillas y arenas, con un tramo entre 370 y más de 450 m de arenas.

De 959 a 1.000 m son calcarenitas y conglomerados y de 1.000 a 1.014 m, pizarras.

Córdoba A - 3 (nº 598)

Perfora unos niveles de arenisca y arena desde 645 a los 660 m de profundidad, sobre los que se encuentra un tramo de arcillas con intercalaciones de areniscas y arenas.

De 645 a 675 m corta esquistos.

Córdoba A - 5 (nº 629)

Perforó hasta los 793,75 m. No se expone la columna gráfica.

Carmona-6 (n° 087)

De 0 a 1.846 m son arcillas con trazas de yesos, calizas y areniscas. Calificada la serie como un olistotroma. No se destaca nivel detrítico alguno.

Carmona - 5 (n° 082)

Igual al anterior pero este llega al sustrato a los 1.571 m en donde se cortan gneises hasta 1.575 m. Calificado como olistostroma del Tortoniense.

Carmona-4 (n° 075)

De 1.206 a 1.230 m corta unos niveles de arenas sueltas con pirita sobre el que se dispone la serie de arcillas. De 1.230 a 1.232m gneises granatíferos.

Carmona-3 (n° 071)

Corta hasta 903 m arcillas con un tramo, entre 610 y 675 m de arcillas con areniscas y arenas.

De 903 a 907,50m Pórfido Cuarzífero.

Carmona- 2 (n° 059)

El pórfido cuarzífero se corta a los 573 m y hasta los 583 m sobre él y desde los 500 m, margas con pasadas de arenisca y anhidritas; sobre estos niveles, hasta la superficie, arcillas.

Sevilla- 3 (n° 585)

Su profundidad fue de 641 m. No se expone su columna.

Carmona- 1 (n° 046)

Cortó margas desde superficie hasta los 630 m. Después y hasta la profundidad final del sondeo, 792,8 m, alternancia de margas, areniscas y arenas con pasadas de conglomerado.

Sevilla- 1 (n° 583)

Perforó hasta los 827 m. No se expone la columna gráfica.

El Ciervo- 1 (n° 546)

Perforó hasta los 748 m. No se expone la columna gráfica.

Sevilla- 2 (n° 584)

Perforó hasta los 910 m. No se expone la columna gráfica.

A tenor de las columnas sintéticas consultadas de los sondeos petrolíferos, ni las características geométricas de los niveles permeables ni su profundidad, en general menores de 800 m ó algo más, no parece existir una formación acuífera favorable para convertirse en almacén de CO₂ si bien habría que consultar las columnas detalladas de los sondeos tratando de efectuar correlaciones entre ellas.

Da la impresión, según los sondeos n° 087, 082 y 075 que hacia el borde sur de la cuenca, la serie Mio-Pliocena es más potente y quizás pueda poseer niveles calcareníticos más desarrollados en potencia y extensión. Otros parámetros necesarios sí son favorables como son el encontrarse los niveles permeables (calcarenitas y/o turbiditas) entre potentes tramos impermeables, margosos y/o arcillosos.

6.2.3 SECTOR OCCIDENTAL (SEVILLA-LÍNEA DE COSTA- HUELVA-CADIZ)

San Juan V-1 (nº 626)

Perforó hasta 84 m. No se expone columna gráfica.

Castilleja de la Cuesta - 1 (nº 064)

Hasta 922 m margas y en la base unos niveles de areniscas y conglomerados (aprox. 10-20 m de espesor). Hasta los 937 m, profundidad final, cortó arcillas esquistas.

Salteras - 1 (nº 069)

Serie margosa desde superficie hasta 644 m de profundidad, con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Arcillas esquistas desde ese punto hasta 665 m.

Como en el anterior los niveles de interés presentan un espesor de entre 10 y 20 m.

San Juan A - 1 (nº 625)

Perforó hasta los 1.073,5 m No se expone la columna gráfica.

Marismas C - 1 (nº 483)

Este sondeo es distinto a todos los anteriores ya que da una serie de arcillas hasta los 250 m y hasta 1.090 m una alternancia de arcillas, calizas, areniscas y arenas. La potencia de los niveles calizos ó areniscos intercalados en las arcillas, es de unos 20 m y se presentan de forma rítmica.

Desde 1.090 hasta 1.136 m se cortan pizarras y filitas.

Palancares - 1 (nº 503)

Hasta 815 m corta arcillas y a partir de esta profundidad y hasta 1.028 m, alternancia de areniscas y arcillas.

Palancares - 2 (nº 544)

Profundizó hasta los 976,2 m. No se expone la columna gráfica.

Isla Mayor - 1 (nº 045)

Cortó hasta los 2.167 m un conjunto de arcillas y arcillas calcáreas con trazas de areniscas y pasadas de caliza arenosa.

Entre 2.167 m y 2.195 m, es decir con 28 m de espesor, unos niveles de caliza arenosa (calcarenitas) bajo los cuales y hasta 2.373 m, profundidad final del sondeo, se cortan esquistos pizarrosos negros.

Bética 14 - 1 (nº 604)

Hasta los 595 m corta arenas y arcillas asignadas al Mioceno- Pliocuaternalio. Bajo este tramo y hasta 3.216 m se perfora una serie de arcillas y halita con pizarras, que se asigna al Triásico- Mioceno alóctono, bajo el cual se encuentra de nuevo el Mioceno de margas y calizas hasta los 3.500 m descansando en unas calizas jurásicas cortadas hasta los 3.507 m, profundidad final del sondeo.

Sapo - 1 (nº 243)

Corta hasta los 835 m arcillas del Mioceno y bajo ellas, arcillas con dolomías brechoides y calizas areniscosas hasta los 971,1 m, profundidad final del sondeo. Este tramo basal se asigna como olitostroma.

Casa Nieves - 1 (nº 225)

Hasta los 1.413 m perfora casi exclusivamente arcillas mio-pliocenas. De 1.413 a 1.500 m, otras arcillas que hacen corresponder con un manto de corrimiento bajo las cuales se disponen margas, otra vez miocenas, hasta los 1.603 m
De 1603 a 1.623 m, arenisca calcárea sobre esquistos con venas de cuarzo, perforados hasta los 1.630 m, profundidad final del sondeo.

Villa Manrique - 1 (nº 223)

Hasta los 1.371 m corta prácticamente arcillas con algunas pasadas de areniscas, la más significativa a los 1.196 m, (con un espesor menor de 20 m); esta serie se dispone sobre esquistos hasta los 1.317 m, profundidad final del sondeo.

Villalba de Alcor - 1 (nº 030)

Corta las pizarras paleozoicas muy rápidamente, a los 200 m

Almonte - 1 (nº 048)

Otro sondeo distinto a los anteriores ya que aparecen por primera vez, bajo 701 m de arcillas del Tortonense unas calizas dolomíticas del Lías, hasta los 813 m
Desde 813 hasta 1.000 m alternancia de anhidritas, arcillas areniscas y calizas dolomíticas del Trías, bajo la cual se ubica un tramo arcilloso con trazas de yesos y calizas hasta los 1.264 m, donde aparecen las pizarras paleozoicas.

Melo - 1 (nº 550)

Parece que perforó hasta los 1.114 m. No se tienen datos.

Marismas - 2 (nº 586)

Perforó hasta 1.253,5 m. No se tienen datos.

Marismas - 3 (nº 581)

Perforó hasta 1.135 m. No se tienen datos.

Rincón - 1 (nº 551)

Perforó hasta 1.207 m. No se tienen datos.

Marismas - 4 (nº 582)

Perforó hasta 1.351 m No se tienen datos.

Marismas A - 1 (nº 482)

Hasta 700 m corta una serie de arcillas y limos bajo la cual se desarrollan arcillas, limos, calizas y areniscas. Los tramos calcáreos y/ó areniscosos se dibujan a partir de 900 m con espesores superiores a los 50 m entre niveles arcillosos destacando uno basal de casi 100 m, entre 1.275 y 1.357 m sobre calizas jurásicas cortadas a esa profundidad y hasta 1.378,6 m, profundidad final del sondeo.

Huelva-1 (nº 180)

Este sondeo corta desde la superficie hasta los 662 m niveles de arcillas, bajo las cuales se desarrolla un jurásico de dolomías y calizas hasta 1.451 m, profundidad final del sondeo.

Moguer - 1 (nº 047)

Próximo al anterior y muy similar, ya que corta arcillas hasta 713 m (Tortonense) y calizas- dolomías jurásicas hasta 1.904 m para meterse en unas evaporitas (yesos y sal) hasta 2.152 m, bajo las cuales se cortaron arcillas hasta 2.338 m, ambos tramos del Keuper. El Bunt se perforó entre los 2.338 y 2.400 m (areniscas, arcillas y

conglomerados) bajo el cual se desarrollan arcillas micáceas y pizarrosas atribuidas al Paleozoico.

Asperillo - 1 (nº 044)

Sondeo muy similar al anterior con los tramos más desarrollados, con mayores espesores.

De 0 a 1.232 m arcillas del Tortoniense; de 1.232 a 2.460 m, calizas y dolomías jurásicas; de 2.460 a 3.309'6 m, sal, anhidrita y arcillas triásicas.

6. 3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

Según la configuración litoestratigráfica de la cuenca existen, teóricamente, varios tramos de interés en ella como potenciales almacenes de CO₂. Estos tramos son los calcareníticos y/o areniscosos que se presentan a la base de las secuencias ó unidades tectosedimentarias.

Por lo tanto, tenemos como posibles almacenes con permeabilidad primaria las formaciones y tramos siguientes:

- Calcarenitas del Tortoniense I- Serravalliense.
- Calcarenitas del Tortoniense II- Tortoniense I
- Areniscas del Messiniense I- Tortoniense II.
- Arenas y Areniscas (turbiditas) del Plioceno- Messiniense II.

Sin embargo las columnas gráficas sintetizadas de los sondeos petrolíferos que se han consultado no señalan a estas formaciones y tramos como de gran interés, fundamentalmente por su reducido espesor en la mayor parte de los casos y/o no encontrarse a la profundidad adecuada, superior a los 800 m, si en cambio, presentan un parámetro muy idóneo como es el encontrarse entre formaciones impermeables y por su geometría sigmoidal estar, también, posiblemente selladas lateralmente.

Así en el Sector Oriental de la cuenca todos los sondeos petrolíferos consultados cortan el sustrato preneógeno entre 230 y 530 m, constituido por las distintas facies triásicas sin que estas, especialmente las areniscas del Bunt, se encuentren, tampoco, bien desarrolladas ni a la profundidad adecuada como para constituir un almacén.

En el Sector Central (Córdoba- Sevilla) los sondeos números 105, 092 y 596 cortan unos niveles favorables a la profundidad adecuada, superior a los 800 m existiendo otros sondeos de los que se carece su columna gráfica sintética. En cualquier caso, esa zona se configura como la más apropiada para efectuar sobre ella estudios bibliográficos de detalle (columnas y geofísica del petróleo), es la zona que podríamos denominar como curso bajo del Genil.

Se debe mencionar que el sector sur de la cuenca del Guadalquivir que queda comprendido entre su borde meridional y un eje imaginario que la divide en dos mitades, eje que pasaría aproximadamente desde el sondeo nº 044 (Asperillo) hasta el sur de los nº 014 y 016 pasando por el sur de Sevilla, queda en principio falto de interés debido a la complejidad litoestratigráfica y estructural que presenta al estar ocupado por unidades, formaciones y tramos olitostromicos.

En el Sector Occidental (Sevilla- línea de Costa. Hueva- Cádiz) los sondeos efectuados en la zona al norte del eje anteriormente descrito, cortan una serie impermeable entre la que se intercalan ó se sitúan en su base, niveles calcareníticos de posible interés; son los sondeos números 064, 483, 503, 544, 045 y 223,

principalmente. Esta zona que podríamos denominar San Lucas La Mayor también debería someterse a estudios detallados para configurar su previabilidad como almacén.

Asimismo la zona en donde se efectuaron los sondeos números 048, 482, 180, 047 y 044 principalmente también podría poseer unidades almacén pero en este caso constituidas por las formaciones carbonatadas asignadas al jurásico y que se perforaron en general a más de 800 m de profundidad y entre formaciones impermeables, bien del Neógeno y/o del Paleozoico ó Triásico.

En definitiva, y, siempre situándonos al norte del eje ENE-SSO que divide la Cuenca del Guadalquivir en dos mitades, tendríamos que casi toda la mitad norte, desde el SO de Córdoba hasta las líneas de costa, sur de Huelva, tiene posibilidades de poseer unidades, formaciones o tramos capaces de constituirse en almacenes, tanto por porosidad primaria como secundaria.

En toda esa margen de la cuenca se debería realizar un detallado estudio bibliográfico de las columnas de los sondeos petrolíferos realizados, sondeos de captación de aguas subterráneas y campañas de geofísica para posteriormente proceder a la caracterización y ensayos específicos en las áreas que se seleccionen.

6.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR

A continuación se describen para cada zona las unidades potencialmente favorables para el almacenamiento geológico de CO₂, así como las posibles unidades que actuarían como sello.

Confinante: Terciario predominantemente lutítico.

- Espesor: Hasta más de 3.000 m.
- Profundidad base: Hasta más de 3.000 m.
- Continuidad: Toda la cuenca, con espesor creciente hacia el SE y O.
- Observaciones: Incluye algunos tramos arenosos que en los sondeos suelen presentar espesores de 10-20 m, excesivamente reducidos.

Almacén 1: Arenas y conglomerados de la base del relleno terciario.

- Espesor: 0 a 225 m. El espesor máximo (460 m de alternancia arenas-arcillas) se encuentra en el extremo occidental de la cuenca.
- Profundidad techo: Hasta más de 3.000 m.
- Continuidad: Se encuentran ausentes o con espesor muy reducido en gran parte de la cuenca

Almacén 2: Jurásico carbonatado.

- Espesor: 225 m en el sondeo que lo ha perforado completamente.
- Profundidad techo: 1.200 – 1.350 m.
- Continuidad: Solamente se encuentra en el extremo occidental de la Cuenca.

7. CUENCA DEL TAJO

7.1 MARCO GEOLÓGICO GENERAL

Esta cuenca, más o menos de forma triangular, situada en el centro de la Península, limita en su flanco noroeste con el Sistema Central, que se encuentra volcado, mediante fallas inversas, sobre los materiales más antiguos de la cuenca. Lo mismo ocurre en su flanco suroeste, en el que las rocas graníticas y metamórficas de los Montes de Toledo se encuentran cabalgantes sobre los sedimentos paleógenos, mientras que los materiales neógenos recubren en parte ese contacto tectónico. Hacia el este, la Cuenca del Tajo limita con la Cordillera Ibérica, también mediante un contacto mecánico (figuras 6.1 y 6.2)

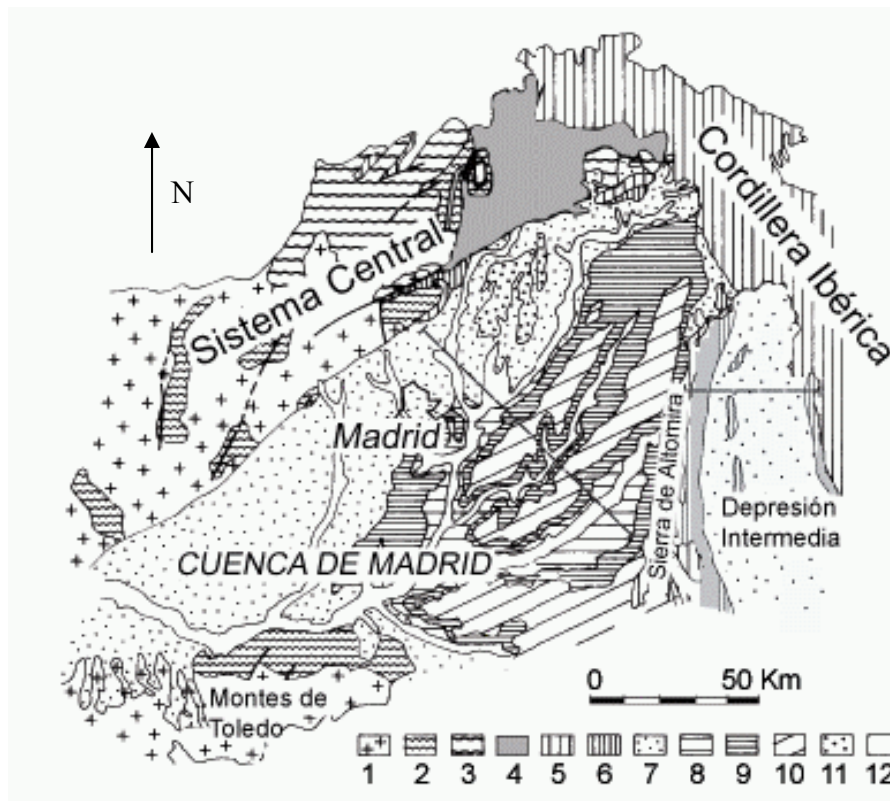


Figura 7.1 Esquema geológico de la Cuenca del Tajo y sus márgenes. Las líneas indican el trazado de los perfiles representados en la figura 6.2. Leyenda: 1. Rocas plutónicas; 2. Pizarras, mármoles, cuarcitas y gneises; 3. Pizarras y metagrauvas; 4. Pizarras, cuarcitas y metavulcanitas; 5. Mesozoico; 6. Paleógeno; 7. Mioceno indiferenciado; 8. Unidad Inferior del Mioceno; 9. Unidad Intermedia del Mioceno; 10. Unidad Superior del Mioceno; 11. Plioceno; 12. Cuaternario. (Alonso-Zarza *et al.*, 2004).

La cuenca se encuentra dividida en dos partes por la Sierra de Altomira, una estrecha alineación de relieves, formados por materiales cretácicos y paleógenos, que discurre en dirección norte-sur y que se corresponde con el frente de un manto de corrimiento enraizado en la Serranía de Cuenca. Las dos subcuencas resultantes son la Cuenca de Madrid y la Depresión Intermedia o de Loranca (figura 6.3).

La Depresión Intermedia es, al menos para las unidades inferiores, una cuenca de tipo *piggy back*, generada durante la Orogenia Alpina según una tectónica de piel fina que se nuclea a favor de una falla en el basamento por un accidente central (anticlinal de Trillo-Pareja-Huete-Carrascosa). La Cuenca de Madrid es una cuenca intracratónica, en la que la estructura de sus márgenes está condicionada por los esfuerzos que afectaron al margen de la Placa Ibérica durante los movimientos alpinos.

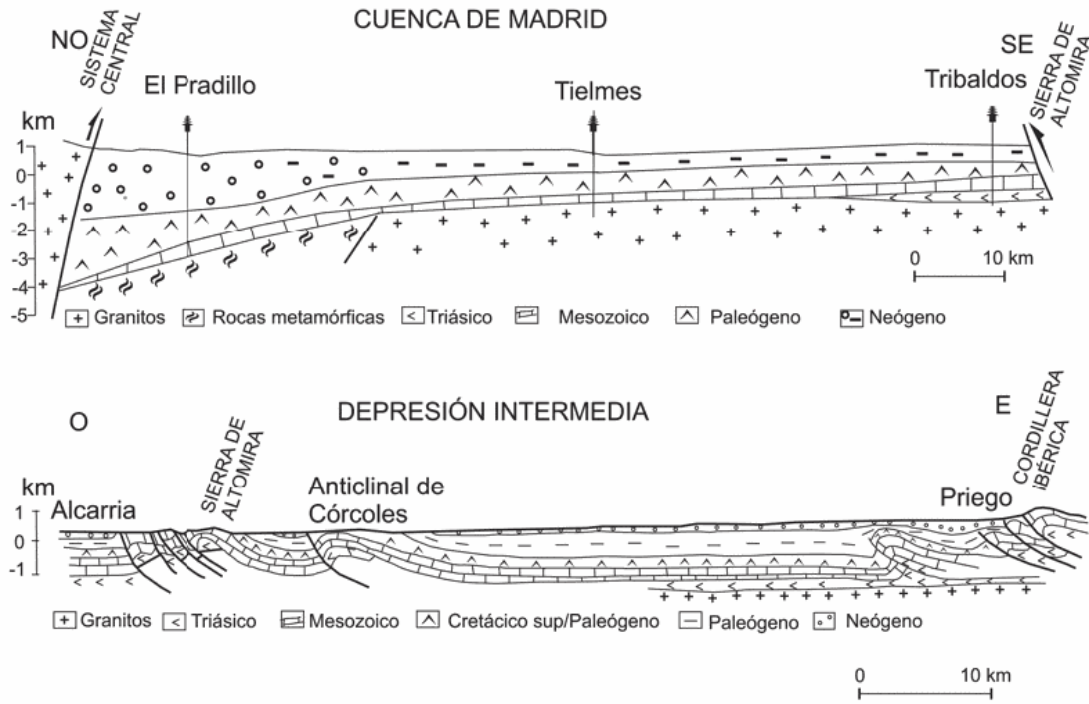


Figura 7.2 Perfiles sísmicos esquemáticos de la Cuenca de Madrid y la Depresión Intermedia. (Alonso-Zarza *et al.*, 2004)

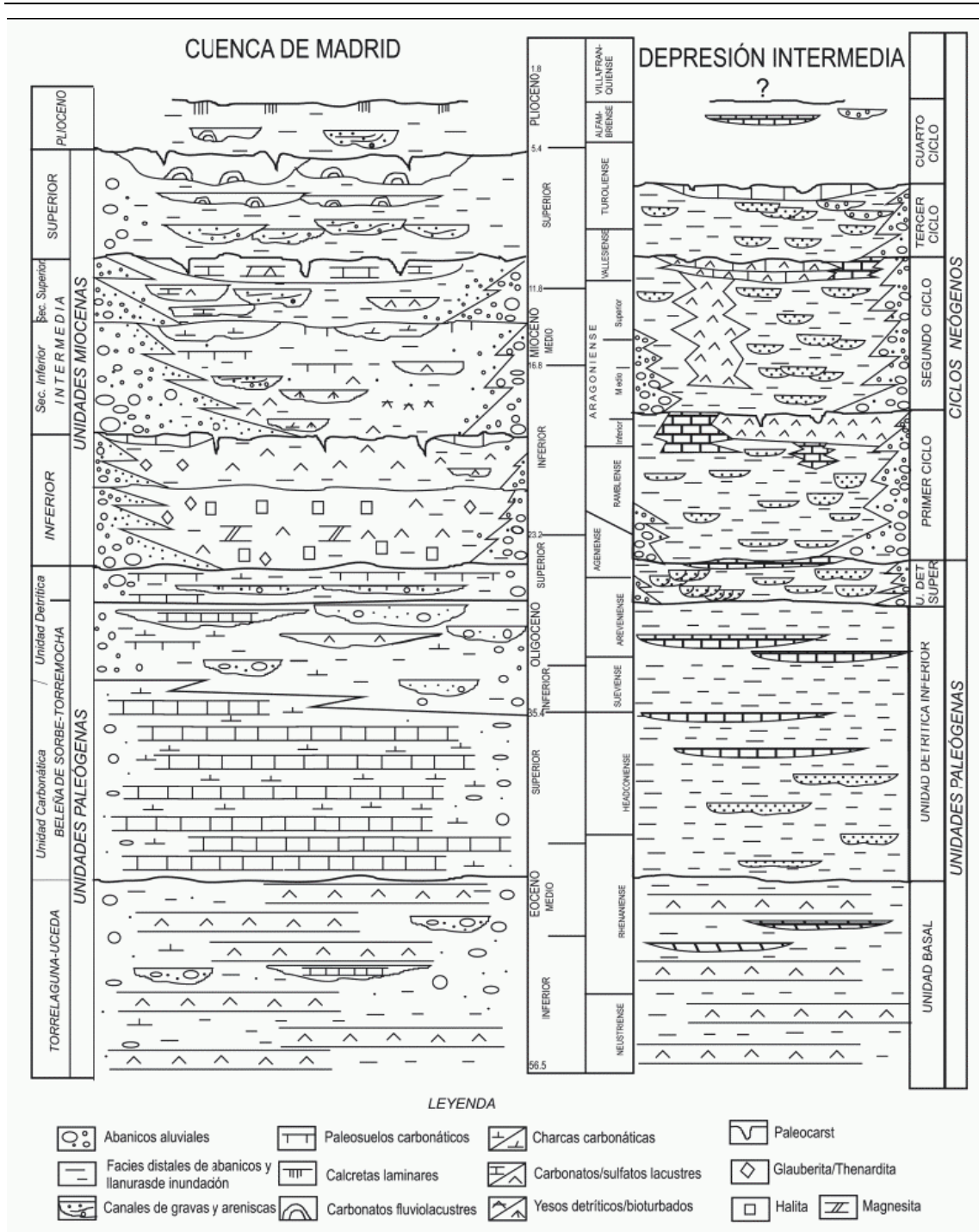


Figura 7.3 Columnas estratigráficas sintéticas de la Cuenca de Madrid y de la Depresión Intermedia. (Alonso-Zarza *et al.*, 2004)

7.2 SONDEOS PETROLÍFEROS

En la Cuenca de Madrid se han consultado los siguientes sondeos: N°: 164, 320, 447, 480 y 552 y en la Depresión Intermedia se analizan los sondeos siguientes: N°: 024, 101, 297, 298, 304 y 324. (Figura 6.4)

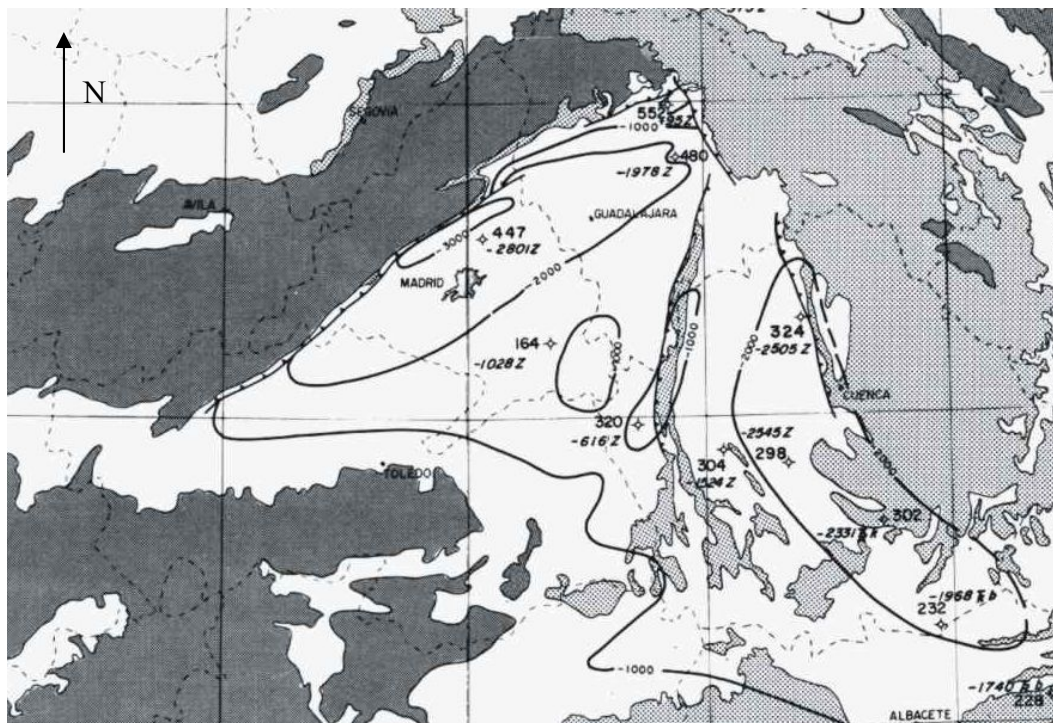


Figura 7.4 Situación de los sondeos petrolíferos consultados de la Cuenca del Tajo con indicación de las isobatas del techo del Paleozoico (datum nivel del mar) (Extractado de I.G.M.E., 1987).

7.2.1 CUENCA DE MADRID

Tielmes - 1. (n° 164)

Señala una formación interesante cretácica entre 1.393 y 1.622 m de profundidad, de dolomías y anhidritas con una base detrítica de 72 m de potencia (posiblemente Utrillas). Esta formación está limitada a muro por granito y a techo por arcillas rojas atribuidas al Paleógeno, con una potencia superior a los 300 m. El basamento granítico se sitúa a 1.622 m y lo corta en 33 m, hasta 1.655 m, profundidad final del sondeo.

Tribaldos - 1. (n° 320)

Corta también una serie carbonatada asignada al Cretácico desde casi los 800 m hasta los 1.100 m de profundidad, bajo la cual se instalan 70 m de margas, arcillas y arenas (posiblemente Utrillas). Bajo esta, una serie Triásica condensada en la que destacan casi 100 m de areniscas del Bunt directamente sobre el granito a 1.450 m de profundidad y hasta los 1.479,6 m, profundidad final del sondeo.

El Pradillo - A. (n° 447)

El Cretácico de dolomías, calizas y base detrítica (posiblemente Utrillas) lo corta desde los 3.246 a los 3.419 m. La base de las arenas del posible Utrillas va de 3.374 m. a

3.419 m., es decir, 45 m. de espesor. Bajo esta serie se encuentran las pizarras del Paleozoico.

En el resto de la serie paleógena – neógena es interesante un tramo de arenas porosas con intercalaciones arcillosas, asignadas al Oligoceno Superior- Mioceno inferior y que se cortaron entre 1.210 y 1.992 m., es decir con 782 m de potencia. La formación anterior no se observa en los sondeos Tielmes y Tribaldos.

Santa Barbara - A. (nº 480)

El tramo o formación carbonatada del Cretácico lo corta a 2.334 m hasta 2.587 m, en donde aparecen las areniscas, arenas y arcillas asignadas a Utrillas hasta los 2.650 m. Esta formación posee a techo y muro materiales impermeables. A muro las arcillas abigarradas del Keuper y, a techo, las arcillas con yeso y dolomías del Cretácico Superior - Eoceno. Las areniscas del Bunt se cortan a los 3.000 m aproximadamente y hasta los 3.040 m, donde aparece el Paleozoico, aquí conformado por gneises. El sondeo acaba a los 3.150 m.

Baides – 1. (nº 552)

Comienza directamente en Cretácico – Paleógeno, cortando el Utrillas a 463 m hasta los 525 m aproximadamente. Bajo él y después de más de 100 m de arcillas del Keuper y sal se cortan dolomías, margas y areniscas del Muschelkaalk y Bunt hasta 839 m, es decir desde 769 a 839 m, donde aparece el granito hasta los 854 m, profundidad final del sondeo.

7.2.2 DEPRESIÓN INTERMEDIA

San Lorenzo de la Parrilla (nº 024)

Emplazado en terrenos mesozoicos, comienza con una serie de carbonatos del Cretácico Superior y continúa con calizas, dolomías y anhidritas hasta 1.969 m, donde comienza el Trías con arcillas, dolomías y sal hasta los 2.580 m, profundidad final. Corta el Cretácico Inferior de areniscas y arcillas entre 158 y 265m. No presenta tramos de interés.

Villanueva de los Escuderos – 1 (nº 101)

Muy similar al nº 024, este sondeo muestra una serie casi continua de carbonatos del Cretácico Superior al Trías. Corta un tramo de Areniscas y margas del Albiense desde 1.087 a 1.217 m y desde 2.431 a 2.549 m. (posible repetición de la serie por cabalgamiento) Corta unos 100 m de areniscas entre 2.750 y 2.850 m aproximadamente. El sondeo acaba a 3.066 m de profundidad.

Belmontejo – 1 (nº 297)

Sondeo fallido y cortado a los 405 m.

Belmontejo – 1A (nº 298)

Serie similar a las anteriores. Sucesión de rocas carbonatadas, anhidritas y sal desde cero a 2.445 m del Oligoceno al Infralías. Desde 2.445 hasta 3.279 m, sal, arcillas y anhidritas del Keuper. Desde 3.400 hasta 3.529 m aparecen areniscas del Bunt, reposando sobre arcillas del Carbonífero hasta los 3.606 m, profundidad donde acaba el sondeo. De interés podrían ser unos tramos de dolomías entre evaporitas (a techo y muro) a 2.000 m. de profundidad.

El Hito - 1 (nº 304)

Este sondeo vuelve a cortar el Utrillas a dos profundidades, entre materiales carbonáticos (dolomías y calizas), a 318-376 m. y 783-873 m. y otra vez a 1.000-1.069 m; son arenas y gravas.

Corta también las areniscas del Bunt entre 2.300 y 2.379 m (arcillas, areniscas y conglomerados) sobre pizarras del Carbonífero y bajo arcillas y dolomías del Keuper – Muschelkaalk.

Torralba – 1 (nº 324)

Un terciario de anhidritas, calizas y dolomías hasta 1.416 m. Igual litología para Cretácico y Lías hasta 2.503 m, Keuper arcilloso hasta 3.327 m y Muschelkaalk y Bunt de calizas y areniscas hasta 3.490 m sobre gneises.

7.3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

La discontinuidad del Paleógeno – Neógeno, así como su estructuración concéntrica y sucesión de diversos ciclos parece descartarlo en todas sus series como posible almacén de CO₂.

Es probable que la identificación y caracterización detallada de algún tramo, formación ó unidad sería muy complicada dada la similitud de las facies en los diferentes ciclos. Las mejores posibilidades estarían, quizás, en la Unidad de Beleña de Sorbe – Torremocha de Jadraque constituida por 350 m de calizas y margas y 200 m de una serie detrítica con yesos, margas y calizas, situada entre formaciones lutíticas impermeables. En cualquier caso, la variedad de los materiales se presenta como gran inconveniente.

En la Cuenca de Madrid sí sería de gran interés la profundización en los estudios del tramo o serie Cretácica de dolomías, anhidritas y arenas ó areniscas del Utrillas, muy continuo y cortado por los sondeos nº 320, 164 y 447 a 800 m, 1.393 m y 3.246 m, es decir hundiéndose de SE a NE desde el borde occidental de la sierra de Altomira hasta el meridional del Sistema Central.

Este tramo, por su potencia, litología y disposición, especialmente entre el sondeo nº 320 (Tribaldos), hasta el noroeste del sondeo nº 164 (Tielmes – 1), presenta gran interés como posible almacén de CO₂. Asimismo se encuentra entre formaciones impermeables o, a lo sumo, permeables localmente por fracturación.

En el borde meridional del sistema Central el sondeo nº 447 (El Pradillo A) se presenta un tramo de arenas porosas del Paleógeno – Neógeno (Oligoceno sup. - Mioceno inf.) con 782 m de espesor, entre los 1.210 y 1.992 m que también podrían ser objeto de investigación detallada ya que sus características litológicas, profundidad, potencia y situación entre niveles impermeables son, a priori, positivas para configurarlo como almacén de CO₂.

7.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN LA CUENCA DEL TAJO

A continuación se describen para cada zona las unidades potencialmente favorables para el almacenamiento geológico de CO₂, así como las posibles unidades que actuarían como sello.

7.4.1 CUENCA DE MADRID (ZONA A-14)

Confinante 1: Terciario predominantemente lutítico.

- Espesor: Desde 800 m hasta más de 3.000 m.
- Profundidad base: Desde 800 m en las proximidades de la Sierra de Altomira hasta superar los 3.000 m cerca del Sistema Central.
- Continuidad: Toda la cuenca, con espesor creciente hacia el NO.

Almacén 1: Arenas porosas del Oligoceno sup. – Mioceno inf.

- Espesor: 0 a cerca de 800 m. El espesor máximo se encuentra en las proximidades del Sistema Central.
- Profundidad techo: En torno a 1.200 m en las proximidades del Sistema Central.
- Continuidad: Solamente se ha detectado en un sondeo situado en las inmediaciones del Sistema Central. (más al Este no se perfora en los sondeos, por lo que es posible que no se depositara).
- Observaciones: Constituyen el único posible almacén en la franja más próxima al Sistema Central.

Almacén 2: Cretácico Superior carbonatado con base arenosa (posible Utrillas).

- Espesor: 150 a 300 m de carbonatos + 70 m de areniscas basales.
- Profundidad techo: 800 a más de 3.000 m.
- Continuidad: Presente en toda la zona, si bien se encuentra a menos de 2.500 m solamente en sectores alejados del Sistema Central.
- Observaciones: Localmente los carbonatos incluyen una elevada proporción de evaporitas. Bajo este tramo se encuentra a veces un Triásico condensado, con unos 100 m de areniscas del Bunt según los sondeos (habría que investigar la posible presencia de áreas con Buntsandstein más potente a profundidad apropiada)

7.4.2 CUENCA DE LORANCA (ZONA A-15)

Confinante: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper.

- Espesor: 200-800 m.
- Profundidad base: De 0 a más de 3.000 m (hacia el centro de la cuenca).

-
- Continuidad: Toda la cuenca, si bien con espesor cambiante.

Almacén: Carbonatos del Muschelkalk y areniscas del Buntsandstein.

- Espesor: 150 – 200 m según los datos de sondeos.
- Profundidad techo: De 0 a más de 3.000 m (hacia el centro de la cuenca).
- Continuidad: Las areniscas del Bunt (unos 100 m) se encuentran presentes casi siempre, mientras que las dolomías del Muschelkalk desaparecen localmente.
- Observaciones: Solamente se encuentran en el rango apropiado de profundidades en unos pocos sectores, estando la mayor parte a profundidad excesiva.

8. CUENCA DEL EBRO

8.1. MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La Cuenca terciaria del Ebro es, geográficamente, una depresión de forma triangular, enmarcada por los Pirineos al Norte, la Cordillera Ibérica al Sur y la Cadena Costero-Catalana al Este. En su extremo occidental enlaza con la Cuenca del Duero por el corredor de La Bureba. Representa la última fase de evolución de la cuenca de antepaís surpirenaica, y sus límites y estructura actual se establecieron entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, cuando los cabalgamientos frontales surpirenaicos alcanzaron su emplazamiento definitivo. La geometría del relleno de la cuenca, exceptuado el sector occidental, presenta una forma de prisma abierto hacia el Norte, con la base del Terciario situada a más de 3.000 m bajo el nivel del mar en el margen pirenaico. Sobre esta superficie basal el Terciario presenta una tendencia al solapamiento expansivo hacia el Sur, con los materiales más antiguos recubriendo tal superficie en el margen pirenaico y los más modernos hacia el margen ibérico.

Hay que tener presente que una parte del relleno de la Cuenca del Ebro, en especial en su margen norte, está constituido por formaciones marinas y continentales que se reconocen igualmente en el orógeno pirenaico, donde actualmente forman parte de la cobertera despegada y cabalgante sobre la cuenca del Ebro. En las zonas donde no emergen los cabalgamientos frontales, el límite entre la actual Cuenca del Ebro y las cuencas terciarias pirenaicas de Jaca y Graus es difuso, con continuidad de los afloramientos oligocenos.

No obstante, la Cuenca del Ebro no es uniforme en sus rasgos, y puede dividirse en tres sectores sobre la base de la estructura, historia de la subsidencia y edad de los materiales aflorantes:

- un sector occidental de orientación E-O, que aparece como una cuenca de antepaís simétrica afectada por cabalgamientos activos hasta el Mioceno superior, tanto en el margen ibérico (Macizo de Cameros-Demanda) como en el margen pirenaico (Sierra de Cantabria), los cuales reducen en un 70% la amplitud inicial de la cuenca. El relleno terciario presenta además pliegues monoclinales vergentes al norte que son el reflejo de láminas de cabalgamiento que afectan a los materiales del basamento preterciario (figura 8.1, corte I), así como pliegues de despegue E-O a ONO-ESE con vergencia sur. La terminación oriental de estos pliegues al N del Ebro y el río Alhama al Sur marcan el límite de este sector, que fue intensamente subsidente tanto en el Paleógeno como en el Neógeno, con espesores totales que superan los 5.000 m.

- un sector central, más amplio y menos subsidente que el anterior, con estructura prácticamente tabular (figura 8.1, corte II). En este sector existe un desplazamiento progresivo de la sedimentación hacia el margen ibérico, el cual funciona finalmente como margen pasivo de la cuenca. El sustrato preterciario próximo a este margen está afectado por cabalgamientos de dirección NO-SE y vergencia N que condicionan la sedimentación paleógena y afectan, incluso, al relleno neógeno, provocando afloramientos locales del sustrato como paleorrelieves entre los materiales miocenos.

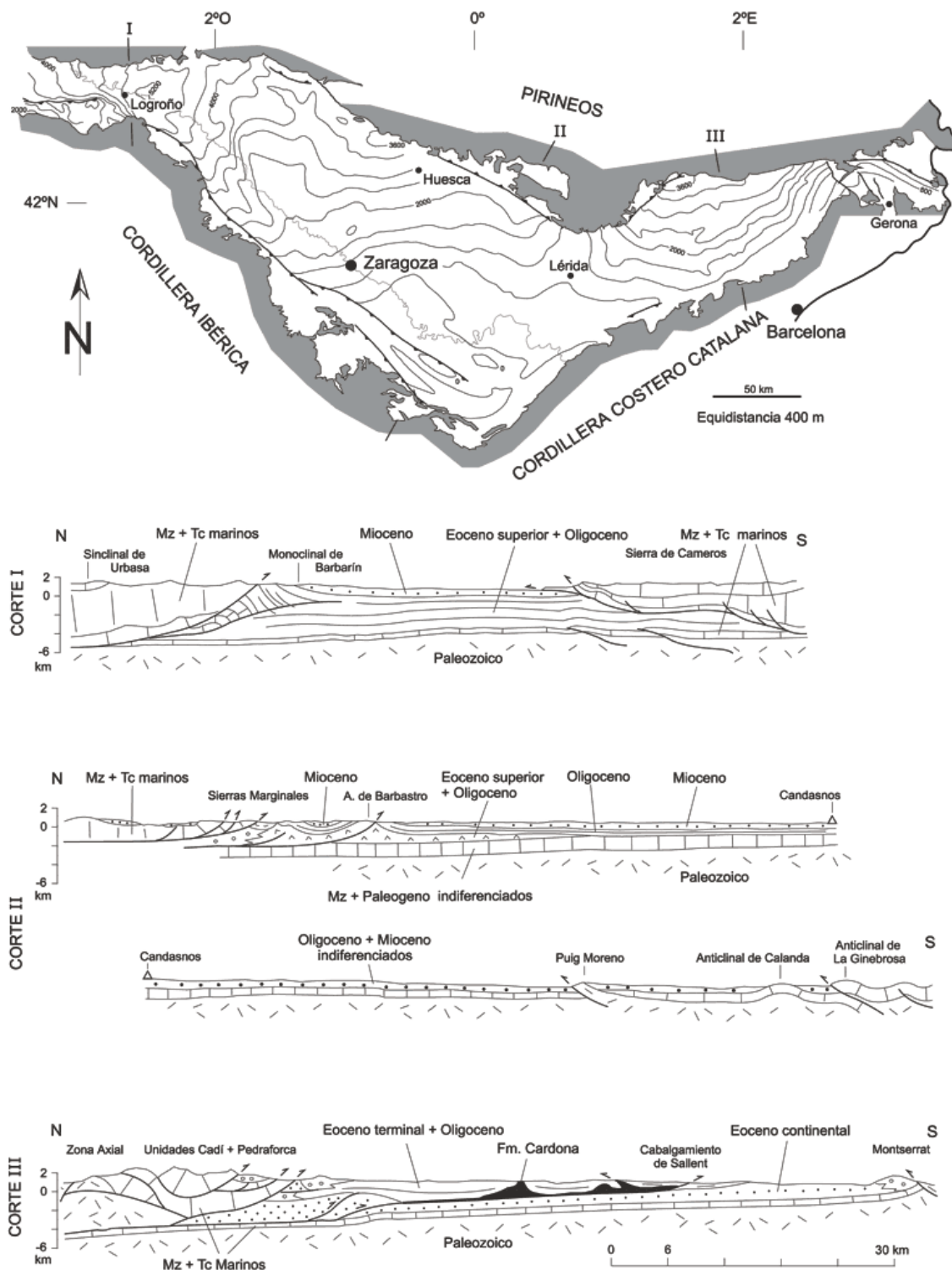


Figura 8.1 Mapa de isobatas y cortes sintéticos de los tres sectores de la Cuenca del Ebro. Mapa simplificado de ITGE (1990); Corte I simplificado de Muñoz-Jiménez y Casas-Sáinz (1997); Corte II simplificado a partir de Martínez-Peña y Pocovi (1988), Senz y Zamorano (1992) y González (1989); Corte III simplificado de Vergés *et al.* (1992). Mz: Mesozoico; Tc: Terciario (Pardo *et al.*, 2004)

- Un sector oriental, aproximadamente al E de los ríos Noguera Ribagorzana y Guadalupe, donde no existe registro de relleno neógeno, pero que fue netamente subsidente durante el Paleógeno y en el que se reconocen los materiales plegados con direcciones E-O a ESE-ONO y NE-SO en las proximidades del frente surpirenaico, donde el espesor de Terciario llega a superar los 3.600 m. Dichos pliegues están ligados al despegue de horizontes evaporíticos, asociados con la estructuración del frente surpirenaico.

8.2. SONDEOS PETROLÍFEROS

En la Cuenca del Ebro se han realizado gran cantidad de sondeos de exploración, a partir de los cuales se conoce la potencia del relleno y, en ocasiones, las características del sustrato preterciario (figura 8.2). También aportan datos sobre la litología del relleno terciario de la cuenca, pero resulta muy difícil reconocer la edad de los materiales o los límites de las UTS a partir de dichos datos. Como posible almacén de CO₂ interesan las formaciones que se encuentren a profundidad adecuada, entre 800 y 2.500 m bajo la superficie topográfica.

8.2.1 SECTOR OCCIDENTAL

El espesor del relleno terciario de la cuenca es superior a los 3.000 m, de manera que no interesa el sustrato preterciario. Son muy extensos los recubrimientos del relleno terciario por láminas cabalgantes con materiales mesozoicos y paleozoicos, especialmente en el borde meridional. Los principales sondeos que informan sobre la constitución litológica de la cuenca son:

Demanda-1 (nº 521)

Cobijados bajo 997 m de serie paleozoico-mesozoica invertida (Cámbrico, Triásico y Jurásico), el sondeo perfora unos 3.000 m de Terciario continental eminentemente detrítico, con potentes tramos conglomeráticos y arenosos e intercalaciones arcillosas y/o margosas minoritarias (salvo en los 1.000 m inferiores, donde son mayoritarias). Por debajo, en serie continua, el Cretácico reposa sobre pizarras paleozoicas a 4.430m.

Rioja-2 (nº 376)

3.062,5 m de terciario arcilloso con niveles menores de areniscas. El sustrato, cretácico, presenta a 3.425 m una repetición tectónica del conjunto Weald-Utrillas-calizas cenomanienses hasta el final de la perforación a 3.601,3 m.

Rioja-1 (nº 357)

3.378 m de arcillas terciarias con niveles menores de arenisca y anhidrita. El sustrato perforado es cretácico, con facies calcáreas a techo (3.378 – 3.450 m, Cenomanense-Turonense inferior) y detríticas el resto (200 m de areniscas y arcillas de las facies Utrillas sobre casi 800 m de areniscas cuarcíticas y arcillas de facies Weald).

Rioja-4 (nº 434)

3.830 m de arcillas terciarias con potentes intercalaciones de areniscas sobre 35 m de arenas de facies Utrillas que reposan sobre un conjunto del Cretácico Inferior consistente en 118 m de arcillas con areniscas cuarcíticas y conglomerados a techo.

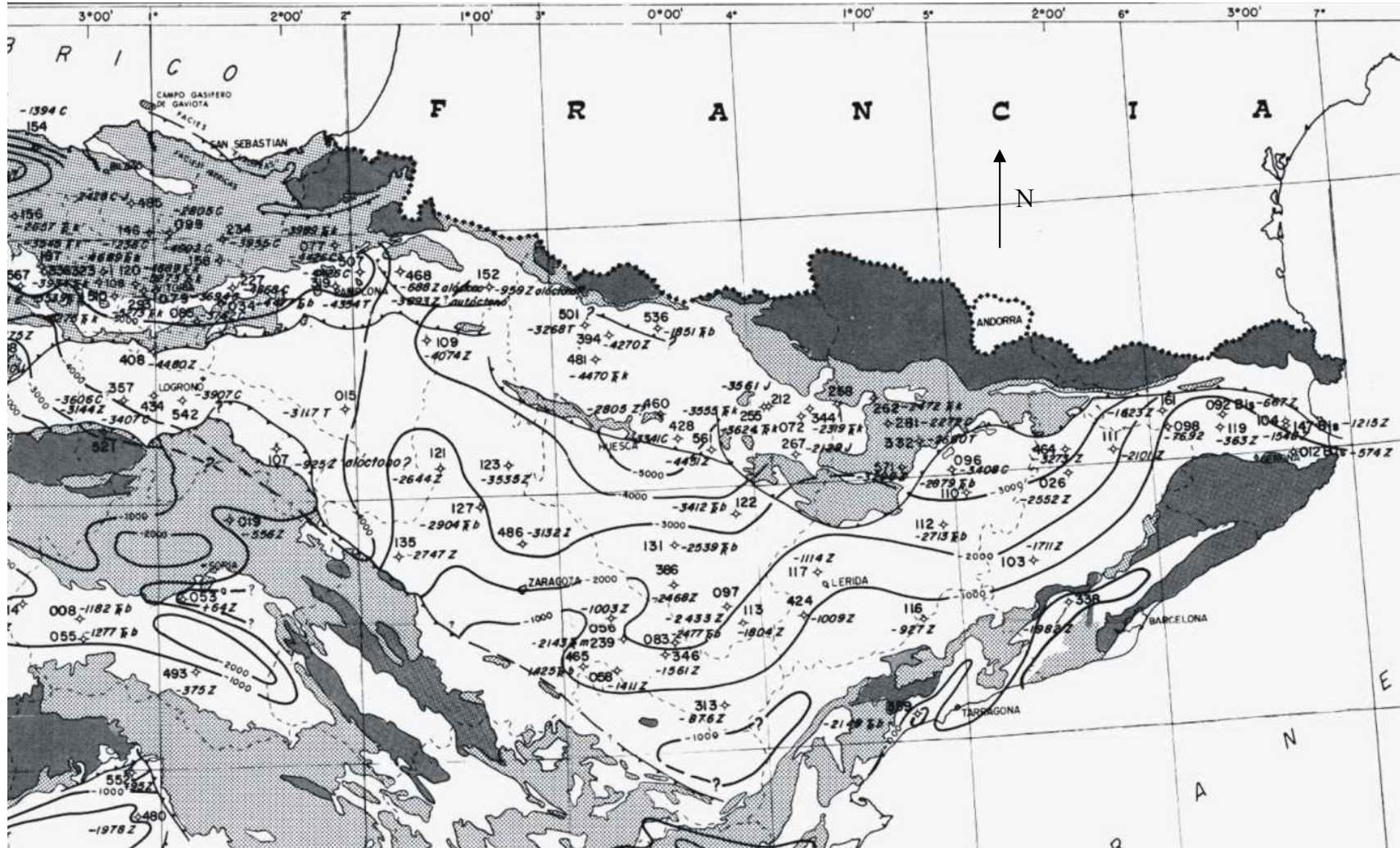


Figura 8.2 Mapa de isobatas del techo del Paleozoico (datum nivel del mar) con situación de los sondeos petrolíferos en la Cuenca del Ebro (Extractado de I.G.M.E., 1987).

Rioja-5 (nº 542)

4.437,2 m. No hay columna litológica.

Rioja-3 (nº 408)

Antes de alcanzar las pizarras paleozoicas del sustrato corta 5.120 m de arcillas y margas terciarias con intercalaciones arenosas, ocasionalmente carbonatadas.

Arnedo-1 (nº 107)

Corta 834 m de Terciario arcilloso, salvo los 80 m superiores (areniscas y conglomerados) y los 260 m basales (areniscas conglomeráticas y arcillas).

Debajo de los materiales terciarios aparecen calizas y dolomías jurásicas (entre 834 y 1.045 m), bajo las cuales el sondeo ha cortado a diferentes profundidades:

1.045 - 1.113 m arcillas y yesos del Keuper.

1.113 – 1.178 m dolomías del Muschelkalk.

1.178 – 1.508 m areniscas, conglomerados y arcillas del Buntsandstein (areniscas y conglomerados por debajo de 1.326 m).

1.508 – 1.576 m de cuarcitas y arcillas paleozoicas. Más abajo este conjunto debe de cabalgar sobre materiales terciarios de relleno de la cuenca.

Marcilla-1 (nº 15)

Bajo unos 100 m de recubrimiento cuaternario el sondeo perfora un potente conjunto terciario de anhidrita y yeso con pasadas de halita y arcilla (hasta 2.959 m), bajo el cual yacen arcillas rojas y limolitas terciarias hasta el final del sondeo, a 3.415 m.

8.2.2 SECTOR CENTRAL

La parte NO de este sector tiene un relleno terciario muy potente, de manera que solamente puede plantearse un posible almacén en los materiales de dicho relleno, generalmente arcilloso y con pasadas arenosas, carbonatadas y evaporíticas. Esta situación se refleja en los siguientes sondeos:

Sangüesa-1 (nº 109)

3.106 m de margas con pasadas arenosas, calcáreas y de anhidrita (en los 526 m inferiores dominan las margas dolomíticas). Debajo yace un tramo de unos 180 m con areniscas a techo y anhidrita con margas en la base, que reposa sobre un conjunto de unos 300 m de arcillas y calizas margosas eocenas. Debajo, a partir de 3.580 m una potente serie detrítica que comprende el Buntsandstein y el Pérmico da paso a arcillas carboníferas y calizas devónicas (el techo de éstas situado a 4.662 m).

Valpalmas-1 nº 123)

Los 3.345 m de relleno terciario son eminentemente arcillosos o margosos, con pasadas arenosas, evaporíticas y carbonatadas de poca entidad. La base es conglomerática de reducido espesor y los 200 m inferiores incluyen tramos carbonatados de cierta entidad. El sustrato es Triásico, con 50 m de Keuper, 320 m de Muschelkalk y 280 m de areniscas del Buntsandstein, que reposa en discordancia a 4.006 m sobre lutitas y areniscas carboníferas.

Ejea-1 (nº 121)

Sobre las arcillas y limolitas carboníferas se dispone en discordancia (2.977 m) el Buntsandstein, constituido por 180 m de conglomerados, areniscas y limolitas, y encima, el Muschelkalk (80 m de dolomías, limolitas y arcillas). Encima, a 2.718 m, comienza el relleno terciario de la cuenca, constituido fundamentalmente por arcillas alternantes con areniscas y limolitas y con intercalaciones de carbonatos y evaporitas.

Destaca la presencia de un tramo evaporítico entre 2.070 y 2.300 m, pero por debajo no parece haber un tramo poroso de importancia hasta la base del Terciario.

Tauste Este-1 (nº 127)

Relleno terciario hasta 2.752 m, constituido por arcillas y margas con intercalaciones de areniscas, calizas, dolomías y evaporitas. Destaca un tramo de unos 300 m de evaporitas cuyo techo se encuentra aproximadamente a 1.950 m. El sustrato está constituido por unos 150 m de rocas carbonatadas y evaporitas del Jurásico e Infralías que reposan sobre evaporitas, arcillas y ofitas del Keuper. Entre 3.119 y 3.291 m se encuentran las dolomías del Muschelkalk que reposan sobre arcillas y areniscas del Buntsandstein.

Magallón-1 (nº 135)

El sustrato del relleno terciario se encuentra a 2.480 m, y consta de un delgado resto del Cretácico Inferior, bajo el cual yace un conjunto triásico-liásico de 700 m, discordante sobre arcillas carboníferas. El Triásico contiene, aparte de una escasa representación arcillosa del Buntsandstein, dos barras dolomíticas del Muschelkalk intercaladas entre arcillas y yesos, la inferior con su techo a 3.100 m y la superior a 3.019 m. El conjunto cretácico-liásico es eminentemente carbonatado y su techo se encuentra próximo a los 2.500 m. El Terciario en este sondeo tiene un tramo superior de unos 1.000 m de evaporitas alternantes con dolomías, calizas arenosas y conglomerados, mientras el resto es eminentemente arcilloso.

En este sector central de la cuenca puede diferenciarse un segundo dominio en el que es posible encontrar posibles almacenes a una profundidad adecuada tanto en el relleno terciario como en el sustrato de la cuenca. Los sondeos que siguen se encuentran en dicho dominio, que se extiende en una ancha franja E-O entre Zuera-Zaragoza y Monzón-Lérida:

Zuera-1 (nº 486)

1.788 m de Terciario (arcillas, evaporitas y margas) sobre unos 75 m de calizas micríticas del Jurásico Superior que reposan sobre un conjunto liásico de 700 m de calizas, dolomías, anhidritas (en la parte inferior) y margas en la parte superior (dominantes por encima de 2.100 m). Entre 2.567 y 3.000 m hay evaporitas y arcillas del Keuper, y por debajo dolomías y evaporitas del Muschelkalk (hasta 3.332 m). Unos 150 m de areniscas y arcillas del Buntsandstein reposan sobre las pizarras paleozoicas a 3.487 m.

Zaragoza-1 (nº 84)

El relleno terciario está formado por 1.677 m de evaporitas alternantes con arcillas calcáreas y con algún tramo carbonático más compacto. Debajo, un tramo de calizas y margas del Jurásico (hasta 2.090 m) que da paso a las dolomías y anhidritas del Infralías (hasta el final del sondeo, a 2.252 m).

Monzón-1 (nº 122)

1.402 m de arcillas y areniscas continentales terciarias yacen sobre un conjunto de arcillas y evaporitas que alcanza 2.268 m y que reposa sobre margas. Entre 2.429 m y 2.655 m se presenta un tramo carbonatado eminentemente liásico, con techo eoceno. Por debajo, arcillas y sal del Keuper. El sondeo finaliza a 3.714 m tras atravesar el Muschelkalk y la práctica totalidad del Buntsandstein.

Esplús-1 (nº 143)

El Terciario continental tiene 1.739 m de espesor, constituido fundamentalmente por arcillas y areniscas (los 1.000 m superiores, aproximadamente), un tramo calcáreo entre 1.131 y 1.225 m, arcillas y evaporitas hasta 1.515 m y margas en el tramo inferior, con base brechificada. Debajo, un tramo carbonatado complejo de 346 m que comprende parte del Jurásico y el Infralías descansa sobre las margas y anhidritas del Keuper, donde finaliza el sondeo. Más abajo, aún a profundidad adecuada, debe encontrarse el Muschelkalk.

Sariñena-1 (nº 131)

El relleno terciario continental de la cuenca consta de 1.056 m de arcillas arenosas, un conjunto de calizas que hacia techo pasa a margocalizas y llega a 1.450 m y un tramo de margas, anhidrita y sal hasta 1.756 m. Por debajo hay unos 40 m de calizas arcillosas marinas eocenas que yacen sobre un delgado tramo de dolomías liásicas. Un potente tramo de anhidrita con pasadas dolomíticas de edad retiene alcanza los 2.000 m, sobre un banco dolomítico de unos 50 m. El Keuper, con anhidrita, arcilla, sal y pasadas de dolomía, llega hasta 2.331 m. Por debajo, el Muschelkalk consta de dos barras dolomíticas (entre 2.331 y 2.454 m, y entre 2.689 y 2.760 m), con un potente tramo de sal y anhidrita intermedio. Por debajo, las facies Bunt están constituidas por sal, arcilla y anhidrita sobre areniscas en las que el sondeo finaliza a 2.893,2 m.

Ebro-2 (nº 386)

1.093 m de alternancia de calizas arenosas, margas limosas y arcillas constituyen el relleno terciario de la cuenca. Debajo, calizas y dolomías del Lías hasta 1.355 m, y un tramo retiene eminentemente anhidrítico, con dolomías en la base, hasta 1.603 m. Hasta 2.094 m hay arcillas y sal del Keuper, y por debajo, el Muschelkalk, constituido por tres barras dolomíticas con anhidrita y sal entre ellas. La más alta hasta 2.214 m, otra entre 2.269 y 2.390 m y la inferior entre 2.626 y 2.707 m. El Bunt está constituido por una sucesión de conglomerados, areniscas, arcillas y evaporitas. La base conglomerática del Bunt descansa a 2.940 m sobre arcillas y pizarras paleozoicas.

Candasnos-1 (nº 124)

944 m de calizas con intercalaciones arcillosas constituyen el relleno terciario continental de la cuenca. Hasta los 1.000 m de profundidad alcanzan las margas y calizas del Daniense que reposan directamente sobre margocalizas y margas del Cretácico Inferior. Entre 1.065 y 1.303 m hay un conjunto carbonatado, dolomítico hacia la base, que comprende Lías y Dogger y que reposa sobre un Infralías eminentemente anhidrítico con dolomías en la base (entre 1.500 y 1.546 m). El sondeo termina a 1.550,4 m, en arcillas y anhidritas del Keuper. Algo más abajo debe encontrarse el Muschelkalk.

Fraga-1 (nº 113)

También el Terciario continental es mayoritariamente carbonatado, pero en este caso en los 1.065 m de este tramo se diferencian al menos tres niveles margosos importantes, uno de ellos en la base, de casi 100 m. Debajo, un conjunto de calizas y dolomías hasta 1.211 m que comprende el Infralías y un retazo de Paleoceno. Las arcillas y anhidritas del Keuper alcanzan los 1.405 m, y reposan sobre el Muschelkalk que consta de dos potentes barras dolomíticas con un tramo de arcillas y anhidritas intermedio. Entre 1.701 y 2.011 m se desarrolla el Buntsandstein, eminentemente arenoso y conglomerático, con anhidrita a techo. Por debajo, el Paleozoico hasta 2.143 m, final del sondeo.

Ballobar-1 (nº 97)

1.094 m de Terciario continental constituido por alternancia de arcillas y carbonatos en paquetes de 200 a 250 m. Los 200 m basales son margas. Entre 1.094 y casi 1.500 m hay calizas y dolomías del Cretácico Inferior y Jurásico, sobre un potente tramo anhidrítico que a 1.700 m aproximadamente reposa sobre unos 60 m de dolomías probablemente retienses. El Keuper arcilloso y evaporítico (con gran proporción de sal) se encuentra entre 1.765 y 1.977 m, sobre un Muschelkalk formado por dos barras dolomíticas separadas por un tramo de sal y anhidrita de más de 200 m. Entre 2.410 y 2.706 m se encuentran los conglomerados y areniscas del Buntsandstein, culminado por arcillas y sal. El sondeo termina perforando unos 300 m de arcillas y calizas devónicas.

Por último, puede diferenciarse un tercer dominio, en el que el espesor de Terciario es inferior o próximo a 800 m, donde los posibles almacenes se encuentran en el sustrato de la cuenca, fundamentalmente el Muschelkalk y el Buntsandstein, sellados por los tramos evaporíticos triásicos y retienses. Los siguientes sondeos se encuentran en este dominio, que ocupa la franja meridional, adyacente al margen ibérico:

Monegrillo-1 (nº 56)

820 m de margas yesíferas con episodios calizos constituyen el relleno terciario de la cuenca, sobre anhidrita masiva con intercalaciones dolomíticas del Lías que yacen, a 978 m, sobre arcillas, sal y anhidrita del Keuper. A 1.064 m son ya dolomías del Muschelkalk, que se continúan hasta 1.288 m con una intercalación de sal y anhidrita entre 1.175 y 1.208 m. Un conjunto de conglomerados, areniscas y arcillas del Bunt forman la base del Mesozoico sobre los esquistos paleozoicos a 1.381 m.

Gelsa-1 (nº 259)

En este sondeo se ha interpretado que son terciarios los 485 m superiores, correspondientes mayoritariamente a calizas, principalmente en su parte inferior, donde son claramente marinas. Incorporan también intercalaciones de yesos, y hacia la parte superior pasan a calizas margosas y margas. Estas calizas marinas basales terciarias yacen sobre calizas marinas del Jurásico Superior, que comprenden también el Jurásico medio. El Lías, a partir de 1.336 m, está representado mayoritariamente por dolomías y margas, y bajo él, un potente tramo de evaporitas con delgadas intercalaciones dolomíticas representa el Infralías, entre 1.504 y 2.020 m, bajo el cual aparecen arcillas y margas del Keuper. Entre 2.182 y 2.302 m se encuentran las dolomías superiores del Muschelkalk, sobre evaporitas y margas también triásicas, en las que finaliza el sondeo.

Ebro-1 (nº 346)

El Terciario está formado por una alternancia de 705 m de arcillas, calizas y yeso, que reposa sobre un conjunto retiense de dolomías, anhidrita y arcilla, hasta 1.256 m, donde son ya arcillas y anhidritas del Keuper. Entre 1.376 y 1.674 m se encuentran las dolomías del Muschelkalk, alternantes con arcillas y con una intercalación evaporítica destacada en su parte media. Los conglomerados, areniscas y arcillas del Bunt yacen a 1.893 m sobre materiales paleozoicos (arcillas, limolitas y areniscas).

Bujaraloz-1 (nº 83)

738 m de arcillas, evaporitas y calizas terciarias descansan sobre calizas y arcillas del Cretácico Inferior. Siguen margocalizas, margas y calizas del Jurásico, cuya base dolomítica reposa a 1.450 m sobre un potente tramo retiense de anhidrita con pasadas dolomíticas que se prolonga hasta 1.985 m. Debajo, las arcillas y evaporitas del Keuper dan paso a la barra dolomítica superior del Muschelkalk, entre 2.197 y 2.323 m. La barra inferior dolomítica se encuentra entre 2.638 y 2.734 m, tras un potente

tramo intermedio de arcilla y sal. El sondeo termina a 2.825 m, en los materiales conglomeráticos, arenosos y arcillosos del Buntsandstein.

La Zaida-1 (nº 58)

258 m de Terciario arcilloso-evaporítico que culmina en calizas reposan sobre 310 m de carbonatos jurásicos que intercalan niveles margosos más frecuentes a techo. Entre 568 y 952 m el Lías está constituido por anhidrita con pasadas dolomíticas y reposa sobre unos 120 m de dolomías retienses. Entre 1.070 y 1.203 m hay arcillas y evaporitas del Keuper y hasta 1.432 m se encuentran dos barras dolomíticas del Muschelkalk con un tramo de sal y arcilla intermedio. Por debajo, hasta 1.577 m están las areniscas y arcillas del Buntsandstein que reposan en discordancia sobre esquistos paleozoicos.

Lopin-1 (nº 465)

230 m de Terciario arcilloso-yesífero sobre una sucesión de calizas y margas jurásicas de 440 m que pasan a dolomías y anhidritas del Infralías. Entre 905 y 1.350 m, las arcillas y evaporitas del Keuper, que yacen sobre dolomías, evaporitas y arcillas del Muschelkalk. Los últimos metros del sondeo perforan areniscas del Buntsandstein (entre 1.620 y 1.652,2 m).

8.2.3 SECTOR ORIENTAL

Su parte meridional, en continuidad con la última zona descrita, presenta un único sondeo en el que el recubrimiento terciario es muy escaso y deja pocas posibilidades de utilización incluso a las formaciones triásicas. Esta parte del sector oriental comprende los terrenos situados aproximadamente al Sur del paralelo de Mayals. Sin embargo, al no disponerse más que de un sondeo en esta zona de cierta extensión queda abierta la posibilidad de que haya puntos más favorables, con recubrimiento algo mayor.

Caspe-1 (nº 313)

Solamente perfora 277 m de Terciario, constituido por calizas, arcillas y evaporitas, que yacen sobre el Triásico, a techo en facies Muschelkalk y en su parte inferior en facies Buntsandstein. El contacto de la base del Bunt con el Paleozoico se realiza a 1.160 m. Las formaciones triásicas de interés no presentan un confinamiento a la profundidad adecuada.

El resto del sector oriental de la cuenca del Ebro se caracteriza por la presencia de materiales marinos dominantes en el relleno terciario, al menos en su parte inferior. Puede diferenciarse una parte, aproximadamente al Sur del paralelo de Guissona, en la que es posible encontrar formaciones de interés a profundidad adecuada tanto en el sustrato de la cuenca como en el relleno terciario. Son pocos los sondeos que perforan esta zona:

Mayals-1 (nº 424)

976 m de relleno terciario eminentemente arcilloso con pasadas arenosas, carbonatadas y evaporíticas descansan sobre areniscas del Buntsandstein con intercalaciones arcillosas. A 1.365 m las areniscas dan paso al Paleozoico.

Lérida-1 (nº 117)

1177 m de relleno terciario sobre una barra dolomítica del Muschelkalk que, a 1.243m da paso a un Buntsandstein muy adelgazado (hasta 1.321 m) con arcillas en su mitad

superior. El relleno terciario es eminentemente margoso y arcilloso, con un tramo potente destacable (entre 676 y 938 m) constituido por calizas con intercalaciones de margas y anhidritas. El sondeo termina en Paleozoico bajo el Bunt.

Senant-1 (nº 116)

1.423 m de relleno terciario (paleógeno) sobre arcillas y areniscas del Keuper que dan paso a 1.456 m a dolomías del Muschelkalk, que alcanzan los 1.630 m con un tramo limoso intermedio de 60 m. La parte inferior del Trías es arcillosa y muy adelgazada, de manera que el sondeo perfora el Paleozoico a 1.649 m. El Terciario es predominantemente arenoso en la parte superior, pero por debajo de 650 m está constituido eminentemente por arcillas, entre las que destaca un tramo eoceno de unos 100 m de calizas superpuesto a otros 120 m de areniscas entre 940 y 1.159 m.

Castellfullit-1 (nº 103)

1.935 m de arcillas paleógenas con intercalaciones menores de limos, areniscas, calizas y anhidrita (destacan unos 70 m de anhidrita en torno a los 600 m de profundidad). Debajo, arcillas del Keuper, y entre 1.975 y 2.195 m, dolomías del Muschelkalk en dos barras principales con un tramo intermedio arcilloso-evaporítico de 70 m. El Buntsandstein es arcillo-arenoso y alcanza casi los 2.450 m.

En la parte septentrional de este sector de la cuenca (al Norte del paralelo de Guissona) sólo presentan interés las formaciones del relleno terciario, bien por su gran espesor (mayor de 2.500 m), o bien porque aun siendo menor el espesor del Terciario, éste se dispone directamente sobre el zócalo paleozoico (es el caso del corredor del Ampurdán, que une el Golfo de Rosas con la Cuenca terciaria del Ebro). Los sondeos en esta zona son muy numerosos:

Guisona-1 (nº 112)

Entre 815 y 1.640 m se encuentra un tramo de anhidrita y sal con intercalaciones arcillosas que puede constituir un magnífico confinamiento de un posible almacén, el cual podría ubicarse en el potente tramo carbonatado eoceno perforado entre 1.760 y 2.408 m. Las dolomías del Muschelkalk se encuentran ya a una profundidad excesiva (2.693 m).

Basella-1 (nº 96)

Potente relleno continental. 2.550 m de arcillas con intercalaciones de arcillas y conglomerados sobre un conjunto de sal con limolitas y arcilla que alcanza los 2.680 m. Debajo, limolitas y margas que pasan a materiales arenosos a 3.330 m y a calizas a 3.408 m. Estas calizas se disponen sobre las arcillas del Garum a 3.660 m.

Oliana-1 (nº 5)

2.332 m de margas marinas lutecienses.

110 Sanahuja-1 (nº 110)

1.480 m de alternancia de areniscas, arcillas y conglomerados sobre un potente tramo de anhidrita, sal y arcilla que pasa a 2.375 m a margas masivas. Tramo de calizas y dolomías lutecienses con intercalaciones margosas y evaporíticas entre 2.980 y 3.325 m. Hasta 3.365 m se encuentran dolomías y arcillas del Garum, que reposan sobre dolomías del Muschelkalk.

Pinos-1 (nº 118)

743 m de arcillas y areniscas continentales con pasadas de yeso. Potente tramo de sal, arcilla y anhidrita entre este punto y 1.697 m. Debajo, margas bartonienses hasta

1.928,5 m. Posiblemente más abajo se encuentren las calizas lutecienses.

Puireig-1 (nº 26)

575 m de margas y arenas continentales sobre unos 150 m de calizas y 300 m de arenas. Siguen margas hasta 2.195 m, donde unos 100 m de areniscas calcáreas arcillosas dan paso a margas lutecienses. Entre 2.400 y 2.500 m, hay un tramo carbonatado, debajo, casi 100 m de anhidrita y debajo más de 300 m de calizas luteciense-cuisienses con intercalaciones arcillosas, hasta 2.959 m.

Jabalí-1 (nº 464)

Unos 3.000 m de areniscas con intercalaciones arcillosas y pasadas conglomeráticas en su parte inferior. Debajo, conjunto carbonatado hasta 3.828 m con intercalaciones de margas y anhidrita, más abundantes en la mitad superior. Debajo, basamento metamórfico.

Perafita-1 bis (nº 111)

Alternancia de margas y areniscas hasta 1.786 m, con 200 m de areniscas en su base. Debajo, el Luteciense está formado por una alternancia de margas, calizas y areniscas, con unos 300 m de calizas en la base, hasta 2.668 m, donde arcillas y dolomías dan paso al zócalo granítico a 2.859 m.

Riudaura-2 (nº 173)

Potente tramo carbonatado luteciense entre 1.407 m y el final del sondeo, a 2.046,1 m. Por encima hay arcillas y margas alternantes con areniscas y conglomerados.

Riudaura-1 (nº 161)

Tramo de anhidrita entre 1.320 y 1910 m aproximadamente. Por encima, alternancia de arcillas, margas y areniscas. Debajo, calizas y dolomías ilerdiense-cuisienses hasta 2.293 m, donde unos pocos metros de arcillas paleocenas dan paso al granito del basamento.

Sant Privat-1 (nº 276)

Arcillas, areniscas y calizas hasta 1.030 m, donde comienza un tramo de anhidritas y yesos con intercalaciones margosas hasta 1.315 m. Debajo el sondeo ha cortado carbonatos y margas del Ilerdiense al Luteciense en alternancia hasta 1.556 m, final de la perforación.

Juanetas-1 (nº 98)

778 m de arcillas con intercalaciones limolíticas y calcáreas sobre tramo de anhidritas con intercalaciones carbonatadas hasta 1.098 m. Calizas y dolomías con intercalaciones lutíticas y arenosas hasta el zócalo granítico, a 1.405 m.

Gerona-2 (nº 147 bis)

Zócalo paleozoico a 1.278 m. Tramo de yesos entre 822 y 974 m. Bajo él, calizas algo dolomíticas lutecienses hasta 1.027 m, que pasan a un tramo muy variado (arcillas, calizas, conglomerados, arenas) que representa el Paleoceno y que reposa sobre el Paleozoico. Por encima de las evaporitas hay arcillas y areniscas.

Gerona-1 (nº 104)

Tramo anhidrítico entre 1.206 y 1.392 m sobre calizas hasta 1.471,5 m. Encima, arcillas y areniscas. Debajo, tramo heterolítico (arcillas, areniscas, calizas y conglomerados) hasta el zócalo paleozoico, a 1.666 m.

En el estrecho corredor del extremo NE de la cuenca hay también una parte en la que el espesor del Terciario sobre el Paleozoico es escaso.

Sant Miquel de Camp Mayor-1 (nº 119)

Zócalo paleozoico a 623 m.

Ampurdán-2 (nº 92bis)

Zócalo paleozoico a 937 m.

La Bisbal-1 (nº 12bis)

Zócalo paleozoico a unos 600 m.

Rosas 1-1 (nº 498)

Sondeo en el mar. Perforado hasta 1.150 m. Sin registro. Agua hasta 227 m.

8.3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

8.3.1 SECTOR OCCIDENTAL

En el sector occidental solamente pueden tenerse en cuenta posibles almacenes en el seno del relleno terciario, dada la gran potencia del mismo (figura 8.3). La información de subsuelo indica la presencia de tramos arenosos y conglomeráticos a profundidad adecuada, especialmente en la franja meridional, pero se hace necesario definir con la máxima precisión la geometría y posición de tales niveles, así como la calidad del confinamiento.

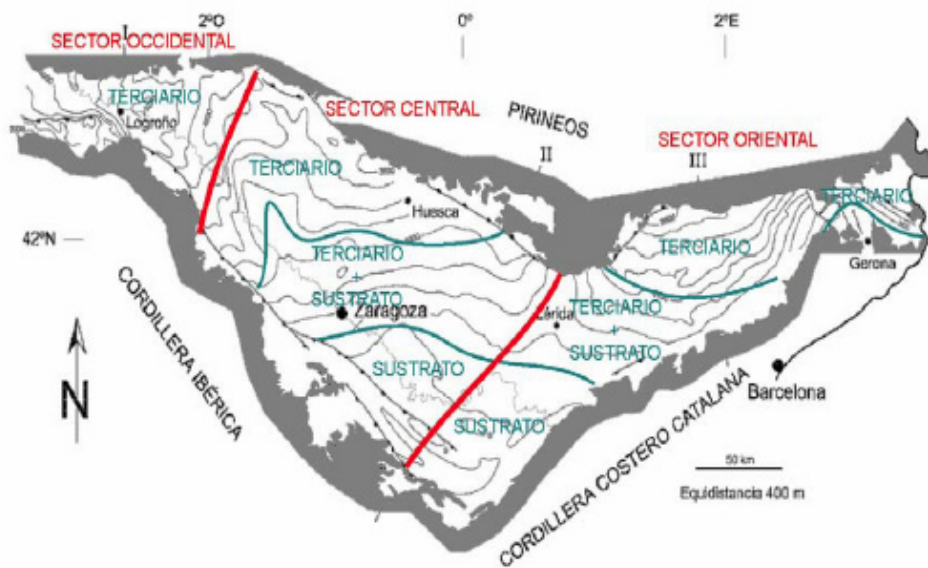


Figura 8.3 División de la Cuenca del Ebro en sectores. Situación aproximada de las divisiones de cada sector en función del espesor del relleno terciario y, por tanto, de la profundidad de las posibles formaciones almacén tanto en el relleno terciario como en el sustrato.

Por otra parte, la lámina cabalgante de la Sierra de La Demanda ha sido perforada por el sondeo 521, poniendo de manifiesto la abundancia de conglomerados y arenas en el Terciario situado bajo ella, a profundidad adecuada.

Los materiales preterciarios solamente tienen interés como posible almacén en el sector de Arnedo, donde una lámina cabalgante presenta el Trías en facies germánica a una profundidad adecuada, con las facies Keuper como litología confinante y las facies Muschelkalk y Buntsandstein como posibles litologías almacén. Sin embargo, en el sondeo, el Keuper tiene un espesor relativamente reducido (unos 70 m).

8.3.2 SECTOR CENTRAL

En el sector central pueden diferenciarse tres dominios diferentes en cuanto a las posibilidades de almacenamiento de CO₂:

- Una parte de relleno terciario muy potente en la que solamente puede plantearse un posible almacén en los materiales de dicho relleno, generalmente arcilloso y con pasadas arenosas, carbonatadas y evaporíticas. Es la parte occidental y NO, adyacente al sector anterior. La información de sondeos indica un relleno muy heterogéneo, en el que es difícil precisar la geometría, volumen y disposición de posibles tramos litológicos que puedan servir de almacén o confinamiento.

- Una parte de espesor intermedio en la que es posible encontrar tramos potencialmente interesantes a una profundidad adecuada tanto en el relleno terciario como en el sustrato de la cuenca. Se extiende esta zona en una ancha franja E-O entre Zuera-Zaragoza y Monzón-Lérida. La posibilidad de utilización de formaciones del relleno terciario presenta las limitaciones ya comentadas derivadas de su heterogeneidad. En cuanto a los materiales del sustrato, presentan interés las facies carbonatadas del Jurásico y Retiense que con frecuencia se encuentran en este sector formando la superficie del sustrato. Para este posible almacén habría que valorar la capacidad confinante de los materiales terciarios suprayacentes, seguramente suficiente en los alrededores de Zaragoza (potentes tramos evaporíticos), pero muy baja en el sector de Fraga-Candasnos-Ballobar, donde el Terciario es carbonatado en la mayor parte de su espesor, con más que probables interconexiones laterales entre los diferentes tramos carbonatados que se encuentran separados por arcillas y margas en algunos sondeos. Otros tramos de interés, más profundos pero con mejor calidad de confinamiento a priori se encuentran en el Triásico: las dos barras dolomíticas del Muschelkalk, y las areniscas y conglomerados de la parte inferior del Buntsandstein, todos ellos sellados por formaciones arcilloso-evaporíticas de extensión regional.

- Hay una última parte en la que el espesor de Terciario es inferior o próximo a 800 m. En ella solamente cabe considerar posibles almacenes del sustrato de la cuenca, confiando su confinamiento únicamente a formaciones pertenecientes también al sustrato. Las formaciones triásicas son las consideradas fundamentalmente, con la ventaja de encontrarse a menor profundidad que más al Norte: las dos barras dolomíticas del Muschelkalk (la superior sellada por el Keuper y la inferior sellada por el tramo intermedio evaporítico del Muschelkalk) y las areniscas y conglomerados de la parte inferior del Buntsandstein (selladas por las facies Röt, de arcillas y evaporitas). En esta zona y en la anterior se cuenta, además, con la presencia de un tramo evaporítico adicional en el Retiense muy desarrollado. Esta parte de la cuenca ocupa la franja meridional, adyacente al margen ibérico, pero en las zonas más próximas a

dicho margen posiblemente los tramos favorables se encuentren demasiado próximos a la superficie.

8.3.3 SECTOR ORIENTAL

En el sector oriental, mayoritariamente formado por relleno paleógeno marino, también pueden diferenciarse varios dominios:

- La parte meridional, en continuidad con la homóloga del sector central, presenta un recubrimiento terciario muy escaso. En el único sondeo que perfora la zona es tan reducido que deja pocas posibilidades de utilización incluso a las formaciones triásicas del sustrato, aunque posiblemente haya zonas con mayor espesor de Terciario. Esta parte del sector oriental comprende los terrenos situados aproximadamente al Sur del paralelo de Mayals.

- La parte comprendida aproximadamente entre la anterior y el paralelo de Guissona, en la que es posible encontrar formaciones de interés a profundidad adecuada tanto en el sustrato de la cuenca como en el relleno terciario. En los pocos sondeos de la zona apenas se han encontrado formaciones terciarias de interés, debido a su heterogeneidad litológica. Únicamente en el sondeo 116 hay un posible tramo de interés formado por calizas y areniscas eocenas intercalado entre lutitas. Las formaciones de interés en el sustrato son el Muschelkalk y el Buntsandstein, que no presentan la misma continuidad que en el sector central, bien por erosión o por cambio lateral de facies.

- La parte septentrional (al Norte del paralelo de Guissona) solamente presenta formaciones de interés en el relleno terciario, bien por su gran espesor (mayor de 2.500 m) o bien porque el sustrato es directamente el zócalo paleozoico. El espesor de Terciario aumenta rápidamente al alejarse del borde catalánide. Destaca especialmente la presencia generalizada de un potente tramo evaporítico eoceno que puede constituir el confinamiento de un posible almacén en formaciones situadas por debajo, mayoritariamente potentes tramos carbonatados lutecienses, cuienses e ilardienses situados directamente bajo las evaporitas o con un tramo margoso intermedio. Dicho tramo confinante, ausente en algunos lugares, desciende rápidamente conforme aumenta la distancia al borde catalánide, llegando a disponerse por debajo de 2.500 m en el extremo NO.

- El corredor del Ampurdán, que une el Golfo de Rosas con la Cuenca terciaria del Ebro también presenta el tramo evaporítico mencionado, más profundo hacia el Norte, al tiempo que aumenta el espesor del Terciario. Las posibles formaciones de interés situadas por debajo son de espesor mucho más reducido que en la zona anterior, inmediatamente al Oeste. En el sector meridional de este corredor el espesor de Terciario es muy reducido, y su sustrato es el zócalo paleozoico. No hay datos sobre las posibilidades en el Golfo de Rosas.

Las formaciones paleozoicas no han sido tenidas en cuenta como posible almacén, ya que se tienen muy pocos datos sobre su distribución y características bajo la cuenca (solamente los datos puntuales de algunos sondeos, que finalizan en estos materiales).

8.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN LA CUENCA DEL EBRO

A continuación se describen para cada zona las unidades potencialmente favorables para el almacenamiento geológico de CO₂, así como las posibles unidades que actuarían como sello.

8.4.1 CUENCA DEL EBRO: SECTOR OCCIDENTAL-SEPTENTRIONAL (ZONA A-5)

Confinante: Arcillas y margas terciarias, localmente evaporitas.

- **Espesor:** El conjunto terciario es predominantemente lutítico, pudiendo alcanzar espesores superiores a 4.000 m.
- **Profundidad base:** Desde 0 a más de 4.000 m.
- **Continuidad:** Las facies lutíticas son ubicuas y muy abundantes, pero la abundancia local de intercalaciones permeables (areniscas, conglomerados, carbonatos) puede derivar en una ausencia local de confinamiento efectivo.
- **Observaciones:** Gran heterogeneidad litológica, con indeterminación en cuanto a su distribución lateral y vertical. Localmente hay tramos de evaporitas de potencia hectométrica.

Almacén: Areniscas y conglomerados intercalados en la sucesión terciaria predominantemente lutítica.

- **Espesor:** Son intercalaciones de potencia métrica a decamétrica, localmente hectométrica.
- **Profundidad techo:** Los niveles permeables se encuentran dispersos entre 0 y más de 4.000 m.
- **Continuidad:** Generalmente es esperable una continuidad reducida de los niveles favorables, con una distribución espacial de difícil reconstrucción geométrica. En algunos sectores puede no haber ningún nivel favorable.
- **Observaciones:** Gran heterogeneidad litológica, por alternancia de términos permeables e impermeables. En las proximidades de los bordes de la cuenca (especialmente el meridional) abundan las facies detríticas groseras, con posibilidad de estar cabalgadas por materiales mesozoicos y/o paleozoicos que pueden constituir también confinamientos efectivos (e incluso, posibles almacenes).

8.4.2 CUENCA DEL EBRO: SECTOR CENTRAL Y ORIENTAL (ZONA A-6)

Confinante 1: Arcillas y evaporitas terciarias.

- **Espesor:** 800 a 2.400 m, desde la superficie.
- **Profundidad base:** 800 a 2.400 m.
- **Continuidad:** En el sector central (Fraga y alrededores) el relleno terciario (de unos 1.000 m) es mayoritariamente calcáreo,

-
- Observaciones: con una capacidad confinante esperable muy reducida. Presentan intercalaciones margosas que podrían servir de confinamiento a posibles almacenes en los carbonatos jurásicos infrayacentes en el sector. Preferencia por sectores con potentes tramos evaporíticos (sectores de Zaragoza y Monzón, este último con estructuras de cabalgamiento a favor de los Yesos de Barbastro). La capacidad confinante del relleno arcilloso es difícil de precisar, pues dependerá de la densidad de intercalaciones de materiales permeables (areniscas, carbonatos).
Buscar estructuras diapíricas.

Almacén 1: Areniscas y/o carbonatos terciarios.

- Espesor: Variable. Areniscas más abundantes y potentes hacia los bordes (borde meridional), pero generalmente en capas de orden métrico a decamétrico. Carbonatos eocenos en la mitad oriental (localmente con términos arenosos), con espesores entre menos de 100 y 300 m.
- Profundidad techo: Variable. Las areniscas se distribuyen a lo largo de todo el espesor del relleno terciario, mientras los carbonatos orientales se sitúan en torno a los 800-1.000 m.
- Continuidad: Los niveles arenosos posiblemente son muy discontinuos, mientras los carbonatos muestran una mayor continuidad, aunque restringidos a la mitad oriental de esta zona.

Almacén 2: Carbonatos jurásicos y Cretácico Inferior o Paleógeno, localmente.

- Espesor: Desde 400 m en Ballobar y Esplús hasta menos de 70 m en Zuera. Presentes sólo en la mitad occidental de la zona, disminuye su espesor progresivamente hacia el Oeste y muy bruscamente al Este.
- Profundidad techo: En torno a 1.800 m en la mayor parte de la zona. Ascende a 1.000-1.100 m en el sector central (Fraga) y desciende a 2.400 m en Monzón, al Norte.
- Continuidad: Solamente se encuentran en la mitad occidental de la zona, donde presentan buena continuidad, salvo en sectores puntuales, donde han desaparecido por erosión o se encuentran muy reducidos (sectores de Monegrillo y Sariñena).
- Observaciones: En el sector oriental los materiales del relleno terciario yacen directamente (entre 1.000 y 2.000 m de profundidad) sobre diversos términos del Triásico, algunos de los cuales pueden constituir almacenes potenciales.

Confinante 2: Margas del Liásico superior.

- Espesor: 100 - 200 m.
- Profundidad base: 2.000 a 2.100 m.
- Continuidad: Solamente se encuentra este tramo en el extremo occidental de la zona, aproximadamente al Oeste del meridiano de Zaragoza.
- Observaciones: Este tramo de presencia local únicamente sirve de confinamiento para almacenes situados en los carbonatos del Liás inferior (y como complemento de almacenes en tramos inferiores de la serie).

Almacén 3: Calizas y dolomías del Liás inferior.

- Espesor: 200 a 400 m en el extremo occidental de la zona.
- Profundidad techo: 2.000 a 2.100 m en dicho sector.
- Continuidad: Solamente en el extremo occidental de la zona.
- Observaciones: Están presentes también en otros sectores, pero en ellos no se encuentra el Liás superior margoso, de forma que se incluyen en los carbonatos jurásicos.

Confinante 3: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper (+ Retiense o Infralías anhidrítico).

- Espesor: 200 a 500 m en la mitad occidental (localmente 750 m), de los cuales 200 m suelen ser evaporitas del Retiense o Infralías. En el sector oriental no hay evaporitas del Retiense o Infralías, y el Keuper es mucho más reducido, entre 0 y 50 m.
- Profundidad base: 1.100 a 3.000 m en la parte occidental, aumentando principalmente hacia el Norte. En el sector oriental, de menor espesor, entre 1.000 y 2.000 m, también más profundo hacia el Norte.
- Continuidad: Localmente ausentes.

Almacén 4: Dolomías del Muschelkalk

- Espesor: 200 a 400 m, aunque localmente pueden estar reducidas por erosión a 50-60 m o incluso 0 m. Generalmente se trata de dos tramos dolomíticos separados por un tramo intermedio arcilloso-evaporítico (de 50-60 m hasta 200 m de espesor), que puede servir de confinamiento para almacenes situados en la barra inferior (y en el Buntsandstein).
- Profundidad techo: 1.100 a 3.000 m en la parte occidental, aumentando principalmente hacia el Norte. En el sector oriental, entre 1.000 y 2.000 m.
- Continuidad: Localmente pueden estar erosionadas parcial o totalmente, especialmente en el sector oriental.

-
- Observaciones: Habría que valorar la calidad de este tramo litológico como almacén, ya que el espesor de sus tramos potencialmente permeables (carbonatados) es relativamente reducido, y la presencia de evaporitas en su interior, en su techo y muchas veces en su base puede sellar las fracturas que constituyen la porosidad principal del tramo.

Almacén 5: Conglomerados y areniscas del Buntsandstein.

- Espesor: 20 a 300 m de tramo arenoso-conglomerático basal.
- Profundidad techo: 1.100 a 3.300 m, aumentando en general hacia el Norte.
- Continuidad: Parece estar presente en toda la zona, si bien con desarrollo variable.
- Observaciones: El tramo superior del Buntsandstein suele ser arcilloso-evaporítico, pero de escasa potencia, de forma que aunque localmente puede constituir un confinamiento efectivo, en general no puede considerarse como tal, de manera que un posible almacén en los tramos basales del Buntsandstein habría que considerarlo en conexión con la barra dolomítica inferior del Muschelkalk, y sellado por el tramo intermedio evaporítico del Muschelkalk.

8.4.3 CUENCA DEL EBRO: SECTOR ORIENTAL-MERIDIONAL (ZONA A-7)

Confinante: Evaporitas y arcillas del Triásico en facies Keuper y Evaporitas y dolomías del Retiense o Infralías.

- Espesor: 600 a 700 m, aunque localmente están ausentes (Caspé).
- Profundidad base: 1.400 a 2.200 m, aumentando hacia el Norte.
- Continuidad: Presentes en todos los sondeos salvo en el extremo oriental (Caspé).
- Observaciones: El Retiense o Infralías es predominantemente evaporítico, pero en algunos sectores contiene tramos carbonatados de importancia, algunos de los cuales puede constituir un posible almacén.

Almacén: Dolomías del Muschelkalk y areniscas y conglomerados del Buntsandstein.

- Espesor: El Muschelkalk está constituido por dos barras dolomíticas, cada una de espesor próximo al centenar de metros, separadas por un tramo evaporítico intermedio de 60 a 300 m de espesor, que puede servir de confinamiento para almacenes situados en la barra inferior (y en el Buntsandstein). Debajo se dispone el Buntsandstein, de 100 a 400 m de espesor, formado por

-
- conglomerados y areniscas, con arcillas y evaporitas a techo.
 - Profundidad techo: 1.400 a 2.200 m, aumentando hacia el Norte. Localmente, en Caspe, se encuentra a 240 m.
 - Continuidad: Presentes en todos los sondeos.
 - Observaciones: Habría que valorar la calidad de este tramo litológico como almacén, ya que el espesor de sus tramos potencialmente permeables (carbonatados) es relativamente reducido, y la presencia de evaporitas en su interior, en su techo y muchas veces en su base puede sellar las fracturas que constituyen la porosidad principal del tramo.
El tramo superior del Buntsandstein suele ser arcilloso-evaporítico, pero de escasa potencia, de forma que aunque localmente puede constituir un confinamiento efectivo, en general no puede considerarse como tal, de manera que un posible almacén en los tramos basales del Buntsandstein habría que considerarlo en conexión con la barra dolomítica inferior del Muschelkalk, y sellado por el tramo intermedio evaporítico del Muschelkalk.

8.4.4 CUENCA DEL EBRO: SECTOR ORIENTAL-SEPTENTRIONAL (ZONA A-8)

Confinante: Evaporitas paleógenas.

- Espesor: 100 a 1.000 m.
- Profundidad base: 700 a 2.600 m.
- Continuidad: Localmente ausente.
- Observaciones: La profundidad aumenta al alejarse del borde catalánide. Estructuras tectónicas que pueden constituir trampas. Con frecuencia el relleno terciario de la cuenca es mayoritariamente arcilloso, de manera que aun en ausencia de tramo evaporítico puede constituir un buen confinamiento.

Almacén: Carbonatos paleógenos (fundamentalmente calizas eocenas).

- Espesor: 300-400 m, oscilando entre menos de 100 m y 650 m.
- Profundidad techo: 900 a 3.000 m.
- Continuidad: Localmente son alternancias carbonatos-margas.
- Observaciones: La profundidad tiende a aumentar al alejarse del borde catalánide. En el extremo occidental se interpone un tramo de margas (100 a 600 m) entre las evaporitas y los carbonatos. Localmente hay posibles formaciones almacén menores por encima de este tramo carbonatado (areniscas y areniscas calcáreas de hasta 100 m de espesor).

9. CUENCA DEL DUERO

9.1 MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La cuenca del Duero se localiza en el cuadrante noroeste de la Península Ibérica, siendo la de mayor extensión de las estudiadas en este trabajo. Se ha considerado tradicionalmente como una cuenca intraplaca de evolución compleja que comenzó a configurarse a finales del Cretácico.

En función de sus características tectosedimentarias se distinguen varios sectores (figura 9.1):

- sector norte, el cual se comportó como una cuenca de antepaís de la Cordillera Cantábrica al menos desde el Eoceno
- sector oriental, relacionado del mismo modo con la evolución alpina de la Cordillera Ibérica, salvo la cuenca de Almazán que muestra una evolución de cuenca de tipo "piggy-back" durante el Paleógeno
- sector occidental y suroccidental, los cuales se caracterizan por una tectónica de horst y grabens a favor de fallas NE-SO y sus conjugadas, principalmente durante el Paleógeno
- sector sur, el cual se comportó como una cuenca de antepaís del Sistema Central durante el Oligoceno-Mioceno inferior.

Las áreas fuente de los bordes occidental y meridional de la cuenca son fundamentalmente metasedimentos y granitoides precámbricos y paleozoicos, mientras que las de los bordes septentrional y oriental son carbonatadas y siliciclásticas paleozoicas y mesozoicas (figura 8.1). Esta variedad litológica controló la composición y madurez de los sedimentos que rellenan la cuenca, mientras que los depocentros más importantes se localizan en torno a los bordes más activos, es decir, la Cordillera Cantábrica y el Sistema Ibérico.

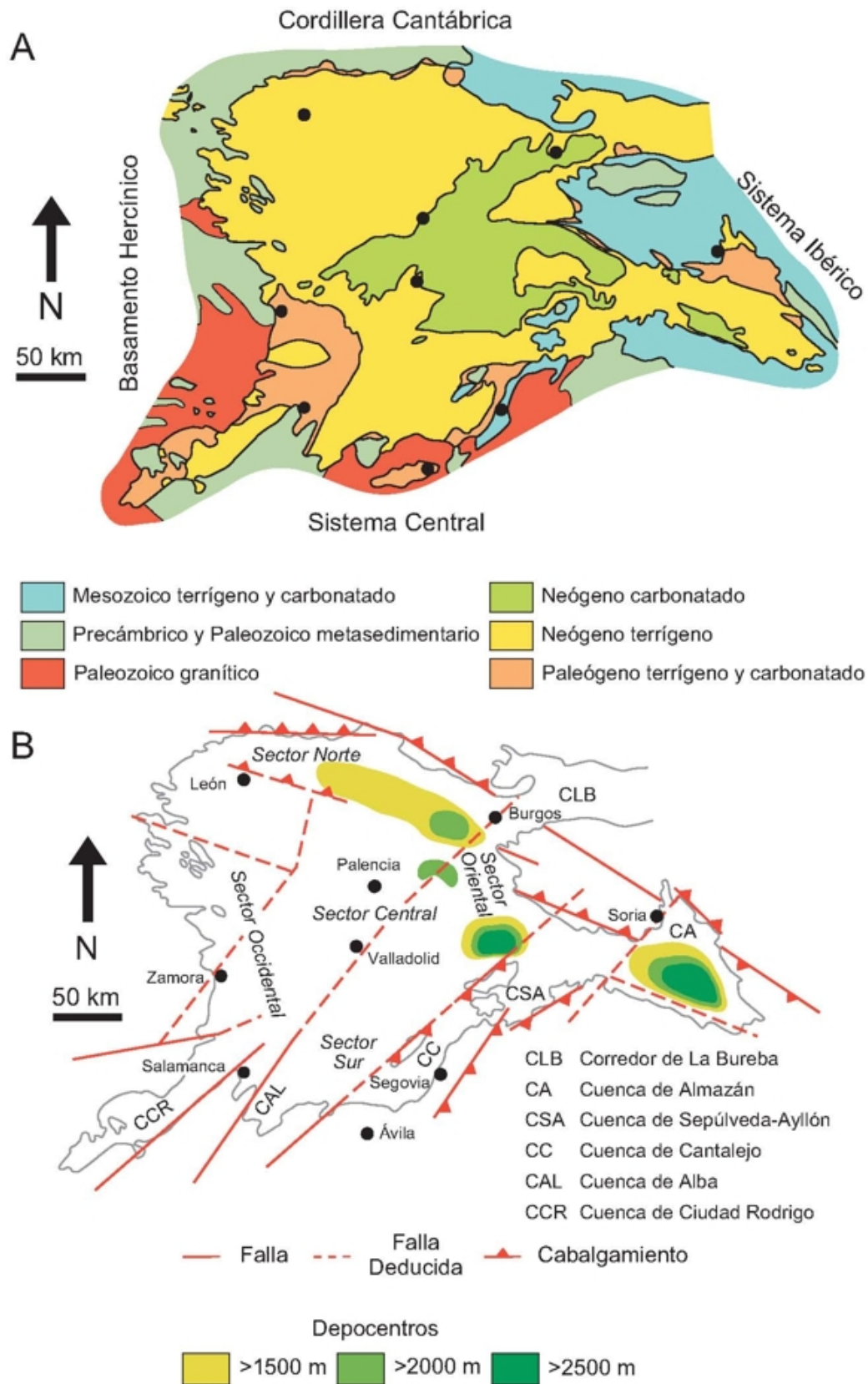


Figura 9.1 a) Mapa geológico de la cuenca del Duero y unidades geológicas limítrofes. b) Principales alineaciones observadas en la cuenca del Duero y relación con las áreas de máxima acumulación de sedimentos. Situación de los sectores diferenciados y principales cuencas que configuran la principal. (Alonso-Gavilán *et al*, 2004)

9.2 SONDEOS PETROLÍFEROS

No son muy abundantes los sondeos profundos en la Cuenca del Duero, y se concentran especialmente en su parte oriental. Reflejan la existencia de una franja oriental-septentrional de gran espesor que se continúa en la Cuenca de Almazán y hacia la Cuenca del Ebro por el corredor de La Bureba. Esta franja, sin embargo, se encuentra interrumpida al menos en dos lugares por la acción de fallas NE-SO que individualizan los depocentros de Almazán y Aranda de Duero del resto de la zona subsidente. La mayor parte de la cuenca presenta un reducido espesor de relleno terciario. Los principales sondeos que informan sobre la constitución litológica de la cuenca son:

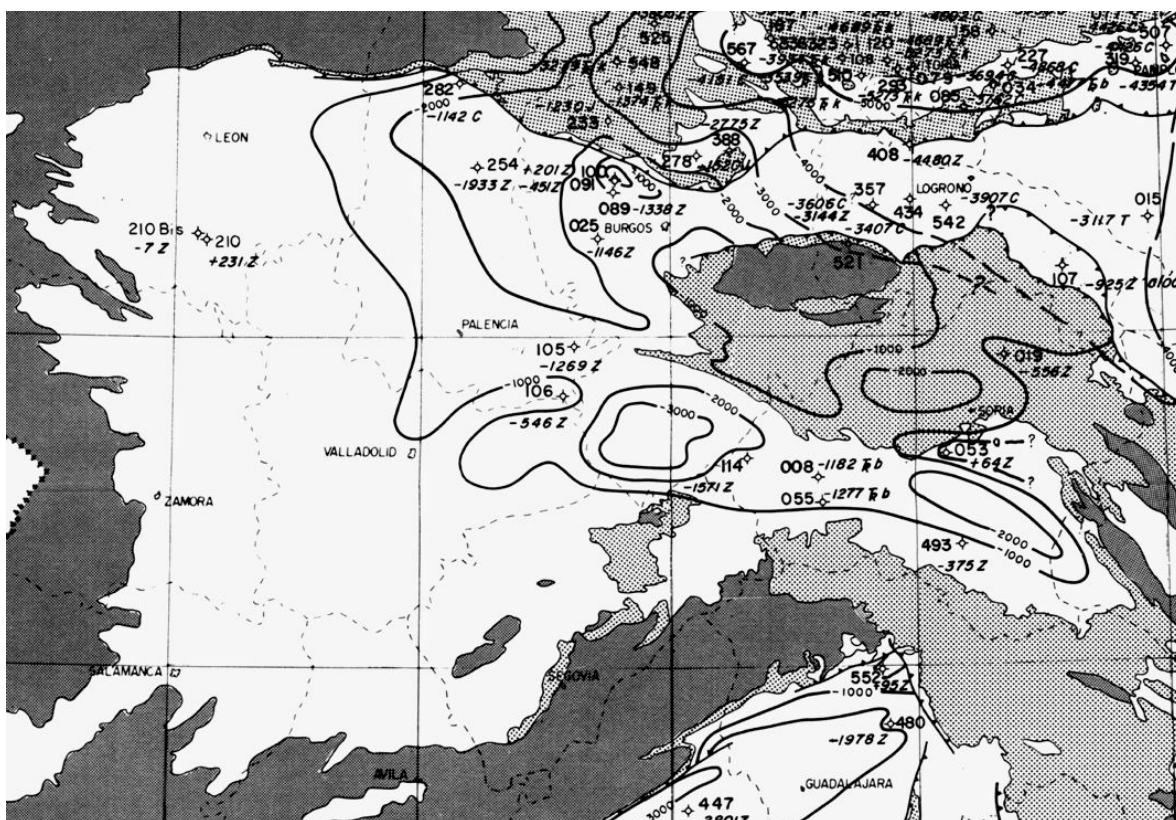


Figura 9.2 Situación de los sondeos petrolíferos en la Cuenca del Duero. Isobatas del zócalo paleozoico o basamento cristalino referidas al nivel del mar (Extractado de I.G.M.E., 1987).

León-1 (nº 210) y León-1 bis (nº 210 bis)

Paleozoico a 534 m. Encima, calizas paleógenas hasta 512 m. A techo, areniscas y arcillas neógenas con niveles de gravas más abundantes en la parte inferior.

Peña-1 (nº 282)

1.572 m de arcillas terciarias con intercalaciones arenosas, con anhidrita en el tercio inferior, correspondiente al Garum. Debajo, calizas del Cretácico superior, con tramos de margas en la parte superior y en la parte inferior. La base es arenosa y, en torno a 2.000 m descansa sobre las arenas y arcillas del Cretácico inferior en facies Utrillas que a su vez reposa a 2.252 m sobre arcillas, areniscas y conglomerados de la facies

Weald. El sondeo finaliza dentro de estos materiales, unos metros más abajo, a 2.323 m.

Villameriel-1 (nº 254)

2.227 m de relleno terciario eminentemente arcilloso con intercalaciones arenosas en el que destaca la abundancia de anhidritas en los 200 m inferiores, correspondientes a las facies Garum. Hasta 2.632 m se extienden las calizas y dolomías senonienses, sobre las Arenas de Utrillas, que reposan sobre el Paleozoico a 2.849,5 m.

Río Franco-1 (nº 105)

1.500 m de arcillas con intercalaciones de areniscas y lechos de yesos; margas y calizas en los 250 m superiores. Hasta 1.907 m, calizas terciarias con intercalaciones de arcillas, que reposan sobre 117 m de calizas bioclásticas del Cretácico superior. Entre 2.024 y 2.165 m, Cretácico inferior constituido por alternancia de arcillas y areniscas. Reposa sobre un reducido espesor de areniscas cuarcíticas triásicas que, a 2.191 m dan paso al Paleozoico.

Don Juan-1 (nº 106)

El Terciario está formado por unos 900 m de lutitas (margas) con abundantes intercalaciones de calizas y areniscas. Alguna pasada conglomerática a unos 600 m. Debajo, casi 100 m de dolomías sacaroideas y oolíticas terciarias dan paso a 998 m a un potente tramo de calizas del Cretácico superior que se continúa hasta 1.263 m. Un tramo de areniscas, arcillas y conglomerados del Cretácico inferior se extiende hasta 1.408 m, donde reposa sobre areniscas y conglomerados triásicos, discordantes sobre el Paleozoico a 1.480 m.

Iglesias-1 (nº 25)

Terciario formado por alternancia de arcillas, areniscas y yesos hasta 1.198 m. Debajo, el Cretácico superior, hasta 1.145 m, está formado por un conjunto carbonatado superior de más de 150 m y arcillas en la base. El Cretácico inferior, hasta 1.627 m, está formado por areniscas y conglomerados. 10 m de dolomías liásicas dan paso al Trías, formado por unos 250 m de arcillas y anhidritas sobre casi 200 m de areniscas y conglomerados. La discordancia del Trías sobre el Paleozoico se sitúa a 2.091 m.

San Pedro-1 (nº 89)

1.384 m de margas terciarias con intercalaciones de areniscas descansan sobre un potente Cretácico superior (hasta 2.073 m), formado por varios paquetes carbonatados (a veces con areniscas a techo) de varias decenas de metros separados por tramos arcillosos de espesor similar. Debajo, entre 2.000 y 2.292 m, se extienden las areniscas del Cretácico inferior, que reposan sobre el Paleozoico.

San Pedro-2 (nº 91)

388 m de margas terciarias reposan sobre el Cretácico superior carbonatado (arenoso a techo), que a unos 860 m descansa sobre margas y limos albienses. A 1.131 m, margas y limos triásicos que a 1.445 m reposan sobre el Paleozoico.

San Pedro-3 (nº 100)

El basamento paleozoico se encuentra a 799 m. Encima, Triásico margoso, Cretácico inferior arenoso, Cretácico superior carbonatado y margas terciarias.

Alcozar-1 (nº 114)

El Terciario continental, eminentemente arcilloso pero con intercalaciones calcáreas de cierta entidad, alcanza los 1.118 m. El tercio inferior contiene abundante yeso y

anhidrita, y descansa sobre calizas del Cretácico superior, con intercalaciones arenosas y arcillosas, que a 1.533 m da paso a las arenas de Utrillas, con intercalaciones arcillosas. A 1.685 m reposan sobre calizas y dolomías jurásicas que a unos 2.000 m dan paso progresivamente a un tramo de anhidrita y yeso que a 2.200 m reposa sobre areniscas triásicas, conglomeráticas en la base, discordantes sobre unos 1.000 m de dolomías paleozoicas (carboníferas) a 2.517 m.

Burgo de Osma-1 (nº 8)

No hay relleno terciario. Directamente comienza el sondeo en calizas y margas cenomaniense-turonienes. Entre 358 y 752 m aproximadamente alternan arcillas y areniscas (arcillas superiores cenomanienses hasta 500 m y debajo facies Weald); debajo el Lías consta de alternancia de arcillas, calizas y areniscas hasta 1.092 m, donde comienza un potente tramo de carniolas retienses que se prolonga hasta 1.875 m. Hasta 2.130 m están los materiales triásicos, fundamentalmente evaporíticos (sal y yeso), con dolomías a techo. Debajo, un tramo de dolomías y calizas (Muschelkalk) hasta 2.200 m aproximadamente y el sondeo termina tras atravesar una decena de metros de areniscas del Buntsandstein, a 2.211 m.

Gormaz-1 (nº 55)

No hay recubrimiento terciario. Directamente el sondeo comienza en calizas del Cretácico Superior, que tras un tramo arcilloso pasan a 234 m a facies arenosas del Cretácico Inferior. A 352 m nuevamente arcillas, ya liásicas, que a 600 m pasan a calizas, dolomías en la base, sobre anhidritas a 929 m. El tramo anhidrítico, potente, descansa a 1.314 m sobre arcillas y evaporitas del Keuper que a 1.745 m pasan a areniscas del Buntsandstein, con pasadas conglomeráticas, hasta el final del sondeo, a 2.200 m.

Quintana Redonda-1 (nº 53)

451 m de relleno terciario arcilloso, conglomerático en la base, sobre calizas cretácicas hasta 866 m que reposan sobre las arenas de Utrillas, con pasadas conglomeráticas, que a su vez descansan sobre el Paleozoico a 1.000 m.

El Gredal-1 (nº 493)

El sondeo atraviesa un potente tramo eminentemente carbonatado aunque con intercalaciones variadas que comprende el Terciario y parte del Cretácico. A 1.000 m el Cretácico es arenoso y termina a 1.129 m sobre las arcillas con evaporitas del Keuper. Una barra dolomítica (Muschelkalk) de unos 30 m aparece a 1.257 m y reposa sobre areniscas del Bunt que, a 1.445 m, en facies groseras, es discordante sobre pizarras paleozoicas.

9.3 UNIDADES, FORMACIONES Y TRAMOS DE INTERÉS

En la mayor parte de la extensión de la cuenca del Duero la potencia del relleno terciario es demasiado escasa para que alguna posible formación almacén terciaria pueda encontrarse a una profundidad adecuada, entre 800 y 2.500 m. Solamente en el sector oriental (incluida la cuenca de Almazán) y en parte del sector septentrional el espesor es suficiente para considerar dicha posibilidad. Además, en la extensa zona sin suficiente recubrimiento éste descansa directamente sobre el zócalo paleozoico, sin mediar formaciones mesozoicas que pudieran constituir posibles almacenes.

Dentro de la zona más subsidente puede diferenciarse el sector situado aproximadamente al sur del corredor de La Bureba, incluyendo la Cuenca de Almazán,

caracterizado por la presencia de Buntsandstein sobre el Paleozoico, material que puede constituir un almacén adecuado y que en la mayor parte de los casos cuenta con una formación evaporítica potente situada por encima (Keuper y/o anhidritas retienses) que podría constituir un buen confinamiento. Esta disposición se da a una profundidad adecuada en la mayor parte de los sondeos del sector considerado. Puntualmente, también se añade a esta situación el Muschelkalk, constituido por dolomías (sondeos 493 y 8).

Como posible formación almacén destacan las calizas del Cretácico superior, que constituyen el techo del sustrato del relleno terciario en gran parte de los sondeos petrolíferos, a veces en contacto directo o muy próximo con formaciones carbonatadas de la base del Terciario (sondeos 105 y 106). En los demás casos habría que valorar la calidad del relleno terciario para confinar un posible almacén a cotas inferiores a los 800 m, circunstancia difícil de realizar, dada la heterogeneidad de dicho relleno, salvo en el caso de la presencia de un tramo eminentemente arcilloso similar al Garum (sondeos 282 y 254, en sector norte de la cuenca).

Otra formación de interés como almacén son las Arenas de Utrillas, del Cretácico inferior, que están presentes también en la mayor parte de los sondeos, unas veces en continuidad con las calizas del Cretácico superior y otras veces (menos frecuentes) separadas por un tramo más arcilloso. También en algunos puntos las capas detríticas del Weald pueden ser de interés. Localmente también hay formaciones carbonatadas jurásicas bajo el Cretácico que pueden constituir también un posible almacén, puntualmente adosado al conjunto cretácico.

En algunos sectores, sin embargo, el conjunto Bunt-Utrillas-Cretácico superior (carbonatos terciarios) se encuentra, casi en su totalidad, conectado, (sondeos 105 y 106), formando un posible almacén de enorme espesor, de manera que ha de confiarse el confinamiento al resto del Terciario.

Por otra parte, son muy escasos los datos sobre la distribución de las formaciones paleozoicas en el sustrato de la cuenca, de manera que no podemos considerarlas, pero algunos sondeos apuntan la posibilidad de utilización de potentes formaciones paleozoicas, como los 1.000 m de dolomías carboníferas perforadas en el sondeo 114 (aunque en este caso se encuentran ya demasiado profundas).

9.4 UNIDADES PRESELECCIONADAS COMO POSIBLE ALMACÉN DE CO₂ EN LA CUENCA DEL DUERO

A continuación se describen para cada zona las unidades potencialmente favorables para el almacenamiento geológico de CO₂, así como las posibles unidades que actuarían como sello.

9.4.1 CUENCA DEL DUERO: SECTOR ORIENTAL-SEPTENTRIONAL (ZONA A-9)

Confinante 1: Terciario predominantemente lutítico.

- Espesor: Hasta 2.200 m.
- Profundidad base: Hasta 2.200 m.
- Continuidad: Toda la cuenca, pero sólo con espesor superior a 800 m en su parte occidental, la zona considerada.

-
- Observaciones: Las intercalaciones arenosas y carbonatadas son muy abundantes en la mayor parte de los casos, pero es frecuente la presencia de un potente tramo con abundancia de evaporitas en la parte inferior del conjunto (los 200-400 m basales).

Almacén 1: Cretácico Superior carbonatado y Cretácico Inferior arenoso y Jurásico carbonatado, localmente.

- Espesor: 400 a 700 m. Cuando incluye el Jurásico (en el extremo SE de la zona, sin incluir la Cuenca de Almazán) puede alcanzar los 900 m.
- Profundidad techo: 0 a 2.200 m.
- Continuidad: Presente en toda la zona.
- Observaciones: En algunos sectores la parte superior del conjunto carbonatado pertenece ya al Paleógeno. En algunos sondeos se encuentra el Cretácico Inferior arenoso directamente sobre las areniscas triásicas del Buntsandstein. Localmente el conjunto carbonatado puede quedar compartimentado por la abundancia y espesor de intercalaciones lutíticas. Entre estas intercalaciones destaca la presencia muy puntual de un tramo de hasta 250 m de Lías superior margoso que descansa sobre hasta 300 m de carbonatos del Lías inferior.

Confinante 2: Arcillas y evaporitas del Triásico Superior en facies Keuper y evaporitas retienses, localmente.

- Espesor: 100 a 450 m. Hasta más de 800 m cuando se unen las evaporitas retienses (Gormaz).
- Profundidad base: 1.000 a 2.200 m.
- Continuidad: Solamente se encuentra en los sondeos del sector SE de la zona, incluyendo la Cuenca de Almazán, y localmente en algún otro punto.
- Observaciones:

Almacén 2: Triásico carbonatado (Muschelkalk) y arenoso (Buntsandstein).

- Espesor: Los carbonatos del Muschelkalk pueden tener hasta 60 m de potencia, llegando a estar ausentes en algunos lugares, de forma que el Keuper yace directamente sobre el Buntsandstein. Las areniscas del Buntsandstein oscilan entre 150 y casi 500 m de potencia.
- Profundidad techo: 1.000 a 2.200 m.
- Continuidad: Este conjunto solamente se encuentra en los sondeos del sector SE de la zona, incluyendo la Cuenca de Almazán. Las dolomías del Muschelkalk se encuentran ausentes en algunos puntos de dicho sector.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aller, J., Álvarez-Marrón, J., Bastida, F., Bulnes, M., Heredia, N., Marcos, A., Pérez-Estaún, A., Pulgar, J.A. y Rodríguez-Fernández, L.R. (2004): Estructura, deformación y metamorfismo. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 42-49.
- Alonso-Gavilán, G. Armenteros, I. (coords.), Carballeira, J., Corrochano, A., Huerta, P. y Rodríguez, J.M. (2004): Cuenca del Duero. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 550-556.
- Alonso-Zarza, A.M. (coord.); Calvo, J.P.; Silva, P.G. y Torres, T. (2004): Cuenca del Tajo. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 556-561.
- Barnolas, A. y Pujalte, V. (2004): La Cordillera Pirenaica. Definición, límites y división. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 233-241.
- Bastida, F. (coord.) (2004): Zona Cantábrica. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 25-26.
- González-Delgado, J.A. (coord.), Civis, J., Dabrio, C.J., Goy, J.L., Ledesma, S., Pais, J., Sierro, F.J. y Zazo, C. (2004): Cuenca del Guadalquivir. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 543-550.
- I.G.M.E. (1987). *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España*. Madrid, 465 p.
- Marcos, A. (coord.) (2004). Zona Asturoccidental-Leonesa. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 49.
- Martínez Catalán, J.R., Martínez Poyatos, D. y Bea, F. (coords.) (2004): Zona Centroibérica. Introducción. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 68-69.
- Pardo, G. (coord.), Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Pérez-Rivarés, F.J., Vázquez-Urbez, M. y Villena, J. (2004): La Cuenca del Ebro. En *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 533-542.
- Pérez-Estaún, A., Bea, F., Bastida, F., Marcos, A., Martínez-Catalán, J.R., Martínez Poyatos, D., Arenas, R., Díaz García, F., Azor, A., Simancas, J.F. y González Lodeiro, F. (2004): La Cordillera Varisca europea: el Macizo Ibérico. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 21-25.
- Ruiz, C., Martínez, R., Suárez, I., Recreo, F., Zapatero, M.A., Prado, P., Campos, R., Pérez del Villar, L., Sastre, J., Lomba, L., Hurtado, A., Arenillas, A., Sastre, J., Ortiz, G. (2006). *Almacenamiento geológico de CO₂. Criterios de selección de emplazamientos*, CIEMAT, Madrid, 108 p.
- Simancas, J.F. (coord.) (2004). Zona Sudportuguesa. Introducción. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 199.

Sopeña, A. y de Vicente, G. (2004). Cordilleras Ibérica y Costero-Catalana. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 467-470.

Teixell, A. (2004). Estructura de los Pirineos: generalidades. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 321-323.

Vera, J.A. (Ed.) (2004). *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 890 p.

Vera, J.A. y Martín-Algarra, A. (2004). Cordillera Bética y Baleares. Divisiones mayores y nomenclatura. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 348-350.

