



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**ESTUDIO DE LAS POSIBILIDADES DE  
UTILIZACION DE FORMACIONES GEOLOGICAS  
PROFUNDAS PARA LA ELIMINACION DE  
RESIDUOS LIQUIDOS EN LA PROVINCIA DE  
CASTELLON DE LA PLANA.**



<b>SUPER PROYECTO</b>	AGUAS SUBTERRANEAS			Nº	9005
<b>PROYECTO AGREGADO</b>	EST., CONT. ACUIF. POR ACTIVIDADES AGRICOLAS, INDUSTRIALES Y URBANAS			Nº	320
<b>TITULO PROYECTO</b> ESTUDIO DE LAS POSIBILIDADES DE UTILIZACION DE FORMACIONES GEOLOGICAS PROFUNDAS PARA LA ELIMINACION DE RESIDUOS INDUSTRIALES 2ª FASE. PROVINCIA DE CASTELLON DE LA PLANA					
<b>Nº PLANIFICACION</b> AS1.02.87.06/ <b>Nº DIVISION AGUAS, G.A.</b>					133
<b>FECHA EJECUCION</b>	<b>INICIO</b>	1/09/89	<b>FINALIZACION</b>	31/08/90	

<b>INFORME (Título):</b>	
<b>CUENCA(S) HIDROGRAFICAS(S)</b>	JUCAR
<b>COMUNIDAD(S) AUTONOMAS</b>	VALENCIA
<b>PROVINCIAS</b>	CASTELLON DE LA PLANA

# R E S U M E N

## **CONTENIDOS:**

Geología Regional

Modelos de inyección

Sistemas y subsistemas hidrogeológicos. calidad de las aguas subterráneas.

Revisión de los sondeos profundos de investigación petrolera

Estudios complementarios

Estudio de detalle en la Zona Norte (AREA DE VINAROS)

Resumen del estudio del subsuelo. Selección de áreas con posibilidades. Soluciones propuestas.

Residuos líquidos en la provincia de Castellón

Estudios de compatibilidad

## RESUMEN

Este proyecto surge de la necesidad de dar respuesta al problema de eliminación de residuos líquidos industriales y urbanos en la provincia de Castellón, con el objetivo de lograr un punto de equilibrio entre desarrollo industrial y protección del medio ambiente.

El objetivo final de este proyecto es evaluar las posibilidades de almacenamiento controlado en formaciones permeables profundas, de los residuos líquidos generados en la provincia de Castellón.

Dentro del objetivo general del proyecto se pueden enumerar los siguientes objetivos parciales:

- Estudio detallado de las formaciones permeables aptas para la inyección.
- Selección de las zonas más propicias desde el punto de vista geológico.
- Caracterización de los residuos generados en el área, desde el punto de vista de su inyección en el subsuelo.
- Análisis de compatibilidad con el tipo de fluido de la formación almacén.
- Estudio de viabilidad técnica y económica para llevar a cabo la operación.
- Elaboración, a nivel de anteproyecto, de un programa de actuaciones concreta a realizar, así como de las instalaciones necesarias para su puesta en marcha.

Para la consecución de estos objetivos se han desarrollado los siguientes trabajos:

- Estudio estratigráfico-tectónico de las áreas de investigación, elaboración de los "modelos a priori".
- Estudio hidrogeológico de los acuíferos explotados de

la zona. Evaluación de acuíferos a proteger.

- Estudio de sondeos de petróleo, con reinterpretación de diagráfias (logs) y ensayos, al objeto de caracterizar almacenes y coberteras.
- Reinterpretación de perfiles sísmicos, para elaborar cortes geológicos y trazas correlaciones entre sondeos.
- Evaluación de residuos urbanos e industriales en la provincia de Castellón (volúmenes y características).
- Estudios de compatibilidad del residuo con la roca almacén y el fluido intersticial.
- Elaboración de un anteproyecto, con diseño del pozo de inyección y estimación de costes.

La información geológica de partida y la concentración de efluentes líquidos provoca que el estudio quede delimitado a dos áreas, las denominadas AREA DE VINAROSZ y AREA DE LA PLANA, que corresponden a dos zonas costeras en el Norte y Sur de la provincia, respectivamente.

A continuación se pasa a resumir los trabajos, información y conclusiones obtenidas en los diferentes apartados.

### Geología Regional

El AREA DE VINAROSZ se encuentra ubicada en la intersección de dos unidades morfoestructurales de entidad geológica reconocida: la Cordillera Ibérica y la Cordillera Costero-Catalana.

En este área el Mesozoico aparece muy bien representado, mientras que el Paleozoico apenas aflora.

El Cretácico se encuentra ampliamente desarrollado tanto en facies carbonatadas como detríticas, con predominio de las primeras. Sobre estos materiales y generalmente a modo de relleno de fosas, cubetas y/o depresiones aparecen potentes series detríticas de origen continental. Los depósitos

cuaternario, de gran representatividad cartográfica terminan de configurar la geología de la región, destacando tanto los del litoral mediterráneo como los del interior (ramblas, etc.).

Estructuralmente cabe destacar dos direcciones principales: una general NE-SW y otra NW-SE que corresponden a las alineaciones de las unidades a las que se ha hecho referencia. La interferencia de ambas motiva una importante e intensa fracturación en la parte más oriental que destaca de una zona subtabular noroccidental. En la zona más meridional el Triásico aflora con un carácter no extrusivo, según una alineación NW-SE.

El AREA DE LA PLANA se encuentra en el extremo suroriental de la Cordillera Ibérica, la cual está constituida por un zócalo formado por materiales del Precámbrico y Paleozoico deformados durante la orogenia hercínica, sobre el que se depositan discordantemente materiales del Pérmico, Mesozoico y Terciario, afectados por movimientos de la orogenia alpina, según la dirección general NW-SE (Directriz Ibérica) con vergencias al SW en la parte occidental (Rama castellana) y Hacia el NE en la oriental (RAMA Aragonesa).

### Modelos de inyección

Diversos modelos de inyección (conjunto de almacén y cobertera) han sido establecidos sobre materiales de edad triásica, jurásica y cretácica, estando constituidos los almacenes por materiales detríticos (areniscas del Buntsandstein) y carbonatados (Muschelkalk inferior y superior, Jurásico y Cretácico), y las coberteras por arcillas (Buntsandstein), margas-arcillas y evaporitas (Muschelkalk medio y Keuper) y margas-margocalizas (Jurásico y Cretácico).

### Sistemas y subsistemas hidrogeológicos. calidad de las aguas subterráneas.

La provincia de Castellón de la Plana ocupa parte de los sistemas acuíferos n°55 (Javalambre-Maestrazgo), y n°56 (Sierra del Espadán-Planas de Castellón y Sagunto), según la nomenclatura del Mapa de Síntesis de Sistema Acuíferos del

ITGE.

El Sistema nº55 Javalambre-Maestrazgo, presenta una superficie total aproximada de 11.500 km<sup>2</sup>, extendiéndose sobre las sierras de Gudar, Montsiá-Godall, Puertas de Beceite, Javalambre, Camarena y Pobo, y las Planas de Vinarós y Oropesa.

Está formado por materiales de un espectro temporal muy amplio. Los principales niveles acuíferos están constituidos por: dolomías, carniolas y calizas jurásicas. En las Planas litorales, el nivel acuífero principal se sitúa en los conglomerados y arenas miocuaternarias, localizándose en profundidad un acuífero carbonatado mesozoico y confinado por margas y margocalizas del Mioceno. El impermeable lo constituyen los materiales margoarcillosos-evaporíticos en facies Keuper. La alimentación del sistema se realiza fundamentalmente por la infiltración del agua de lluvia y la descarga se produce por emergencias, salidas al mar y bombeos en las Planas de Vinarós y Oropesa.

El acuífero carbonatado profundo presenta aguas con buena calidad en toda el área donde es explotado, de carácter natural bicarbonato, aunque en la zona sur, donde estos materiales afloran prácticamente en la línea de costa (Peñíscola) presentan ligeros síntomas de fenómenos intrusivos. En la zona de Vinarós y Benicarló estos materiales se sitúan a importantes profundidades (más de 400 metros), por lo que son escasamente explotados. El acuífero detrítico superficial presenta una buena calidad general en las zonas más alejadas de la costa, pero en las zonas de intensa explotación -proximidades a núcleos costeros como Vinarós, Benicarló, Peñíscola- aparecen importantes fenómenos intrusivos y de contaminación por nitratos. De forma que la calidad de las aguas subterráneas asociadas a este acuífero superficial es bastante deficiente. La posible transferencia natural de contaminación del acuífero superficial al acuífero profundo en la Plana de Vinaróz-Peñíscola está descartada en principio, por la existencia de una importante capa impermeable entre ambos niveles acuíferos, las margas, margocalizas y arcillas del Mioceno, con potencias de hasta 300 metros en la línea de costa.

El sistema n°56 Sierra del Espadán-Planas de Castellón y Sagunto ocupa una superficie de 3.250 km<sup>2</sup>, de forma aproximadamente triangular y topografía sumamente diversa, que varía entre los abruptos relieves triásicos y jurásicos de la Sierra del Espadán y Sierra del Toro, las altiplanicies cretácicas y miocenas de Alpuente y Landete, y las llanuras costera pliocuaternarias de Castellón y sagunto. El sistema está integrado por cinco formaciones de interés hidrogeológico:

- Areniscas ortocuarcíticas del Buntsandstein.
- Calizas y dolomías del Muschelkalk.
- Calizas y dolomías del Lias-Dogger.
- Calizas y dolomías del Cretácico Superior.
- Gravas, arenas y conglomerados pliocuaternarios.

La importancia relativa de las mismas varía según las zonas, distinguiéndose en el sistema dos dominios sedimentarios con claras implicaciones hidrogeológicas:

- Plana de Castellón-Sagunto
- Acuíferos mesozoicos del interior

El primero está constituido por niveles acuíferos pliocuaternarios de la llanura costera, mientras que el segundo engloba al conjunto de unidades acuíferas ubicadas en los materiales mesozoicos del interior, individualizados en función de la existencia de estructura con significación hidrogeológica.

Por lo que respecta a la calidad, en la zona de la Sierra del Espadán se explotan materiales del Buntsandstein (areniscas) con aguas de buena calidad, y calizas-dolomías del Muschelkalk algo mineralizadas, si bien en algunas zonas esta mineralización llega a ser muy intensa, quizás por la presencia de las evaporitas del Keuper.

Los acuíferos jurásicos explotados presentan aguas de buena calidad, con hidrofacies bicarbonatada.

En la Plana de Castellón se explota un acuífero profundo asociado a las calizas del cretácico, sobre todo en las zonas periféricas, ya que en las zonas centrales aparece a gran profundidad, acuífero que presenta aguas de buena calidad, algo

bicarbonatada; y otro superficial asociado a materiales pliocuaternarios, de calidad deficiente por contaminación de nitratos, existiendo puntuales problemas de intrusión marina.

### Revisión de los sondeos profundos de investigación petrolera

Han sido revisados un total de 5 sondeos terrestres y 3 marinos.

Para cada uno de ellos se ha revisado la estratigrafía cortada y la estructura geológica asociada, se han reinterpretado las diagramas y ensayos recopilados, lo que ha permitido caracterizar almacenes y coberteras, ofreciendo un informe final sobre posibilidades de inyección para cada sondeo profundo.

El conjunto de sondeos revisados ha permitido establecer ciertas conclusiones sobre los modelos de inyección asociados a la geología del subsuelo en las 2 áreas definidas.

En total se han caracterizado 6 modelos de inyección, cuya descripción aparece en el siguiente cuadro:

MODELOS PROPUESTOS	ALMACENES	COBERTERAS
Modelo triásico profundo	Areniscas del Buntsandstein	Arcillas del techo del Bunt
Modelo carbonatado Muschelkalk inferior	Dolomías del Musch. inferior	Evaporitas y margas del Musc. intermedio
Modelo carbonatado Muschelkalk superior	Dolomías del Muschelkalk superior	Evaporitas y arcillas del Keuper
Modelo jurásico	Calizas y dolomías	Margas
Modelo cretácico inferior	Calizas	Margocalizas y margas
Modelo cretácico superior	Calizas	Margas y arcillas del Mioceno

## Estudios complementarios

En el estudio de la geología del subsuelo asociada a la provincia de Castellón se ha realizado en base a los sondeos de petróleo, cuya información ha sido complementada con la información procedente de la reinterpretación de sismica terrestre y marina.

Este trabajo permite establecer cortes del subsuelo y correlaciones entre sondeos profundos.

Se han interpretados varios perfiles sísmicos en las concesiones San Mateo y Vinarós (en la zona norte) y en la concesión Golfo de Valencia-B (en la zona sur).

Estos perfiles han permitido establecer el contacto Terciario detrítico-Mesozoico, por la importante tectonización, observable en superficie, que acompaña a los materiales mesozoicos, impide alguna interpretación clara de las capas inferiores.

### Estudio de detalle en la Zona Norte (AREA DE VINAROS)

Al objeto de aprovechar la mayor cantidad de datos existentes en la zona norte, se ha efectuado un estudio de detalle, que permite establecer ciertos niveles permeables en el Cretácico (Neocomiense y Aptiense) y en el Jurásico (Kimmeridgiense-Malm-, Dogger y Lias), así como niveles que pudieran actuar como impermeables o coberteras (Cretácicos: Barremiense y Jurásicos: Portlandiense-Malm-).

Existen una serie de tramos asociados a los modelos que se han denominado carbonatados Muschelkalk superior e inferior y triásico profundo, pero se encuentran a gran profundidad en la zona costera norte (>3.000 mts.), lo que impide su utilización en base a aspectos económicos.

## Resumen del estudio del subsuelo. Selección de áreas con posibilidades. Soluciones propuestas.

El análisis detallado de la información y documentación geológica existente, especialmente de investigación de hidrocarburos, ha permitido seleccionar para su estudio dos áreas relativamente extensas de la provincia de Castellón. Estas dos áreas han sido denominadas en el presente informe área de Vinarós y área de la Plana de Castellón.

La primera ocupa la mitad norte de la provincia, aunque las posibilidades de utilización de almacenes profundos se concretan al área costera, ya que es ahí donde convergen condiciones geológicas y necesidades de eliminación de residuos.

La segunda área seleccionada se concreta en la unidad morfológica conocida como la Plana de Castellón, siendo también desde el punto de vista geológico y de generación de residuos la zona costera la más interesante.

La accidentada tectónica, con estructura compresiva-distensiva compleja, que origina un modelo de alternancia de fosas y horsts, desaconseja tomar en consideración las áreas interiores de la provincia de Castellón como objetivo de futuras operaciones de inyección. Precisamente este modelo estructural pone en comunicación las formaciones permeables profundas con otras más someras, que por sus características pueden contener importantes recursos hídricos. La selección y estudio de detalle de una estructura o punto de inyección en las áreas interiores de la provincia, requeriría la aplicación de técnicas de prospección muy caras ( sísmica y sondeos profundos).

Por otra parte, hay que señalar que estas áreas interiores son las que menos concentración urbana e industrial presentan actualmente, por lo que su interés es menor.

Como resultado del estudio de subsuelo realizado, es posible seleccionar las siguientes formaciones permeables como posibles almacenes para la inyección de residuos:

- \* Areniscas del Buntsandstein: formas lenticulares de areniscas englobadas en potentes paquetes arcillosos que actuarían de formación confinante.
- \* Dolomías del Muschelkalk inferior (M1): Este nivel de carbonatos, principalmente dolomías con alguna intercalación margosa y de brechas dolomíticas.
- \* Dolomías del Muschelkalk superior (M3): Formación carbonatada, constituida por dolomías, en algunas ocasiones margosas con escasos niveles de calizas.
- \* Formaciones carbonatadas jurásicas: En todo el ciclo jurásico se presentan abundantes y muy potentes paquetes carbonatados (calizas y dolomías) que alternan con importantes niveles margosos-arcillosos.

Son especialmente destacables los niveles de carniolas del Rethiense (o Rético), las calizas y dolomías del Dogger y Malm, y dentro de este último, sobre todo las de edad Kimmeridgiense.

- \* Formaciones calcáreas del Cretácico: Tanto en el Cretácico Superior como en el Inferior (Aptense y Neocomiense, respectivamente) existen importantes formaciones permeables constituidas principalmente por calizas. En el caso del cretácico inferior, estas formaciones se encuentran generalmente confinadas por importantes paquetes margosos de gran extensión. En el primer caso (cretácico superior) el nivel calcáreo cierra el ciclo, por lo que las formaciones confinantes hay que buscarlas en los materiales arcillosos que constituyen el Terciario detrítico. Estos almacenes cretácicos se encuentran generalmente a poca profundidad, conteniendo agua escasamente salada, lo que constituye un serio inconveniente desde el punto de vista de la inyección. Están siendo explotados como recursos hídricos, tanto en la Plana de Castellón como en las áreas costeras de la mitad Norte (Planas de Vinarós-Peñíscola y Oropesa-Torreblanca). Por ello, en principio, deben ser descartados estos materiales como objetivos de una posible inyección.

En base a toda la información generada durante el proyecto se puede concluir, respecto a las posibilidades reales de constituir almacenes para eliminar residuos:

- 1) Sólo parece viable llevar a cabo operaciones de inyección de residuos en almacenes geológicos profundos asociados a áreas costeras de la provincia de Castellón.
- 2) En la mitad Sur de la provincia -Plana de Castellón-, sólo se podría pensar en inyectar residuos en las formaciones dolomíticas de los tramos inferior y superior del Muschelkalk (M1 y M3). Dentro de estas formaciones habría que seleccionar las áreas en que contengan agua salada, que serán las muy próximas a la costa, ya que a 10-15 kms. de la costa, en la zona de Betxi, existen sondeos de agua que explotan este acuífero a profundidades de 200-400 metros.

En la línea de costa se puede prever que la formación almacén se encuentre entre 650-850 metros. Se disponen de muy pocos datos sobre este almacén en profundidad. En el sondeo marino Golfo de Valencia B-1, se estimaron pérdidas de 36 m<sup>3</sup>/h a nivel del Muschelkalk, que se cortó a 1200-1250 metros. La salinidad del fluido de formación se estima en 35.000 ppm, según el estudio de las diagráfias.

- 3) En la mitad Norte de la provincia se encuentran las Planas costeras de Vinarós-Peñíscola y Oropesa-Torreblanca.

Las formaciones almacén seleccionadas se reducen a los diferentes tramos carbonatados del Jurásico, que deben encontrarse, los niveles más permeables, según los estudios y extrapolaciones realizados durante el presente estudio, a profundidades superiores a los 1700 metros:

Malm.....	1750-1920 metros
Dogger.....	2150-2200 metros
Lias.....	2600-2650 metros
Rhetiense.....	2700-2725 metros

Estas profundidades están deducidas a partir de los datos del sondeo Maestrazgo-1, así como de los perfiles sísmicos de la concesión marina Vinarós y el sondeo marino Vinaroz-1 (ver figura 49). Los tramos seleccionados presentan una elevada permeabilidad, con desarrollos cavernosos, donde se detectaron importantes pérdidas de circulación durante la perforación. La salinidad del agua contenida en todos ellos debe ser alta (superior a 20.000 ppm).

Todos los tramos están confinados por la presencia de formaciones margosas tanto en el mismo Jurásico como en el Cretácico.

A continuación se van a describir las soluciones que se proponen, caso que se estime viable la posibilidad de eliminar residuos líquidos mediante la inyección en formaciones profundas de la provincia de Castellón.

En dichas soluciones se describirán someramente las investigaciones preliminares que se recomienda realizar, así como la previsión de un posible sondeo de inyección con presupuesto estimado.

Zona Sur. Plana de Castellón.

Dentro de las áreas más costeras de la Plana de Castellón, hasta Chilches, las zonas, en principio, más favorables serían las septentrionales, entre Burriana y Castellón de la Plana, donde el almacén se encontraría más profundo.

El corte geológico previsto podría concretarse en:

EDAD GEOLOGICA	PROFUNDIDAD DEL TECHO	ESPESOR	LITOLOGIA	CARACTER HIDROGE.
PLIOCUATERNARIO TERCIARIO	0	300	Arenas, Gravas, y arcillas	P/I
CRETACICO	300	150	Calizas, margas y margocalizas	P/I
JURASICO	450	150	Calizas y dolomias	P
KEUPER	600	50	Arcillas y evaporitas	I
MUSCHELKALK	650	200	Dolomías, margas, y evaporitas	P/I

P/I: Existencia de tramos permeables e impermeables

P : Tramo mayoritariamente permeable

I : Tramo impermeable

Para un caso concreto habrá que llevar a cabo una prospección sísmica preliminar que permitiera fijar con más precisión la profundidad de las diferentes capas en las proximidades del punto o área deseada.

Una vez propuesto un modelo de inyección, con datos más precisos de profundidades que los descritos anteriormente, y antes de acometer la construcción de un sondeo de dimensiones adecuadas, se debería realizar un sondeo de reconocimiento que alcanzará el almacén en diámetros de 100-150 mm., que permita recoger testigos, así como la ejecución de pruebas de producción (test de formación -DST-), que ofreciese datos de permeabilidades.

Confirmada, pues, la profundidad del almacén (650-850 metros) se propone el siguiente programa de sondeo:

<b>PERFORACION:</b>		
Profundidad (m.)	Diámetros (mm.)	
0 - 300	650	
300 - 650	450	
650 - 850	225	

<b>ENTUBACION:</b>		
Profundidad (metros)	Diámetro exterior (mm.)	Espesor (mm.)
0 - 300	500	12
0 - 650	240	10-11

Ambas tuberías cementadas hasta superficie.

El almacén se podría dejar en open-hole (ver figura 50).

Habría que tomar testigos del almacén para los ensayos de compatibilidad con los residuos a inyectar.

Una vez finalizado el sondeo y siguiendo las normas habituales en este tipo de perforación se llevarían

a cabo operaciones de desarrollo (air-lift, acidificación, etc.) si los datos obtenidos en el primer ensayo así lo indicaran.

Por último se realizaría un ensayo de producción-inyección para estimar la capacidad del sondeo.

Se estima un coste de realización del sondeo de inyección de 105 Millones de pesetas. Este presupuesto podría verse incrementado sustancialmente si la profundidad del almacén supera los 1000 metros.

Zona Norte. Area de Vinarós-Peñíscola-Oropesa

Comprende las concentraciones urbanas próximas a la costa. Los datos disponibles (sísmica, sondeos profundos) se refieren a la zona más septentrional (Vinarós-Benicarló).

El corte geológico previsto se puede concretar en:

EDAD GEOLOGICA	PROFUNDIDAD DEL TECHO	ESPESOR	LITOLOGIA	CARACTER HIDROGE.
PLIOCUATERNARIO TERCARIO	0	500	Arenas, Gravas, y arcillas	P/I
CRETACICO	500 -	500	Calizas, margas y margocalizas	P/I
JURASICO SUPERIOR	1000	1000	Calizas, margas y margocalizas	P/I
JURASICO INF. (DOGGER+LIAS)	2000	600	Calizas y dolomias	P

P/I:Existencia de tramos permeables e impermeables  
P : Tramo mayoritariamente permeable

Dadas las profundidades a las que se encuentran los almacenes, se recomienda, siguiendo las normas establecidas, llevar a cabo un estudio preliminar de prospección sísmica, no siendo recomendable la ejecución de un sondeo de reconocimiento previo, pues este comportaría

un presupuesto muy elevado.

A la vista de los datos disponibles de los sondeos Maestrazgo-1 y Vinaroz-1, se seleccionaría como zona de inyección los paquetes cavernosos y fracturados del Malm, que de confirmarse las profundidades previstas estarían a 1700-1950 metros. Esta sería la zona más transmisiva, y por tanto, de mejores condiciones para la inyección. No obstante no habría que despreciar ora zona más alta -1480-1510 metros-de elevada permeabilidad (la perforación del propio sondeo de inyección lo indicaría).

Se propone, en principio, el siguiente programa para la ejecución del sondeo de inyección:

<b>PERFORACION:</b>		
Profundidad (m.)	Diámetros (mm.)	
0 - 400	500	
400 - 1400	325	
1400 - 1950	225	

<b>ENTUBACION:</b>		
Profundidad (metros)	Diámetro exterior (mm.)	Espesor (mm.)
0 - 400	350	12
0 - 1400	240	10

Ambas tuberías cementadas hasta la superficie. El almacén se podría dejar en open-hole.

Habría que tomar testigos del almacén para posteriores ensayos de compatibilidad con el residuo a inyectar.

A la finalización del sondeo se realizarán los mismos ensayos que en el sondeo propuesto para la zona Sur.

Se estima un presupuesto para el sondeo de inyección de 268 Millones de pesetas.

### Residuos líquidos en la provincia de Castellón

La cuantificación y caracterización de los residuos líquidos (urbanos e industriales) se ha visto dificultada por la escasez, ambigüedad y dispersión de los datos disponibles.

La necesidad de incluir en este proyecto los residuos líquidos urbanos viene condicionada por los importantes volúmenes que suponen y la marcada estacionalidad de los mismos, hechos que los convierte en un agente líquido contaminante de primera magnitud, y de efecto muy nocivo sobre las zonas costeras.

En lo que respecta a la zona Norte, que incluye, entre otros, los municipios de Vinaroz, Benicarló y Peñíscola, se estima una producción anual de residuos líquidos urbanos de  $4,08 \text{ Hm}^3$ , siendo el caudal diario en los meses de verano de  $24.400 \text{ m}^3$  y en el resto del año de  $7.000 \text{ m}^3$ . Para la zona Sur, la más densamente poblada, que incluiría las poblaciones de Benicasim, Almazora, Villareal, Burriana y Castellón de la Plana, se estima una producción anual de residuos líquidos de  $23,33 \text{ Hm}^3$ , para un caudal diario en los meses de verano de  $22.000 \text{ m}^3$ , y de  $9.700 \text{ m}^3$  durante el resto del año. En esta zona Sur parte de las aguas residuales se reutilizan, teóricamente de los  $23,33 \text{ Hm}^3$ , un volumen de  $18,73 \text{ Hm}^3$  se reutiliza, el resto  $4,6 \text{ Hm}^3$  sería susceptible de ser eliminada por inyección en estructuras profundas.

## Métodos de eliminación usuales

La información sobre el estado actual de la infraestructura para la eliminación de residuos líquidos urbanos e industriales en la costa castellonense, ha sido tomada del "ESTUDIO DE ACTUALIZACION DEL INVENTARIO DE ZONAS LITORALES DEL MEDITERRANEO ESPAÑOL MAS CONTAMINADAS (FICHAS MUNICIPALES) - AMBIO, S.A.". Pudiendo concluir los siguientes aspectos:

- \* En la zona norte la eliminación de residuos en las zonas costeras se realiza mediante emisarios submarinos en las costas correspondientes a los municipios de Benicarló y Peñíscola, mientras que en la zona de Vinaroz, existe un proyecto de emisario. Existen varios puntos en los que se vierten directamente en la costa. En lo referente a depuración de aguas residuales sólo en Benicarló existe un proyecto para la realización de una estación depuradora de tratamiento terciario.
  
- \* En la zona sur existe una mayor infraestructura para la depuración de aguas residuales, existiendo en el área de influencia de Castellón un total de 3 estaciones de depuración, y dos proyectos, uno en Burriana y otro en Almazora. La eliminación de aguas residuales se efectúa mediante vertido en cauces y emisarios submarinos, o bien mediante vertido directo en la costa.

## Tipos de industrias y localización

Las industrias existentes en el litoral castellonense susceptible de producir un residuo importante, tanto por su volumen como por su nocividad para el medio natural, pueden agruparse en los siguientes sectores:

- \* Cerámicas (18)
- \* Químicas (6)
- \* Textiles (1)
- \* Petroquímicas (1)
- \* Plásticos (2)
- \* Curtidos (2)

Siendo la industrias cerámicas las de mayor implantación, seguidas de las químicas y petroquímicas.

En el estudio de compatibilidad hubiera sido necesario un conocimiento más exhaustivo de los efluentes de estas industrias, tanto cuantitativamente como cualitativamente, en el espacio y el tiempo. Ante las dificultades que hemos encontrado para poder obtener esta información, hemos tenido que tomar datos generales y medios del INVENTARIO NACIONAL DE ACTIVIDADES INDUSTRIALES CONTAMINADORAS DE LAS AGUAS.

Ante la dificultad de conocer los efluentes de la industria química, por la complejidad de esta, se ha tenido que apartar del estudio de compatibilidad estas industrias.

#### Características de los vertidos

La caracterización de los vertidos líquidos urbanos ha sido realizada en base a la consideración de la zona norte como una zona de densidad de población media, por lo que se puede estimar que la composición media del residuo líquido urbano.

Para la zona Sur se han distinguido 2 efluentes, uno correspondiente a aguas residuales urbanas no depuradas en zonas densamente pobladas, y otro correspondiente al efluente de la estación de depuración de Castellón de la Plana.

Esta Planta de Depuración permite llegar hasta una fase terciaria.

En cuanto a los residuos industriales, se caracterizaron los residuos medios de las industrias finalmente escogidas. Recordar que estos residuos son generales, y por tanto, no responden a la realidad de las industrias realmente instaladas y en funcionamiento en esta área.

Las industrias escogidas han sido:

- \* Industria textil (Acabado de la lana)
- \* Industria Petroquímica (Planta de destilación)
- \* Industria cerámica

### Estudios de compatibilidad

#### Objetivos de los estudios de compatibilidad

Con estos estudios de compatibilidad se pretende investigar la inyectabilidad del residuo o residuos en la formación almacén, en relación a la compatibilidad, facilidad colmatante, y otras propiedades que determinen su aptitud para ser inyectados en dicha formación geológica.

En esta primera fase de evaluación de posibilidades, no se tendrán en cuenta todos los factores de inyectabilidad relacionados con el sondeo (perforación, materiales para tuberías, etc.), pues sería objeto de un proyecto particular de inyección. Nos centraremos en la evaluación y estimación de qué fenómenos acompañarían a la inyección del residuo en su interacción con la roca almacén y el fluido contenido en ella. Se hace imprescindible, por tanto, un conocimiento exhaustivo de las propiedades del residuo y del conjunto fluido-roca de la formación almacén.

Resulta muy importante la realización de estos ensayos de compatibilidad, no sólo para la estimación del movimiento del fluido, sino para la evaluación de las condiciones de productividad del sondeo de inyección, al objeto de evitar procesos que incomodarían las operaciones de inyección o incluso implicarían la no operatividad de mismo.

Por otra parte, y aunque de menor importancia, estos estudios presentan el interés de evaluar que posibles reacciones pudieran producirse entre el residuo y la roca de

cobertera, ya que, aunque se trataría de un material impermeable que ofreciese las suficientes garantías de estanquidad, podría aportar al reaccionar con el residuo algunos constituyentes nocivos a la formación almacén.

Caracterización de la formación almacén

En base a los datos ofrecidos por los sondeos de petróleo se han caracterizado los tramos almacén que, en función de todo el estudio precedente, se entiende son los niveles más interesantes como soporte de las operaciones de inyección.

Se ha diferenciado entre ZONA NORTE o AREA DE VINAROS y ZONA SUR o AREA DE LA PLANA, ya que las rocas almacén presentan características diferentes.

	Características de la roca almacén en la ZONA NORTE
Cobertera	-----> Margas
Almacén	-----> Calizas y dolomías (Jurásico) Proporción de dolomías siempre inferior al 50%
	Contenido en arcillas inferior al 15%, normalmente 5%
	Contenido en hidrocarburos 65-280 ppm
	Agua de formación: Salinidad 10.000-20.000 ppm (Cl <sup>-</sup> ) Densidad 1.01 g/cc
	Temperatura de la formación 120°F(49°C)

Características de la roca almacén en la ZONA SUR
Cobertera -----> Margas y yesos (Keuper-Muschelkalk II)
Almacén -----> Dolomías (Muschelkalk)
Contenido en arcillas inferior al 10%
Agua de formación: Salinidad 40.000-45.000 ppm (Cl <sup>-</sup> ) Densidad 1.02 g/cc
Temperatura de la formación 54°C

### Conclusiones del estudio de compatibilidad

Al haber sido elaborado este informe en base a parámetros y condiciones estimadas o supuestas. Las conclusiones que se exponen tiene, tan sólo, carácter hipotético y orientativo, por tanto, no deben se utilizadas para el diseño de un proyecto real de inyección de residuos, lo cual exigiría un estudio de detalle más profundo, en base a datos más estrictos y exactos.

Atendiendo al espíritu de este proyecto, este estudio de compatibilidad, realizado sobre los escasos datos de residuos existentes y las caracterización de las formaciones almacén anteriormente expuesta, sólo es válido tenerlo en cuenta en una estimación inicial de las posibilidades de inyección, apuntándose importantes datos que deberán ser objeto de un estudio más detallado en fases posteriores.

Las dos formaciones seleccionadas como posible almacén para el residuo inyectado son calizas y dolomías (Zona Norte) o dolomías (Zona Sur), con importantes fracturación y contenidos en arcillas menores del 10%. Estas características imponen una serie de condicionantes a los procesos de interacción con el residuo:

- \* El pH de la mezcla debe oscilar entre 6 y 8 unidades de pH, como consecuencia del efecto tampón ejercido por el

equilibrio carbonato-hidrogenocarbonato-CO<sub>2</sub>.

- \* Los mecanismos de adsorción sobre arcillas no presentarán eficacias elevadas, ya que su proporción es baja y, sobre todo, debido al hecho de que la permeabilidad sea preferentemente por fracturación y no por porosidad.
- \* La fracturación de la roca almacén permite suponer que los problemas de colmatación no van a ser graves, al menos hasta ciertos niveles acumulados de inyección.

Por otra parte dicha fracturación conlleva bajos tiempos de retención de los contaminantes solubles, que podrán desplazarse con facilidad a partir del punto de introducción, acompañando al flujo de agua.

- \* Las temperaturas reinantes en las formaciones (49°C y 52°C, respectivamente) permiten, en principio, el desarrollo de la actividad microbiológica.

#### Recomendaciones e información suplementaria

No se ha querido caer en el error, con los estudios de compatibilidad, de realizarlos por separado para cada residuo de los escogidos, ya que este trabajo, contemplado en el proyecto resulta orientativo, y no exento de especulación dada la precariedad de datos de que se ha dispuesto, al objeto de no validar lo que sería una inyección real de cualquiera de los residuos aquí estudiados bajo el pretexto de este estudio.

Se reitera la necesidad de profundizar en estos estudios previa la realización de una operación de inyección, por la importancia que estos presentan, pues sus conclusiones condicionan las estimaciones que sobre la inyectabilidad del residuos pudieran formularse.

Si se desea llevar a cabo un estudio real de inyección de residuos debe recabarse, como mínimo, los siguientes parámetros, tanto del residuo a inyectar como de la roca almacén o receptora:

Datos necesarios sobre el residuo

- Temperatura y estabilidad térmica
- Viscosidad, densidad y pH.
- Contenido en metales.
- Compuestos orgánicos y su descripción por familias.
- Presencia de detergentes o sustancias tensoactivas.
- Presencia de pesticidas y productos farmacéuticos.
- Oxígeno disuelto.
- Descripción del proceso de depuración, si ha existido.
- Sustancias radiactivas.
- Demanda de oxígeno.

Datos necesarios de la formación almacén

- Volumen total y útil de la formación.
- pH y salinidad del agua intersticial.
- Parámetros hidráulicos (permeabilidad, etc..).
- Tipos de arcillas presentes y proporción de cada una.
- Mineralizaciones.
- Aniones y cationes en disolución.

A parte de los estudios de compatibilidad ligados a reacciones fisicoquímicas que pudieran producirse al introducir un agente extraño en un medio estable, existen una serie de problemas que influyen en sobremanera en la inyectabilidad del residuo, y que habrá que tener muy en cuenta en un futuro proyecto de inyección, que están relacionados con la perforación del sondeo y el desarrollo de la operación, de manera que se prevean todas las posibles causas de mal funcionamiento y puedan ser adoptadas métodos de construcción que garanticen que la formación no va a ser dañada.

**ESTUDIO DE LAS POSIBILIDADES DE UTILIZACION  
DE FORMACIONES GEOLOGICAS PROFUNDAS PARA  
LA ELIMINACION DE RESIDUOS LIQUIDOS EN LA  
PROVINCIA DE CASTELLON DE LA PLANA**

## INDICE GENERAL

	Pág
1. PRESENTACION.....	7
2. INTRODUCCION.....	8
2.1 Objetivos del Proyecto.....	8
2.2 Trabajos realizados.....	9
2.3 Equipo de trabajo .....	9
3. GEOLOGIA REGIONAL.....	10
3.1 Geología de la provincia de Castellón de la Plana...	10
3.2 Descripción de las unidades geológicas que constituyen los modelos de inyección.....	44
3.3 Sistemas y subsistemas hidrogeológicos. Calidad de las aguas subterráneas.....	50
4. REVISION DETALLADA DE LOS SONDEOS PROFUNDOS DE INVESTIGACION PETROLERA.....	57
4.1 Sumario de sondeos en la zona de estudio.....	57
4.1.1 Localización.....	57
4.1.2 Fechas.....	58
4.1.3 Profundidades.....	59
4.1.4 Objetivos del sondeo.....	59
4.1.5 Sondeos seleccionados para una revisión detallada. Razones de esta selección.....	60
4.2 Resultados de la revisión de los sondeos.....	61
4.2.1 Sondeos terrestres.....	61
4.2.1.1 Mirambell-1.....	61
a. Descripción de los modelos de inyección buscados.....	61
b. Estratigrafía.....	62
c. Estructura geológica.....	65
d. Diagrafías y pruebas bases del estudio...	66
e. Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	66
f. Estudio de posibilidades.....	68
g. Informe final del sondeo.....	69
4.2.1.2 Bobalar-1.....	73
a. Descripción del modelo de inyección buscado.....	73
b. Estratigrafía.....	73
c. Estructura geológica.....	75
d. Diagrafías y pruebas bases del estudio...	77
e. Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	77

f.	Estudio de posibilidades.....	79
g.	Informe final del sondeo.....	79
4.2.1.3	Bobalar-2.....	73
a.	Descripción del modelo de inyección buscado.....	73
b.	Estratigrafía.....	73
c.	Estructura geológica.....	75
d.	Diagrafías y pruebas bases del estudio...	77
e.	Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	77
f.	Estudio de posibilidades.....	79
g.	Informe final del sondeo.....	79
4.2.1.4	Salsadella-1.....	83
a.	Descripción de los modelos de inyección buscados.....	83
b.	Estratigrafía.....	85
c.	Estructura geológica.....	87
d.	Diagrafías y pruebas bases del estudio...	87
e.	Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	88
f.	Estudio de posibilidades.....	90
g.	Informe final del sondeo.....	91
4.2.1.5	Maestrazgo-1.....	93
a.	Descripción del modelo de inyección buscado.....	93
b.	Estratigrafía.....	93
c.	Estructura geológica.....	93
d.	Diagrafías y pruebas bases del estudio...	96
e.	Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	96
f.	Estudio de posibilidades.....	98
g.	Informe final del sondeo.....	101
4.2.2	Sondeos marinos.....	103
4.2.2.1	Vinaroz-1.....	103
a.	Estratigrafía.....	103
b.	Diagrafía y pruebas base del estudio.....	105
c.	Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	105
d.	Informe final del sondeo.....	108
4.2.2.2	Vinaroz-2.....	108
a.	Estratigrafía.....	108
b.	Diagrafía y pruebas base del estudio.....	108

c.	Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	110
d.	Informe final del sondeo.....	110
4.2.2.3	Golfo de Valencia B-1.....	111
a.	Estratigrafía.....	111
b.	Diagrafía y pruebas base del estudio.....	114
c.	Resultados de la interpretación de las diagrafías.....	114
d.	Informe final del sondeo.....	116
4.3	Conclusiones de la revisión del conjunto de sondeos.	118
5.	ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS.....	120
5.1	Reinterpretación de sismica terrestre y marina.....	120
5.1.1	Concesión San Mateo.....	120
5.1.2	Concesión Vinarós.....	123
5.1.3	Concesión Golfo Valencia-B.....	127
5.2	Correlaciones.....	132
5.3	ESTUDIO DE DETALLE EN LA ZONA NORTE DE LA PROVINCIA (área de Vinarós).....	136
6.	RESUMEN DEL ESTUDIO DEL SUBSUELO. SELECCION DE AREAS CON POSIBILIDADES. SOLUCIONES PROPUESTAS.....	150
6.1	Introducción.....	150
6.2	Selección de almacenes.....	150
6.3	Conclusiones.....	152
6.4	Propuesta de soluciones.....	153
6.4.1	Zona Sur. Plana de Castellón.....	154
6.4.2	Zona Norte. Area de Vinarós-Peñíscola-Oropesa.	159
7.	RESIDUOS LIQUIDOS EN LA PROVINCIA DE CASTELLON.....	164
7.1	Residuos líquidos urbanos.....	164
7.1.1	Estimación de volúmenes a inyectar.....	164
7.1.2	Métodos de eliminación usuales.....	168
7.1.3	Característica de los vertidos.....	171
7.2	Residuos líquidos industriales.....	175
7.2.1	Tipos de industrias y localización.....	175
7.2.2	Métodos de eliminación usuales.....	177
7.2.3	Característica de los vertidos.....	177

8.	ESTUDIOS DE COMPATIBILIDAD DE LOS RESIDUOS CON LAS ROCAS ALMACEN.....	179
8.1	Objetivos de los estudios de compatibilidad.....	179
8.2	Caracterización de la formación almacén.....	180
8.3	Análisis de las reacciones.....	181
8.4	Recomendaciones e información suplementaria.....	186
9.	MODELIZACION DE LA INYECCION.....	187
10.	CONCLUSIONES.....	192
10.1	Sumario de datos obtenidos de la revisión de la geología del subsuelo.....	192
10.2	Conclusiones de los estudios de compatibilidad....	196

## 1. PRESENTACION

La línea de investigación en la que se inscribe el presente provecho se inició en el año 1987. Dentro del estudio titulado "Proyecto para estudios especiales de desarrollo tecnológico en la lucha contra la contaminación de acuíferos" se encontraba el "Proyecto para el análisis de posibilidades y metodología de uso de las estructuras geológicas subterráneas".

En este estudio se trataba de poner al día los conocimientos sobre estas técnicas de gestión de residuos líquidos que tan buenos resultados están dando en otros países más desarrollados, en particular en U.S.A. También era objetivo del trabajo seleccionar áreas de España que reunieran buenas características para efectuar la inyección y la existencia de problemas de gestión de aguas residuales.

Una vez finalizado se inició esta 2ª fase en la que se efectúa el estudio, con mayor detalle, de las formaciones favorables en áreas determinadas, correspondiendo el presente proyecto a la provincia de Castellón de la Plana.

Realizado por el ITGE en colaboración con la Consellería de Industria, Comercio y Turismo de la Generalitat Valenciana, pretende ofrecer a los gestores y posibles usuarios una alternativa más para resolver los problemas que los residuos líquidos presentan.

## **2. INTRODUCCION**

Hoy día, toda política de desarrollo industrial va acompañada y complementada por una política ambiental, con la finalidad de alcanzar el beneficio óptimo en un punto de equilibrio entre desarrollo y protección del medio ambiente.

La búsqueda de soluciones para minimizar tal impacto ha dado lugar a un gran desarrollo de procesos de reciclado y tratamiento de residuos. No obstante, siempre queda un último residuo o subproducto que ya no puede ser tratado y que es preciso eliminar. El sistema ideal para ello, sería aquél que aceptara un volumen ilimitado de residuo y lo contuviera siempre fuera del ámbito de actividad del hombre.

El antiguo concepto de diluir y dispersar, que regía la eliminación de residuos en corrientes de agua superficial, ha quedado completamente obsoleto ante el aumento de las cantidades de residuo que es preciso eliminar.

Un sistema que se podría aproximar a la definición de ideal expuesta anteriormente, sería el almacenamiento controlado en formaciones permeables profundas.

Con este proyecto se intenta, por tanto, dar una solución para la resolución del difícil problema de la gestión de residuos líquidos.

### **2.1 Objetivos del Proyecto**

Los objetivos que se pretenden conseguir con este proyecto son los siguientes:

- \* Estudio detallado de las formaciones permeables aptas para la inyección.
- \* Selección de las zonas más propicias desde el punto de vista geológico.
- \* Caracterización de los residuos generados en el área, desde el punto de vista de su inyección en el subsuelo.
- \* Análisis de compatibilidad con el tipo de fluido de la formación almacén.
- \* Estudio de viabilidad técnica y económica para llevar a cabo la operación.
- \* Elaboración, a nivel de anteproyecto, de un programa de actuación concreta a realizar así como de las instalaciones necesarias para su puesta en marcha.

## 2.2 Trabajos realizados

Durante la realización del presente proyecto se han desarrollado los siguientes trabajos:

- Estudio estratigráfico-tectónico de las áreas de investigación, elaboración de los "modelos a priori".
- Estudio hidrogeológico de los acuíferos explotados de la zona. Evaluación de acuíferos a proteger.
- Estudio de los sondeos de petróleo, con reinterpretación de diagráfias (logs) y ensayos, al objeto de caracterizar almacenes y coberteras.
- Reinterpretación de perfiles sísmicos, para elaborar cortes geológicos y trazar correlaciones entre sondeos.
- Evaluación de residuos urbanos e industriales en la provincia de Castellón (volúmenes y características).
- Estudios de compatibilidad del residuo con la roca almacén y el fluido intersticial.
- Elaboración de un anteproyecto, con diseño del pozo de inyección y estimación de costes.

## 2.3 Equipo de trabajo

El presente proyecto ha sido realizado por el Servicio de Desarrollo Tecnológico de la Dirección de Aguas Subterráneas y Geología Ambiental, bajo la supervisión de D. Juan Antonio López Geta, por el siguiente equipo de trabajo:

- D. Gerardo Ramos González, Ingeniero de Minas. Jefe de los Proyectos de Inyección. ITGE.
- D. Alberto Escalada Gil, Direcció General d'Industria i Energia (Conselleria d'Industria, Comerc i Turisme de la Generalitat Valenciana).
- D. Juan Antonio Navarro, Ingeniero de Minas. ESTRAIN, S.A.
- D. Angel Ramirez Palacín, Ingeniero de Minas. ESTRAIN, S.A.
- D. José Sánchez Guzmán. Ingeniero de Minas.
- D. Eduardo de Miguel, Ingeniero de Minas.

### 3. GEOLOGIA REGIONAL

#### 3.1 Geología de la provincia de Castellón

Para el objetivo del presente proyecto, se va a dividir la provincia de Castellón en dos áreas geológicamente bien diferenciadas, que serán sobre las que se centre todo el estudio realizado.

Estas dos zonas corresponden a:

- \* Zona norte de la provincia, englobada en la macrounidad del Maestrazgo, y que se denominará AREA DE VINAROS en el resto de informe.
- \* Zona sur de la provincia, que corresponde a las unidades de la Plana de Castellón y Sierra del Espadán, y que se denominará AREA DE LA PLANA en el resto del informe.

Como bibliografía básica se han tomado los documentos que acompañan a las Hojas Geológicas 1:200.000 de Vinarós y Valencia, editadas por el ITGE.

El objetivo de este apartado de geología general es resumir toda la información aportada por estos documentos, centrarlo en las áreas de interés y poner de manifiesto las características geológicas de los materiales que se verían involucrados en el estudio del subsuelo.

Para el lector no familiarizado con los nombres que reciben los distintos pisos geocronológicos, en la figura 1 se presenta un cuadro relacionado con la cronología del Mesozoico, y en la figura 2 un cuadro relacionado con la cronología del Cenozoico.

Millones de años		<u>M E S O Z O I C O</u>					
70	CRETACICO	SUPERIOR	Maastrichtsiense	Senonense			
			Campaniense				
			Santoniense				
			Coniaciense				
			Turoniense				
			Cenomaniense				
		INFERIOR	Albiense				
			Aptiense	Classaysiense			
				Gargasense			
				Bedouliense			
			Barremiense	Neocomiense			
			Hauteriviense				
			Valangiense				
			Berriasiense				
130	JURASICO	MALM	Portlandiense				
			Kimmeridgiense				
			Oxfordiense				
		DOGGER	Calloviense				
			Bathonense				
			Bajociense				
			Aalenense				
		LIAS	Toarciense				
			Pliensbachiense				
			Sinemuriense				
			Hettangiense				
		180	TRIASICO	G E R M A N I E N S I C A	Keuper	Rethiense	F A L C I P I E N S A
						Noriense	
						Carniense	
Muschelkalk							
Buntsandstein							
230							

FIGURA 1, Cronología del Mesozoico

Millones de años		CENOZOICO			
0	CUATERNARIO	Holoceno (Reciente)			
		PLEISTOCENO	Flandriense		
			Neotirreniense		
			Eotirreniense		
			Siciliense		
			Villafranquiense		
1			TERCIARIO	NEOGENO	PLIOCENO
10	MIOCENO	S U P.			Messiniense=Andaluc. Tortoniense
		MEDIO = Helvetiense			
	I N F.	Burdigaliense			
		Aquitaniense			
25	PALEOGENO	OLIGOCENO		Chattiense	
				Stampiense	
				Sannoisiense	
40		EOCENO		SUPERIOR = Priaboniense	
				M E D.	Biarritziense
			Luteciense		
			I N F.	Cuisiense	
				Ilerdiense	
60		PALEOCENO	Thanetiense=Landen.		
			Montiense		
	Daniense				
70					
	División del mioceno continental	N E O G E N O	M I O C E N O	Superior	Pontiense Vindoboniense Sup.
			Medio		Vindoboniense Inf.
			Superior		Burdigaliense Aquitaniense

FIGURA 2, Cronología del Cenozoico

## AREA DE VINAROS

Esta zona se encuentra ubicada en la intersección de dos unidades morfoestructurales de entidad geológica reconocida: la cordillera Ibérica y la cordillera Costero-Catalana.

En este área el Mesozoico aparece muy bien representado, mientras que el Paleozoico apenas aflora.

El Cretácico se encuentra ampliamente desarrollado tanto en facies carbonatadas como detríticas, con predominio de las primeras. Sobre estos materiales y generalmente a modo de relleno de fosas, cubetas y/o depresiones aparecen potentes series detríticas de origen continental. Los depósitos cuaternarios, de gran representatividad cartográfica terminan de configurar la geología de la región, destacando tanto los del litoral mediterráneo como los del interior (ramblas, etc.).

Estructuralmente cabe destacar dos direcciones principales: una general NE-SW y otra NW-SE que corresponden a las alineaciones de las unidades a las que se ha hecho referencia. La interferencia de ambas motiva una importante e intensa fracturación en la parte más oriental que destaca de una zona subtabular noroccidental. En la zona más meridional el Triásico aflora con un carácter no extrusivo, según una alineación NW-SE.

### Estratigrafía

En líneas generales se puede sintetizar la serie completa de materiales geológicos en esta zona en la forma siguiente:

#### \* Paleozoico

Los escasos afloramientos que aparecen en esta zona presentan facies Culm.

La mala calidad de los afloramientos y la intensa fracturación que presentan han impedido establecer una sucesión estratigráfica. No obstante, pueden observarse tramos con facies diferentes:

\*Tramos de areniscas compactas, a veces con aspecto de grauwackas.

\*Tramos de pizarras y areniscas.

#### \* Triásico

Hasta la fecha los afloramientos triásicos de esta área no han sido objeto de estudios detallados y aunque nadie

discute su litofacies germánica, la atribución cronoestratigráfica de la trilogía Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper, así como la subdivisión litoestratigráfica del Muschelkalk, presentan todavía algunos problemas.

\* **Buntsandstein**

El Buntsandstein sólo aflora en zonas muy reducidas, estando integrado, de base a techo, por las siguientes unidades:

- \* Areniscas y lutitas del Desierto de las Palmas (220 m.)
- \* Areniscas de Villafamés (160 m.)
- \* Complejo lutítico-carbonatado superior (10-20 m.)

Las areniscas y lutitas del Desierto de las Palmas están fundamentalmente integradas por una alternancia de areniscas y lutitas rojas. Las areniscas de grano fino a medio y ocasionalmente de grano muy grueso, constituyen niveles lenticulares de base erosiva, mostrando, en ocasiones, una ligera tendencia granodecreciente de base a techo.

Las lutitas intercaladas entre las areniscas, más o menos arenosas y micáceas, muestran abundantes evidencias de bioturbación.

En conjunto, la unidad parece estar formada por depósitos relativamente distales de corrientes de alta energía, muy efímeras.

Las areniscas de Villafamés están integradas por areniscas de colores pardo-rojizos y en ocasiones blancos, que comprende dos asociaciones de facies:

- \* **Asociación A:**  
Caracterizada por la superposición erosiva de cuerpos tabulares o lenticulares de areniscas, de 1 a 2 metros de espesor.

La asociación descrita constituye tramos de 5 a 25 metros de potencia. Las paleocorrientes dominantes son hacia el SW-SSW.

- \* **Asociación B:**  
Se intercala entre la anterior, constituyendo tramos de 0,5 a 2,5 metros de espesor. Esta exclusivamente formada por areniscas caracterizadas por una laminación horizontal dominante.

El complejo lutítico-carbonatado superior, por lo general muy cubierto, constituye una unidad de tránsito al Muschelkalk. A grandes rasgos está formado por lutitas y limonitas de color rojo a gris verdoso, las cuales intercalan algunos pequeños niveles de areniscas de grano fino a muy fino y de dolomías ferruginosas de colores ocres, estas últimas más abundantes hacia el techo.

\* **Muschelkalk**

La potencia del Muschelkalk se sitúa alrededor de los 250 m. Básicamente está constituido por un paquete calcáreo, en gran parte dolomítico, con una intercalación de margas y arcillas rojas y yesos. El límite inferior viene marcado por el complejo lutítico-carbonatado del Buntsandstein. El límite superior viene representado por un cambio brusco litológico y sedimentológico entre estos últimos niveles y la facies Keuper.

Las principales facies carbonatadas del Muschelkalk son: lutitas ocres, mudstones<sup>1</sup> grises en general bioturbados, mudstones-wackestones finamente laminados, dolomías margosas y wackestones-packestones con restos de fauna.

Globalmente, los materiales del Muschelkalk se interpretan como sedimentos de una plataforma-rampa carbonatada muy somera.

---

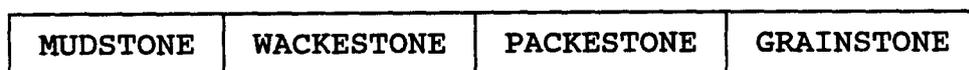
<sup>1</sup> Los términos: **MUDSTONE-WACKESTONE-PACKSTONE-GRAINSTONE**, corresponden a la clasificación de DUNHAM (1962) para rocas carbonatadas, de forma que cada término alude a:

**MUDSTONE:** rocas carbonatadas con menos del 10% de granos, correspondiendo el resto a una matriz de lodo carbonatado. Equivale a una micrítica-lutita.

**WACKESTONE:** rocas carbonatadas con menos del 10% de granos de tamaño superior a 20 micras y que están en el seno de una matriz de lodo calcáreo, no llegando a estar los granos unos en contacto con otros.

**PACKSTONE:** rocas carbonatadas constituidas por granos y matriz de lodo carbonatado. Los granos están en contacto unos con otros.

**GRAINSTONE:** rocas carbonatadas constituidas fundamentalmente por granos y con ausencia de lodo carbonatado.



→  
Aumenta la energía del medio de deposición

←  
Aumenta el carácter micrítico

\* **Keuper**

En toda el área de la provincia de Castellón las unidades litoestratigráficas reconocidas no varían sustancialmente, pudiendo agruparse en tres series litológicas:

- \* Serie evaporítica inferior (unidad K1)
- \* Serie detrítica intermedia (unidades K2 y K3).
- \* Serie evaporítica superior (unidades K4 y K5).

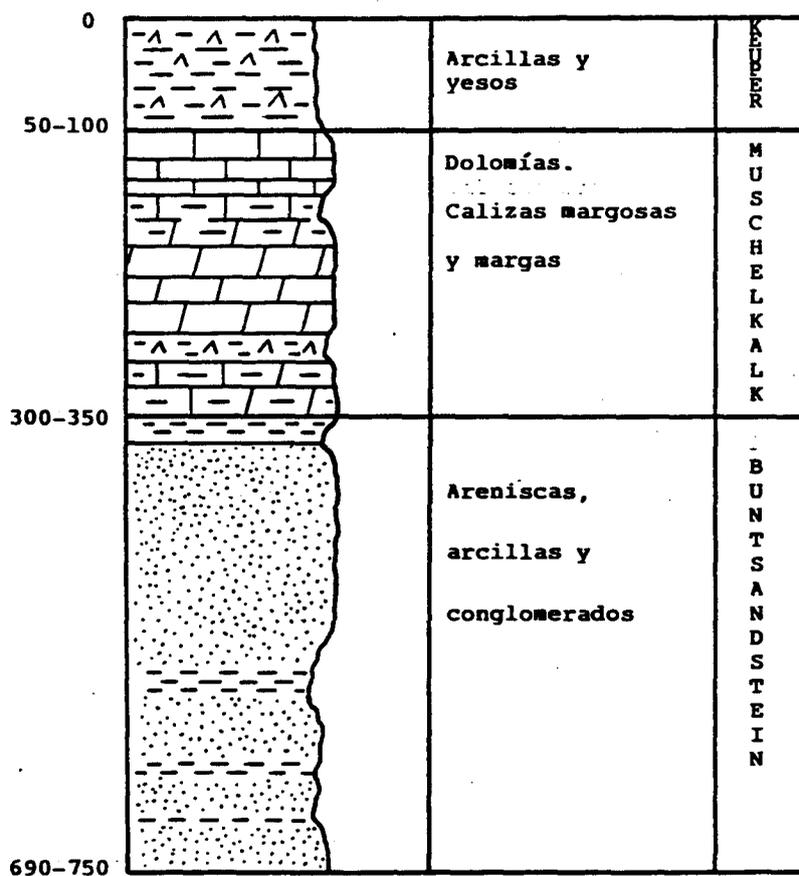
De estas tres unidades la más fácilmente reconocible en el AREA DE VINAROS es la evaporítica inferior, que además es la más potente.

Las unidades citadas anteriormente quedan englobadas en dos secuencias deposicionales:

- **secuencia basal**, constituye la secuencia del Muschelkalk superior-Keuper inferior.
- **secuencia terminal**, constituye la secuencia del Keuper medio-superior (Formación Imón).

Z O N A   N O R T E

T R I A S I C O



**Columna litológica para el Triásico en la zona norte de la provincia de Castellón**

## \* Jurásico

El límite inferior de esta megasecuencia ha sido establecido en la disconformidad que separa las dolomías de la Formación Imón (Rético) de las brechas liásicas. El límite superior corresponde a una superficie kárstica sobre la que yacen depósitos bauxíticos.

Dentro de este superciclo jurásico se reconocen dos discontinuidades formadas por oolitos ferruginosos, que corresponden a periodos no deposicionales, desarrollados en ambientes de plataforma externa en tránsito a una cuenca más profunda, durante los cuales tienen lugar fenómenos de ferruginización, fosfatización, glauconotización y condensación de fauna. Debido a la presencia de estos oolitos ferruginosos ha sido posible dividir el superciclo en tres secuencias deposicionales: secuencia del Lías, secuencia del Dogger y secuencia del Malm-Cretácico inferior.

### \* Secuencia del Lías

Han sido reconocidas tres secuencias deposicionales:

- Constituida por la formación Cortes de Tajuña (brechas calcareodolomíticas con slumps y olistolitos, dolomías vacuolares o carniolas) en la base de la secuencia, y por la formación Cuevas Labradas a techo (dolomías laminadas con estromatolitos, grietas de desecación, superficies kársticas; calizas oolíticas y bioclásticas, mudstones micríticos, wackestones-packestones de bivalvos y gasterópodos con intercalaciones de grainstones encriníticos)
- Secuencia asimétrica constituida por la Formación Cerro del Pez (alternancia de calizas y margas) en la base, y la Formación Barahona a techo (grainstones-packestones bioclásticos)
- Es como la anterior, una secuencia asimétrica constituida en su base por arcillas y margas verdes y grises de la Formación Turmiel y a techo por calizas finamente bioclásticas.

### \* Secuencia del Dogger

Presenta una gran variedad de facies correspondientes a ambientes muy diversos. Está constituida por dolomías, calizas oolíticas y bioclásticas, biomicritas de ammonites e incluso

margas y arcillas verde-azules, según las zonas.

\* **Secuencia del Malm**

Esta secuencia se inicia con depósito de aguas profundas para evolucionar a depósitos de aguas someras y agitadas correspondientes a la regresión generalizada que tiene lugar en la Cordillera Ibérica a partir del Kimmeridgiense superior-Portlandiense.

Durante el Kimmeridgiense superior se reconoce en la región considerada una formación constituida por calizas bioclásticas, oolíticas, oncolíticas y arrecifales que corresponden a ambientes de plataforma externa somera y agitada pasando lateralmente a los complejos detríticos marginales. A partir del Portlandiense en el Maestrazgo se depositan calizas de aguas someras con abundantes Characeas y Dasycladaceas.

Dentro de esta secuencia, que es, por otra parte, la que está mejor representada en esta área, se llegan a cartografiar dos unidades, que de base a techo son:

- calizas micríticas, margas y calcarenitas
- dolomías negras

Asociadas a las secuencias del Dogger y Malm se producen dolomitizaciones importantes que afectan a grandes espesores del material sedimentado, lateralmente en una distancia muy corta puede llegar a desaparecer por completo, siendo posible determinar la naturaleza del material original.

A pesar de ser muy importantes las dolomitizaciones, en todo el área del Maestrazgo, la serie del Malm no se encuentra tan dolomitizada.

Intercaladas entre las dolomías negras que forman la mayor parte de la unidad, se reconocen niveles dolomíticos rojos y amarillentos asociados a arcillas rojizas, de importancia muy variable.

Al microscopio se han reconocido las siguientes texturas dolomíticas:

- mosaicos equigranulares de cristales euhedrales internamente zonados, oscilan entre 600 y 1200 micras de diámetro. Se presentan asociadas a esta fábrica zonas de cristales anhedrales limpios con "parches" de microesparita con abundantes impurezas.

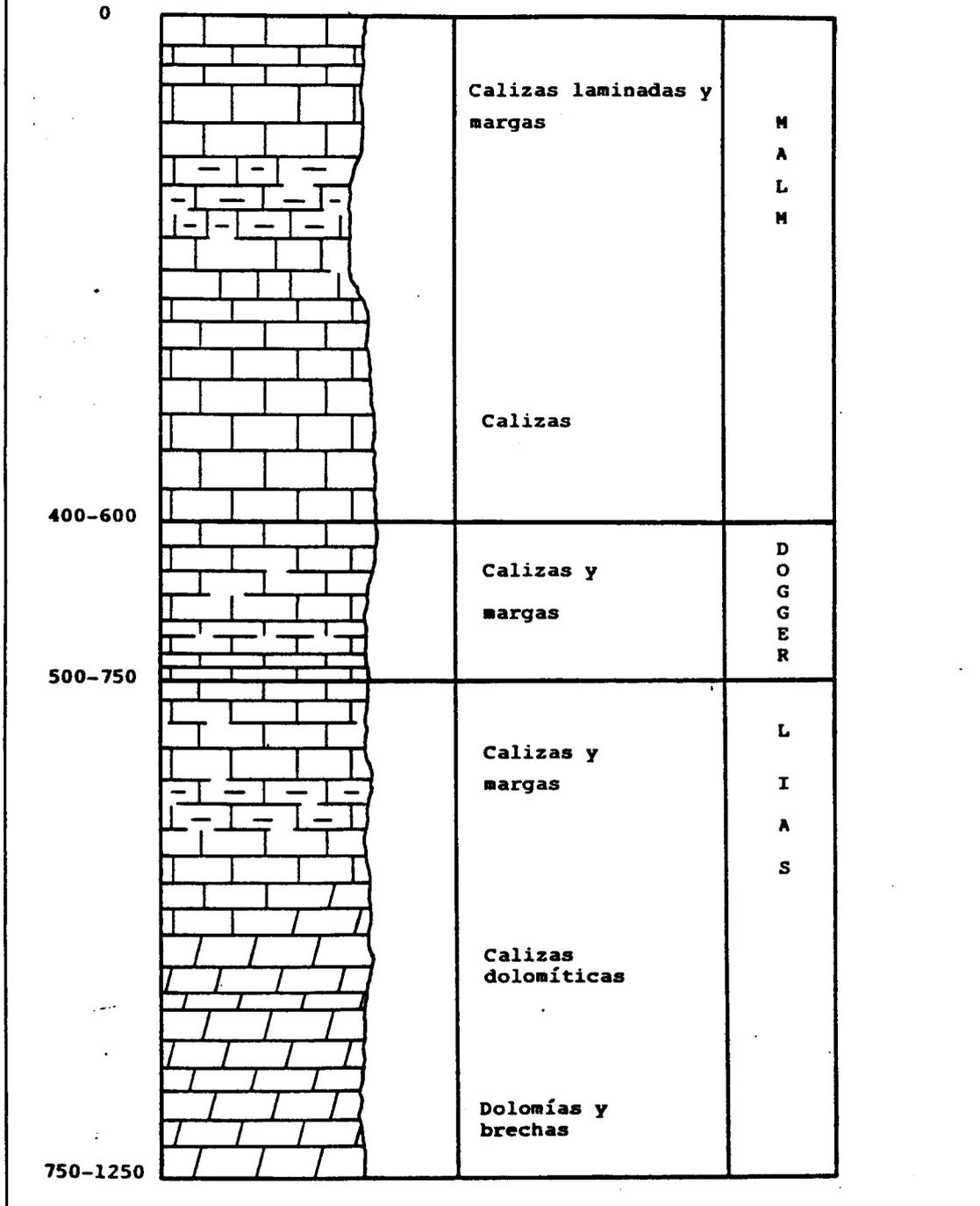
- mosaicos de cristales anhedrales-subhedrales de 100 a 150 micras de diámetro.
- dolomías finamente cristalinas. Constituidas por una alternancia de láminas de cristales de 8 a 40 micras con otras de cristales de mayor tamaño 5-10 micras.

El estudio de las texturas deposicionales predolomíticas revelan un diferente comportamiento en el momento de dolomitizarse. La mayor parte de las dolomías en el Dominio del Maestrazgo corresponden a las calizas bioclásticas del Kimmeridgiense superior mientras que las que no presentan texturas identificables corresponden a las micritas del Oxfordiense-Kimmeridgiense.

En cierto sentido puede hablarse de las dolomías aquí descritas como dolomías "secundarias", al haberse originado en etapas diagenéticas tardías sin ninguna relación con el ambiente deposicional de los sedimentos afectados por la dolomitización.

Z O N A N O R T E

J U R A S I C O



Columna litológica para el Jurásico en la zona norte de la provincia de Castellón

## \* Cretácico

### \* Cretácico Inferior

Está integrado, fundamentalmente, por carbonatos de aguas someras.

El registro potente (hasta 3.000 metros) se encuentra en el área de Salsadella-San Mateo-La Jana-Traiguera. En todos los casos la distribución de facies y potencias está controlada por antiguas alineaciones estructurales del zócalo (NW-SE y NE-SW).

La sedimentación cretácica, desde el Berriasiense al Albiense medio (base de la Formación Utrillas), se desarrolla en dos grandes ciclos sedimentarios distintos. El Berriasiense y el Valanginiense pp. representarían el final del gran ciclo sedimentario del Jurásico. Este quedaría registrado en forma de una unidad estratigráfica de orden mayor o supersecuencia deposicional del Jurásico.

El gran ciclo sedimentario del Cretácico inferior pp. se iniciaría en el Valanginiense terminal-Hauteriviense y terminaría en el Albiense medio, en la base de la Formación Utrillas (no presente en ninguno de los sondeos de investigación petrolera estudiados durante el desarrollo de este proyecto).

Los materiales berriasienses se hallan íntimamente relacionados con el ciclo sedimentario menor que corresponde a la secuencia deposicional Kimmeridgiense pp.-Berriasiense.

La serie cretácica inferior ocupa la parte central y oriental de la cuenca del Maestrazgo.

El registro Valanginiense constituye un ciclo claramente regresivo, estando formados los materiales por calcarenitas, calizas, calizas y margas y areniscas.

El Valanginiense es difícil de cartografiar, por lo que usualmente se incluye en una unidad cartográfica que comprendería el lapso Portlandiense-Valanginiense.

### \* Hauteriviense-Barremiense

Con el Hauteriviense comienza el ciclo sedimentario del Cretácico inferior. Se pueden

distinguir entre los materiales depositados en este intervalo dos grandes grupos de unidades de facies:

- Unidades de facies basales, constituidas por margas y calizas, areniscas, calcarenitas y calizas y arcillas lateríticas.
- Unidades de facies superiores, constituidas por margas y calizas.

**\*Gargasiense-Clasayesiense**

Se divide en dos unidades de orden menor: Unidad margas del Forcall y unidad calizas de Villaroya de los Pinares, es ampliamente transgresiva y se encuentra representada en toda el área de estudio.

**\*Aptiense**

Se trata de un nivel de calizas y margas.

**\*Clasayesiense PP.-Albiense inferior**

Se encuentra bien desarrollada en el sector oriental de la cuenca del Maestrazgo, disminuyendo su potencia hacia el Sur y el Norte. Han sido distinguidas dos unidades: Calizas de Benassal y Calcarenitas de la Iglesiasuela.

**\* Cretácico superior**

**\*Albiense superior-Cenomaniense**

Se trata esta unidad de un conjunto de calizas bioclásticas y a veces oolíticas en bancos métricos alternando con margas y margocalizas muy frecuentemente con lumaguellas de ostreidos. El espesor, muy variable, oscila entre más de 50 - 250 metros.

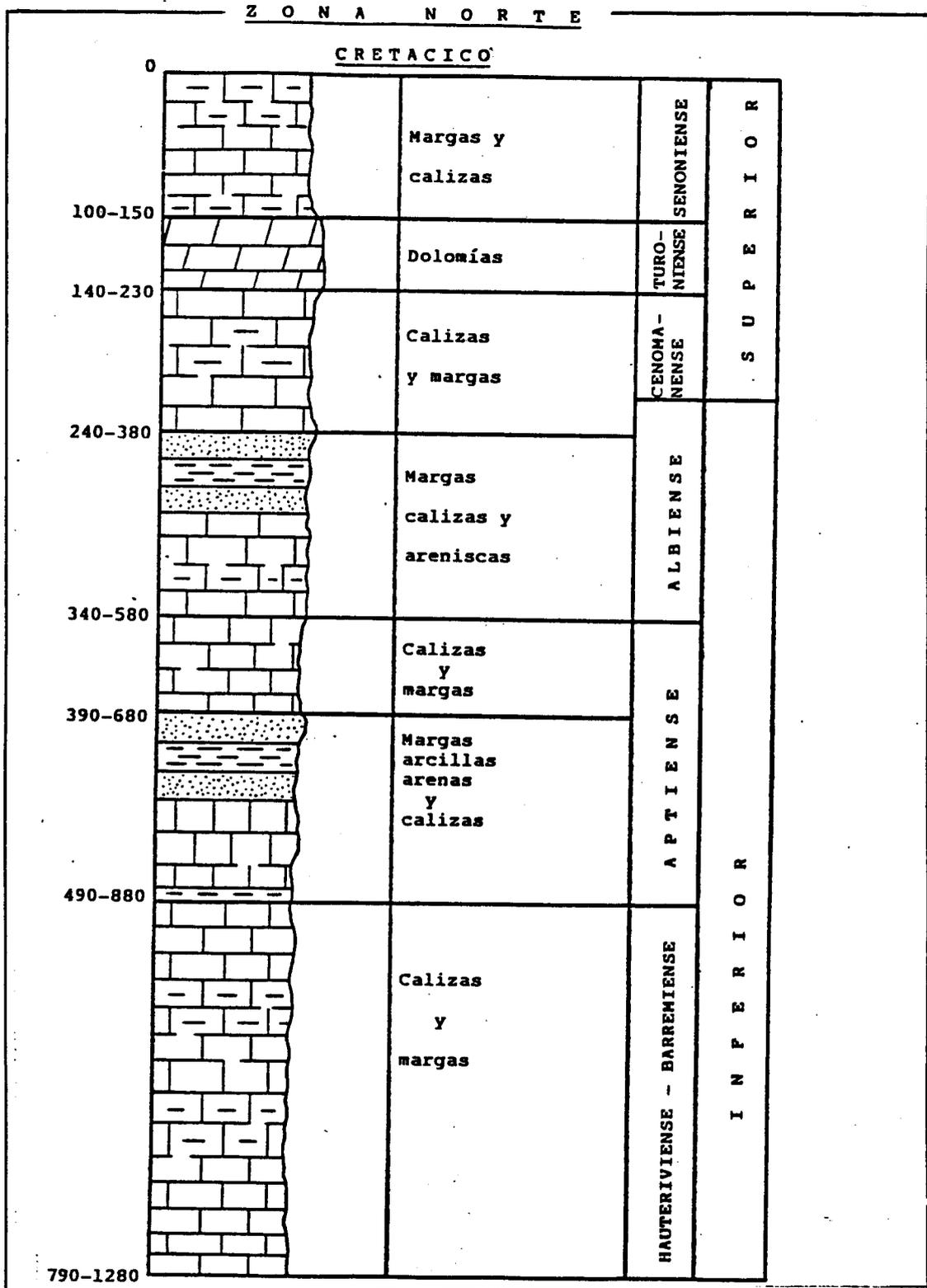
**\*Turoniense**

Se trata de unas dolomías blancas o amarillentas, de grano fino, a veces rojizas y sacaroideas con rudistas. El espesor oscila entre los 40 y 80 metros.

**\* Senoniense**

El final del ciclo Cretácico superior está formado por una alternancia de margas blancas y calizas muy frecuentemente brechoides o con cantos negros cuyo espesor es muy variable y que en muchas ocasiones están erosionadas por los sedimentos terciarios.

El medio de deposición inicialmente marino de plataforma pasa a ser de ambiente salobre, para acabar en un sistema de lagunas no conectadas entre sí.



**Columna litológica para el Cretácico en la zona norte de la provincia de Castellón**

### \* Terciario

Los materiales terciarios presentes en el AREA DE VINAROS pueden agruparse en dos conjuntos. El primero, que abarca a los niveles paleógenos, integrados por niveles detríticos y los niveles lutíticos-carbonatados de Rosell. El segundo integra los materiales neógenos, que aparecen ligados al sistema de fosas mediterráneas situadas en el Maestrazgo oriental y meridional.

### \* Paleógeno

Los materiales atribuibles al Paleógeno se integran en tres unidades:

- calizas y margas de Rosell (Eoceno).
- conglomerados, areniscas y lutitas de Olocau-Bordón (Eoceno superior-Oligoceno medio).
- conglomerados (Oligoceno superior-Mioceno inferior).

### \* Neógeno

Los materiales neógenos se distribuyen en tres zonas principales de afloramiento: una situada en la zona oriental del Maestrazgo (fosas del Maestrazgo oriental), y las otras dos, en la zona meridional del mismo. En el área de estudio sólo aparecen materiales neógenos relacionados con las fosas del Maestrazgo oriental, donde destaca la existencia de una serie de depresiones de orientación NNE-SSW.

Los materiales terciarios, principalmente conglomerados, lutitas y calizas, se localizan ya sea en el fondo de estas depresiones o bien, a veces, en los bloques levantados. Diferenciándose en estas fosas dos unidades: una fundamentalmente constituida por conglomerados, areniscas y lutitas de Mioceno inferior, y otra constituida por calizas, margas y lutitas, también pertenecientes al Mioceno inferior.

### \* Cuaternario

El Cuaternario está fundamentalmente constituido por tres tipos de depósitos de origen bien diferenciado: los depósitos continentales que son los que ocupan una mayor amplitud y son más numerosos, abarcando gran parte de la llanura litoral. El segundo tipo corresponde a los de origen marino, muy escasos y relegados a la línea de costa. Y por último, un tercer tipo de carácter mixto.

## Tectónica

En la zona de estudio el conjunto de la Cordillera Ibérica y la Cordillera Costero-Catalana constituye, de hecho, una sola unidad, por su similitud durante la sedimentación, como durante las deformaciones alpinas. Su estructura actual es el resultado de la superposición de procesos compresivos fundamentalmente de edad paleógena y, posteriormente, distensivos -de edad neógena-.

En este conjunto se distinguen dos direcciones estructurales claramente delimitadas en el espacio. En la Cordillera Costero-Catalana domina la dirección NE-SW, mientras que en la Cordillera Ibérica es la dirección NW-SE la más notoria; ambas están ligadas a grandes fallas de zócalo de igual orientación, claramente visibles cuando este aflora, las cuales han actuado, durante la deformación compresiva, con movimientos siniestro a siniestro-inverso e inversodextro respectivamente.

Estas dos direcciones de accidentes del zócalo han tenido una gran importancia en la distribución paleogeográfica del Mesozoico, siendo, por tanto, accidentes anteriores a la deformación alpina las que determinaron la estructura tanto del zócalo hercínico como de la cobertera mesozoica suprayacente, la cual se independizó parcialmente del zócalo gracias a un nivel de despegue localizado en el Trias medio y superior (Keuper). Posteriormente a la compresión, se produjo una distensión en la que se formaron fosas que se rellenaron de materiales neógenos. Su orientación y localización estuvo en gran parte influenciada por las grandes fallas del zócalo NE-SW en la Cordillera Costero-Catalan, Zona de Enlace y el sector sudoriental de la Cordillera Ibérica, y NW-SE en el resto de la Cordillera Ibérica.

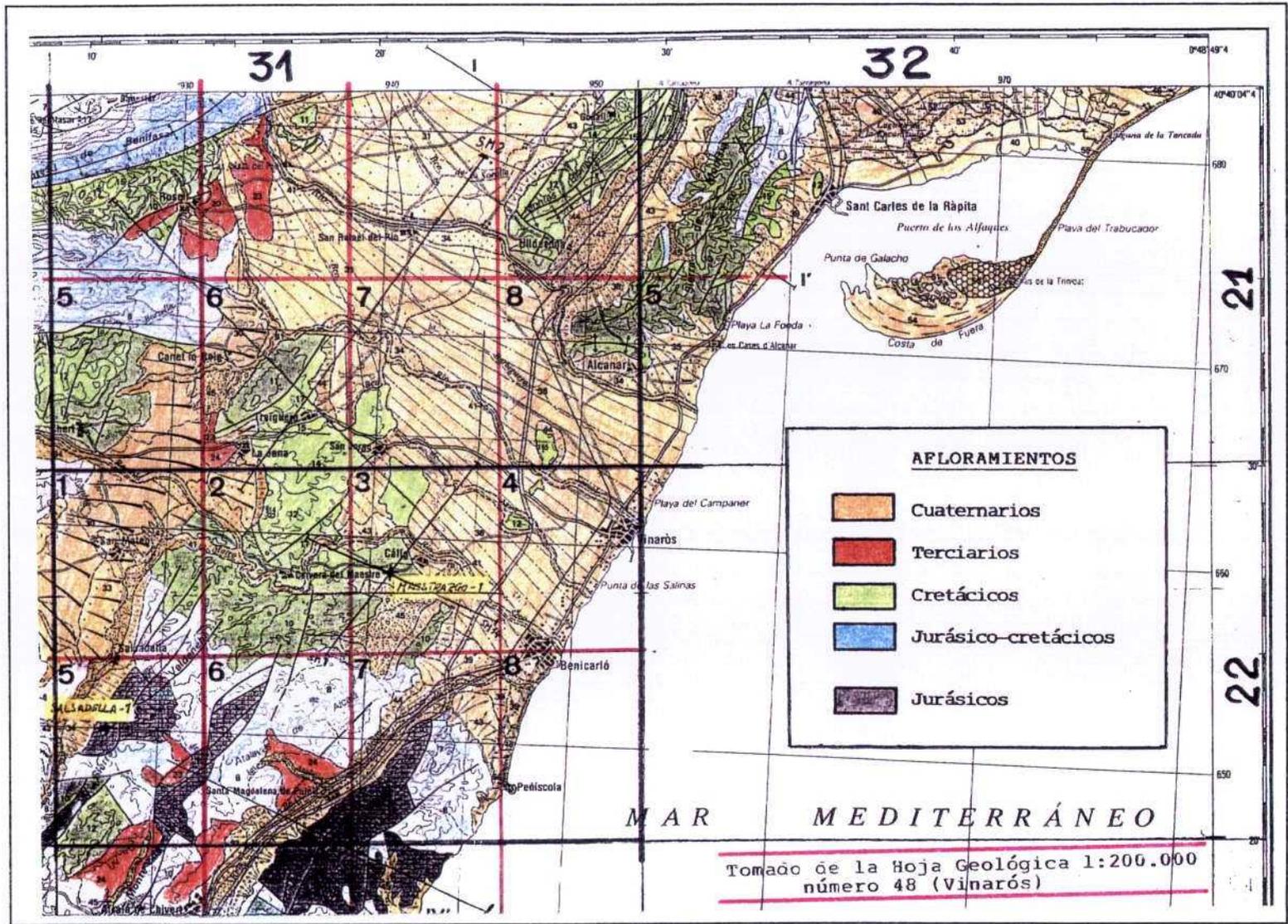
En la zona de estudio -AREA DE VINAROS-, se puede realizar la siguiente somera descripción estructural:

Se trata de un área de horsts y fosas, que constituyen la continuación meridional de las fosas de la Cadena Costera Catalana. Está constituida por un conjunto de horsts de materiales mesozoicos y fosas rellenas de materiales neógenos y cuaternarios. Estas estructuras se encuentran limitadas por grandes fallas normales de orientación general NNE-SSW.

Los bloques limitados entre las fallas están a menudo basculados. A escala métrica y decamétrica se observa que la relación angular entre la estratificación y las capas es constante, independientemente de su inclinación; esto supondría que las fallas también han sufrido un basculamiento simultáneo con la estratificación. A gran escala parece haber también fenómenos de este tipo.

Acompañamos un mapa muy simplificado de la geología del AREA DE VINAROS (figura 3), donde se muestran los afloramientos jurásicos, jurásicos-cretácicos, cretácicos, terciarios y cuaternarios.

FIGURA 3, Mapa geológico simplificado del AREA DE VINAROS.



## AREA DE LA PLANA

Este área se encuentra situada en el extremo suroriental de la Cordillera Ibérica, la cual está constituida por un zócalo formado por materiales del Precámbrico y Paleozoico deformados durante la orogenia hercínica, sobre el que se depositan discordantemente materiales del Pérmico, Mesozoico y Terciario, afectados por movimientos de la orogenia alpina, según la dirección general NW-SE (Directriz Ibérica) con vergencias al SW en la parte occidental (Rama Castellana) y hacia el NE en la oriental (Rama Aragonesa).

### Estratigrafía

En este área afloran materiales del Paleozoico, Triásico, Jurásico, Cretácico, Mioceno y Cuaternario.

#### \* Paleozoico

Se trata de una franja de unos 17 Kms., alargada según la dirección WNW-ESE, de pizarras negras. Está situada en la esquina NW de la Plana de Castellón, entre las localidades de Higueras y Alcuía de Veo.

La forman una serie monótona compuesta por pizarras negruzcas sericíticas y moscovíticas que alternan con areniscas micáceas y algún nivel de microconglomerados. Estos materiales se disponen formando un anticlinal, de flancos con frecuencia subverticales, cortado por fallas transversales de dirección NE-SW.

#### \* Triásico

Los sedimentos en facies germánica típica del Sistema Ibérico, se encuentran ampliamente representados en la sierra del Espadán.

#### \* Buntsandstein

Se llegan a identificar tres unidades litológicas: una inferior heterolítica, una intermedia de areniscas y otra superior también heterolítica. Los dos tramos heterolíticos son muy semejantes desde el punto de vista litológico, ambos están formados por una alternancia de lutitas y areniscas micáceas rojizas, con una potencia aproximada de 150 m. el inferior y 200 m. el superior. El tramo de areniscas está formado por unos 200 m. de areniscas ortocuarcíticas muy compactas.

\* **Muschelkalk**

El Muschelkalk está constituido por tres tramos: uno inferior carbonatado, otro intermedio clástico fino y evaporítico o carbonatado y otro superior carbonatado que presenta con frecuencia intercalaciones margosas, hacia su parte superior.

El hecho de que los carbonatos del tramo superior del Muschelkalk se dispongan entre dos niveles arcillosos-evaporíticos condiciona que con frecuencia éste se encuentre despegado.

El tramo inferior se comporta tectonicamente solidario con el Buntsandstein, al que suele permanecer unido.

\* **Tramo inferior (Muschelkalk I)**

Está constituido por un conjunto de rocas carbonatadas, en su mayor parte dolomías cristalinas, encontrándose en menor proporción dolomías más o menos margosas. También se encuentran intercalaciones margosas, y en mucha menor proporción brechas o dolomías brechoides, con frecuencia acuñándose lateralmente en pocos metros. Localmente, hacia la parte superior de la unidad, pueden encontrarse intercalaciones de arcillas y limonitas rojas.

El límite inferior de esta unidad suele ser muy neto, coincidiendo con la aparición de los primeros tramos carbonatados. En ocasiones la base puede estar constituida por una brecha, a veces dolomítica o con fragmentos de limonitas rojas o verdosas.

El límite superior también suele ser neto. No obstante, es frecuente que la base del tramo medio del Muschelkalk se encuentre cubierta, por lo que existe cierta dificultad a la hora de señalar el contacto entre ambas unidades.

\* **Tramo medio (Muschelkalk II)**

Son muy escasos los afloramientos en que puede ser observado en continuidad estratigráfica con los tramos inferior y superior.

Está constituido por arcillas versicolores, con frecuencia gris, verdosas a violáceas yesíferas y/o con intercalaciones de yesos así como de

carbonatos muy alterados.

Los límites superior e inferior de la unidad suelen ser netos y fáciles de señalar debido al carácter claramente dolomítico y competente de los tramos inferior y superior que la delimitan.

**\*Tramo superior (Muschelkalk III)**

Está constituido fundamentalmente por dolomías, encontrándose en menor proporción niveles y tramos margosos, y en mucha menor cantidad niveles de calizas, calizas margosas y dolomías margosas o arcillosas. La máxima potencia se encuentra en la Sierra del Espadán, donde alcanza los 150 metros.

**\* Keuper**

El Triásico superior está constituido por dos series evaporíticas claramente diferenciadas en las facies Keuper, interrumpidas por una serie detrítica intermedia.

La secuencia deposicional del Keuper inferior-Muschelkalk superior, representa el paso progresivo de un medio carbonatado marino a otro de transición.

**\*Serie evaporítica inferior**

Está constituida, fundamentalmente, por arcillas que intercalan o alternan capas de yesos, siendo más secundarios los niveles carbonatados y las areniscas.

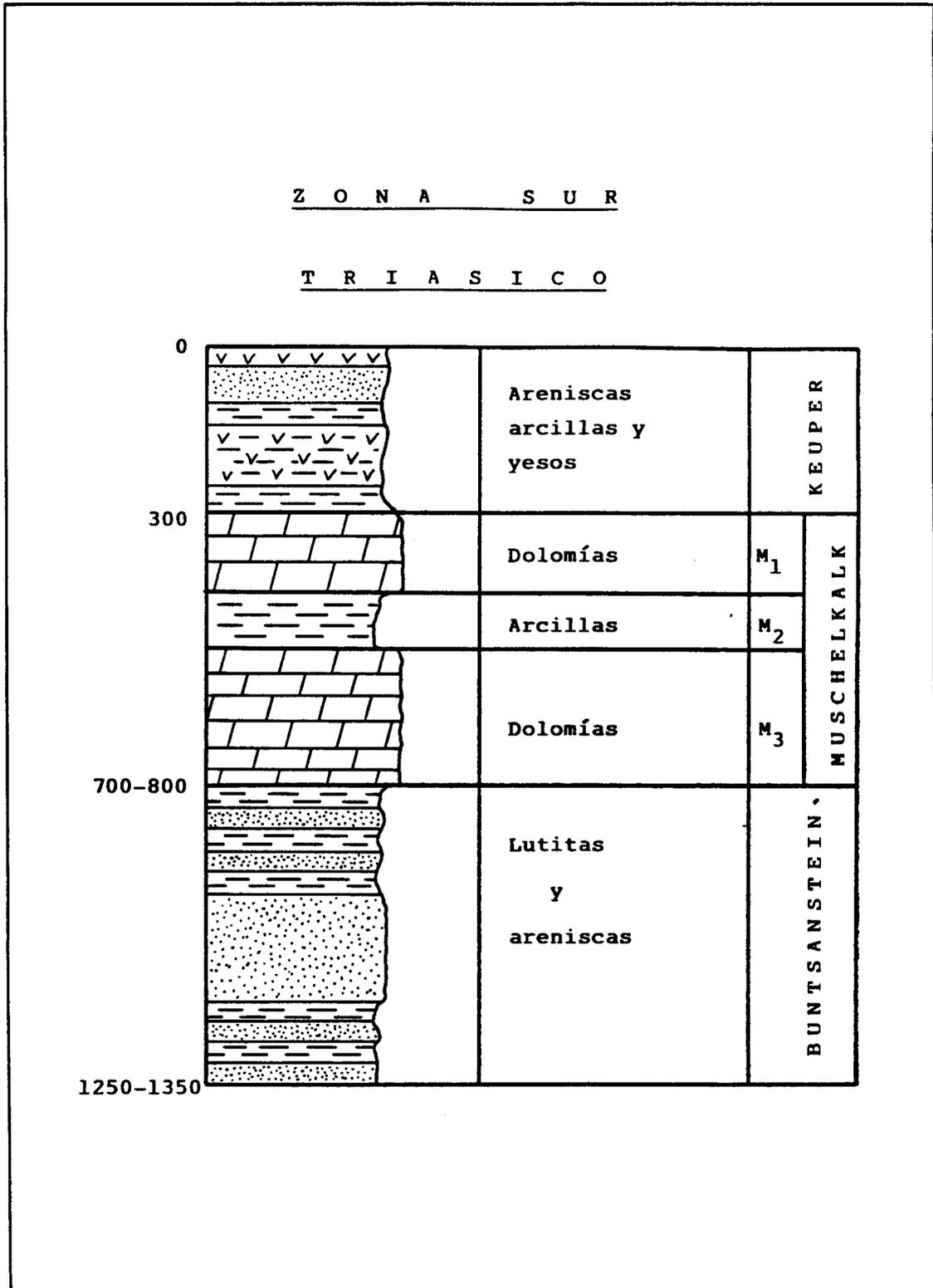
**\*Serie detrítica intermedia**

Se trata de potentes paquetes de areniscas, de hasta 40 metros. La recesión posterior del aparato fluvial da paso al potente depósito de arcillas rojas de llanura de inundación distal, y de marcada influencia marina. En él se intercala un delgado episodio carbonatado dolomítico con moldes de yeso lenticular muy constante, que es un verdadero nivel guía.

**\*Serie evaporítica superior**

Se inicia con la instalación, sobre las arcillas rojas, de una formación de anhidrita diagenética, que suelen acompañarse de gran cantidad de venas de yeso fibroso blanco, de origen secundario.

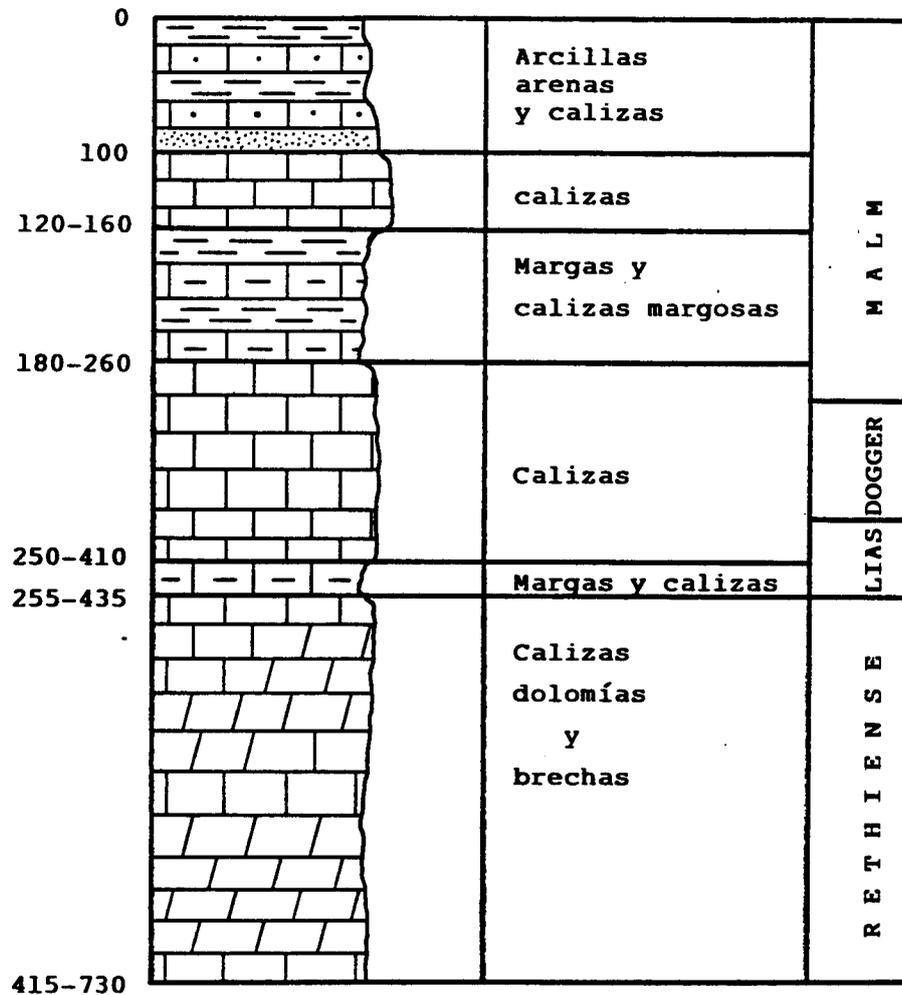
Estas evaporitas dan paso a cuerpos evaporíticos de ambiente laggon con capas yesíferas laminadas y en menor proporción nodulares.



Columna litológica para el Triásico en la zona sur de la provincia de Castellón

Z O N A S U R

J U R A S I C O



Columna litológica para el Jurásico en la zona sur de la provincia de Castellón

**\* Triásico superior y Jurásico**

**\* Rethiense-Pliensbachiense**

**Tramo de transición**

Esta unidad se apoya directamente sobre el Keuper. Su espesor no suele sobrepasar los dos metros y está constituido generalmente por doloesparitas con cuarzos bipiramidales de pequeño tamaño, que suelen contener inclusiones de sales.

**Dolomías tableadas de Imón**

Puede cartografiarse en pocos puntos debido a los accidentes tectónicos. Está constituida generalmente por un tramo de unos 20-22 m. de doloesparitas cristalinas gruesas.

Su deposición se llevó a cabo en un ambiente submareal a intramareal alto con desecación parcial bajo condiciones subaéreas.

**Carniolas**

Están constituidas por un conjunto de rocas carbonatadas, mal estratificadas en bancos gruesos a masivos, oquerosas y de tonos grises a amarillentos o rojizos. Regionalmente su potencia es del orden de 50 a 70 metros, aunque en algunas secciones su espesor parcial supera los 80 m.

Las brechas de esta unidad se han originado en su mayor parte por disolución de los materiales salinos que originalmente contenían. Los tramos salinos contienen intercalaciones de dolomías, calizas dolomíticas y arcillas. La disolución de estas sales durante las diferentes etapas diagenéticas ha provocado tanto la brechificación de los materiales carbonáticos como su colapso.

**Calizas y dolomías tableadas**

Esta unidad está compuesta por un conjunto de rocas carbonatadas, dentro de las cuales suelen predominar las calizas de composición textural muy variada, aunque en algunos lugares las dolomías pueden representar un volumen importante dentro del conjunto.

**Calizas bioclásticas**

Está constituida por calizas bioclásticas, normalmente grainstones a packstones de Ostreidos

y Crinoides. En ocasiones presentan intercalaciones de margas y con frecuencia contiene nódulos de sílex.

La deposición de esta unidad se ha llevado a cabo en un ambiente submareal e intermareal.

**\* Toarciense inferior y medio**

Está constituido por una alternancia irregular de margas y caliza en la que puede dominar uno u otro componente. Su deposición se ha llevado a cabo en un ambiente de plataforma de baja energía y salinidad normal.

**\* Toarciense medio-superior - Oxfordiense superior**

Se ha dividido en cuatro unidades de rango menor. En la parte inferior se encuentra el Miembro de calizas nodulosas de Casinos, en la parte media las unidades informales y en la parte superior la Capa de Oolitos ferruginosos de Arroyofrío y el Miembro Calizas con esponjas de Yátova.

**\* Calizas nodulosas (Toarciense medio-superior)**

Está compuesto por un conjunto de calizas, normalmente micríticas, más o menos bioclásticas y a veces margosas. Su espesor oscila entre 5 y 30 m.

**\* Capa de oolitos ferruginosos y/o fosfáticos (Aaleniense-Bajociense basal)**

El espesor de esta capa es de orden centimétrico y su presencia es discontinua. Se apoya sobre una costra ferruginosa y/o fosfática y está constituida por calizas micríticas.

**\* Tramo informal (Bajociense inferior-Calloviense)**

Está constituido por calizas mudstone, wackestones y a veces packstone, en su mayor parte de microfilamentos, generalmente bien estratificadas, que con frecuencia contienen nódulos de sílex en su parte media y a veces en su parte inferior.

**\*Capa de oolitos ferruginosos de Arroyofrío**

Está constituida por calizas wackestone a packestone que contienen una notable proporción de oolitos ferruginosos y, con frecuencia, fragmentos de éstos.

El espesor de esta unidad suele ser de orden centimétrico.

Su deposición se ha llevado a cabo en un ambiente de plataforma externa con sedimentación muy escasa que pudo llegar a detenerse ocasionalmente.

**\*Calizas con esponjas de Yátova (Oxfordiense superior)**

Está compuesto por un conjunto de calizas, generalmente wackestones a packestones con fósiles, intraclastos y pellets, de tonos grises que con frecuencia presentan un aspecto noduloso, lajoso o brechoide, aparentemente con estratificación irregular.

Su espesor oscila entre 10 y 25 m., siendo el contenido en fósiles muy abundante.

**\* Oxfordiense superior-Kimmeridgiense inferior**

Se distinguen dos formaciones:

**\*Formación margas de Sot de Chera**

Está constituida por un conjunto de margas de color gris, lajosas a nodulosas, que suelen contener intercalaciones decimétricas de calizas mudstones, margocalizas grises, a veces limosas a limo-arenosas, y limonitas amarillentas en superficie. La potencia varía de 0 a 10 m. disminuyendo ésta hacia el norte de la Plana.

Su deposición se llevó a cabo en un ambiente de plataforma restringida con clásticos finos provenientes de la erosión de la Meseta, con eventuales periodos de emersión e influencia de agua dulce.

### **\*Formación Ritmita calcárea de Loriguilla**

La mayor parte de esta Formación está compuesta por una alternancia regular de calizas mudstones bien estratificadas en capas de 10 a 30 cm y calizas margosas en lajas dispuestas en niveles de 5 a 15 cm.

Su deposición se ha llevado a cabo en un ambiente de plataforma submareal restringida con abundante producción de carbonatos, siendo en parte el equivalente lateral, en facies distal, de la Formación Sot de Chera.

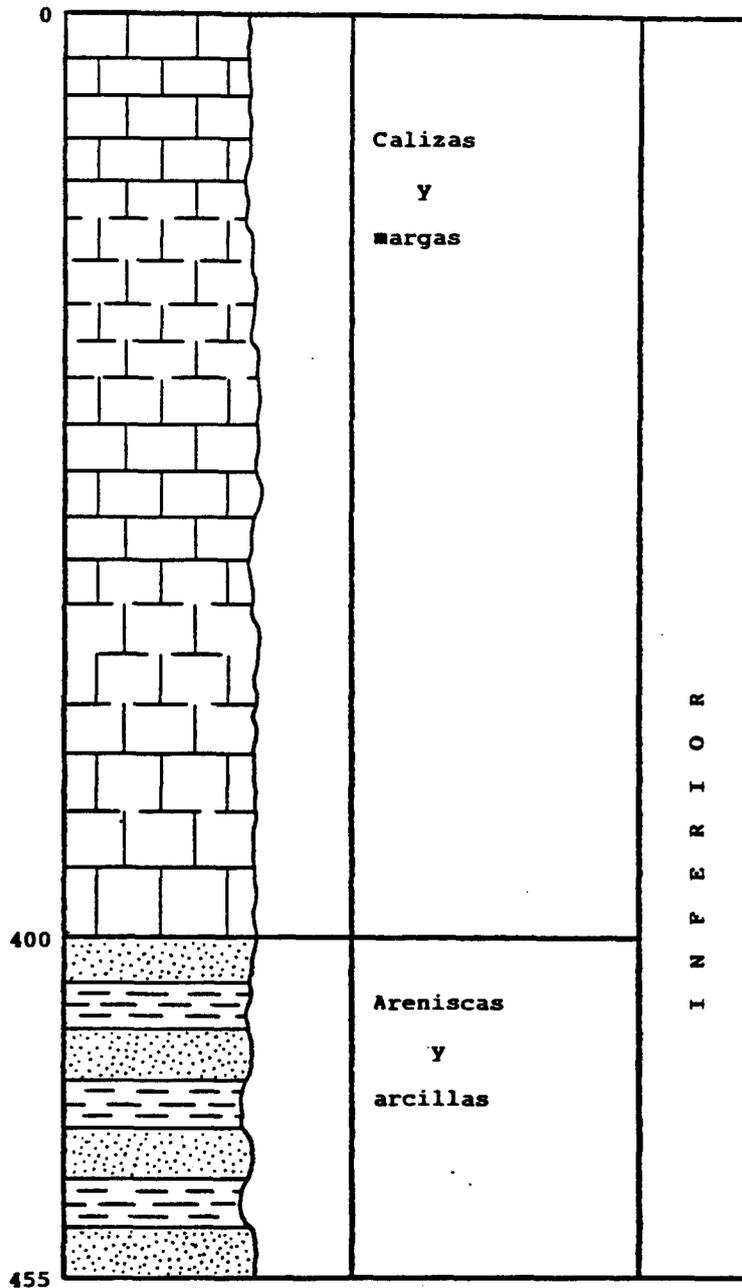
### **\* Kimmeridgiense-Portlandiense**

Esta unidad está constituida por calizas entre las que predominan los packstones a wackestones de fósiles, intraclastos y pellets, encontrándose en menor proporción mudstone y grainstones, oolitos, intraclastos y fósiles. Se estratifican en bancos gruesos, a veces irregulares, que le dan un aspecto masivo, soliendo marcar un resalte en la topografía. Su espesor oscila entre 20 y 60 m. La fauna suele ser muy abundante y variada.

Su deposición se ha llevado a efecto en una plataforma interna semiprotegida (laggon abierto) en la cual se desarrollaba un complejo de barras, canales arrecifales de conducción de fango bajo una intensa actividad biológica y abundante producción de carbonatos.

Z O N A S U R

C R E T A C I C O



Columna litológica para el Cretácico en la zona sur de la provincia de Castellón

### **\* Cretácico**

Corresponden los afloramientos existentes en este área a los más meridionales del Cretáceo inferior del Maestrazgo.

#### **\* Neocomiense-Aptiense**

Se trata de una serie muy incompleta, en la que, litológicamente, se pueden distinguir dos conjuntos, uno basal de carácter detrítico y otro superior carbonatado.

##### **Facies Weald**

Serie predominantemente detrítica de unos 55 m. de potencia, constituida por una alternancia compleja de areniscas y arenas con arcillas, de colores rojizos y amarillentos.

Las Característica morfológicas que presentan, tales como disposición lenticular y estratificación cruzada, apuntan hacia una sedimentación de tipo deltáica poco profunda.

##### **Facies carbonatada**

Serie de unos 400 m. de potencia, constituida por una alternancia de calizas en bancos gruesos y margas. Se trata de una serie transgresiva sobre los términos anteriores que comienza con capas lumaquéllicas, sobre las que se sitúan facies cada vez más carbonáticas, en ocasiones detríticas.

### **\* Terciario**

No existe un trabajo estratigráfico riguroso sobre los materiales terciarios en este área, por tanto, las edades asignadas están sujetas a revisión.

#### **\* Mioceno medio**

Afloran estos materiales en las cercanías de Onda. Están constituidos por tramos predominantemente conglomeráticos y tramos de areniscas y lutitas rojizas intercalados.

\* **Mioceno Superior**

Está constituido por areniscas y lutitas calcáreas con escasas intercalaciones de calizas. Es característica la presencia de numerosos niveles lumaquéllicos con grandes ostreidos. El ambiente deposicional debe corresponder a un medio marino somero-litoral con episodios de cierta energía.

\* **Mioceno Superior-Plioceno**

Está constituido fundamentalmente por calizas recristalizadas y localmente dolomitizadas, de aspecto oqueroso y estratificación masiva.

Dentro de este periodo geológico se sitúan diversos depósitos de lutitas rojas, areniscas, conglomerados y calizas algales detríticas.

\* **Cuaternario**

En el AREA DE LA PLANA existe una gran variedad de depósitos de edad cuaternaria, que se extienden desde los relieves mesozoicos hasta el litoral.

\* **Depósitos continentales**

Dentro de esta categoría encontramos:

- Costras calcáreas (Pleistoceno)
- Arenas, gravas y limos. Aluviales y terrazas (Pleistoceno-Holoceno)
- Conglomerados y arcillas con cantos. Mantos de arrollada y Pies de Monte (Pleistoceno-Holoceno)

\* **Depósitos mixtos continental-marinos**

Englobados en esta categoría encontramos:

- Arcillas arenosas con cantos. Abanico aluvial de tipo deltáico (Pleistoceno)
- Limos pardos y negros. Albuferas y marismas (Holoceno)
- Arenas y gravas. Playas y dunas (Holoceno)

**Tectónica**

El área presenta una estructura compresiva compleja, con pliegues y fallas inversas, desarrolladas en varias

fases de plegamiento, así como un conjunto de estructuras distensivas posteriores.

Según el modelo tectónico desarrollado por ALVARO et al (1978) y CAPOTE, la Cuenca Ibérica se originó durante una etapa distensiva que acompañó a la fragmentación y deriva de bloques continentales durante el desarrollo del Océano Atlántico. Uno de los centros de distensión era un punto caliente del manto que debía situarse entre Castellón y Valencia. La disposición perpendicular de la Cadena Ibérica respecto a la cadena alpina propiamente dicha, permite localizar este punto caliente, según diferentes modelos se puede predecir que la distensión consiguiente, se inició a finales del Pérmico, con la sedimentación de la facies Buntsandstein. Tectonicamente corresponde este estadio a la Etapa de Graben y la cuenca es una amplia fosa tectónica compleja, con bloques hundidos mediante subsidencia diferencial a lo largo de fallas del zócalo previamente existentes.

La Etapa de Graben terminó con la deposición de los materiales carbonatados del Muschelkalk. A continuación se pasó a la Etapa de Transición en la que la distensión aumentó apreciablemente dando lugar a un adelgazamiento de la corteza por estiramiento y un nuevo modelo de subsidencia generalizada; en esta etapa la distensión permite la efusión de materiales volcánicos básicos procedentes del manto. En la Ibérica esta etapa corresponde al Keuper, con sus materiales margoyesíferos.

Al terminar el Keuper se pasó a la Etapa de Downwarping en la que, la corteza, al alcanzar la distensión su máxima importancia, sufre su máximo adelgazamiento, evidenciado por el vulcanismo básico del Jurásico.

Con el Cretácico se reanuda la Etapa de Downwarping que concluyó finalmente con el comienzo de la Etapa Compresiva, en la que se pliega la cadena y se inicia la sedimentación continental terciaria.

De lo expuesto se deduce que la sedimentación triásica y jurásica, se desarrollo durante las etapas de Graben, Transición y Downwarping.

Una síntesis macroestructural permite reconocer unas estructuras compresivas (pliegues y fallas inversas) y otras distensivas (fallas normales y fosas), que corresponden al plegamiento alpino de la Ibérica y a las distensiones postorogénicas del Neógeno.

En la figura 4 se muestra un mapa geológico muy simplificado de la que hemos dado en denominar AREA DE LA PLANA, donde se observa la complejidad tectónica de la zona, con multitud de accidentes distensivos y compresivos.

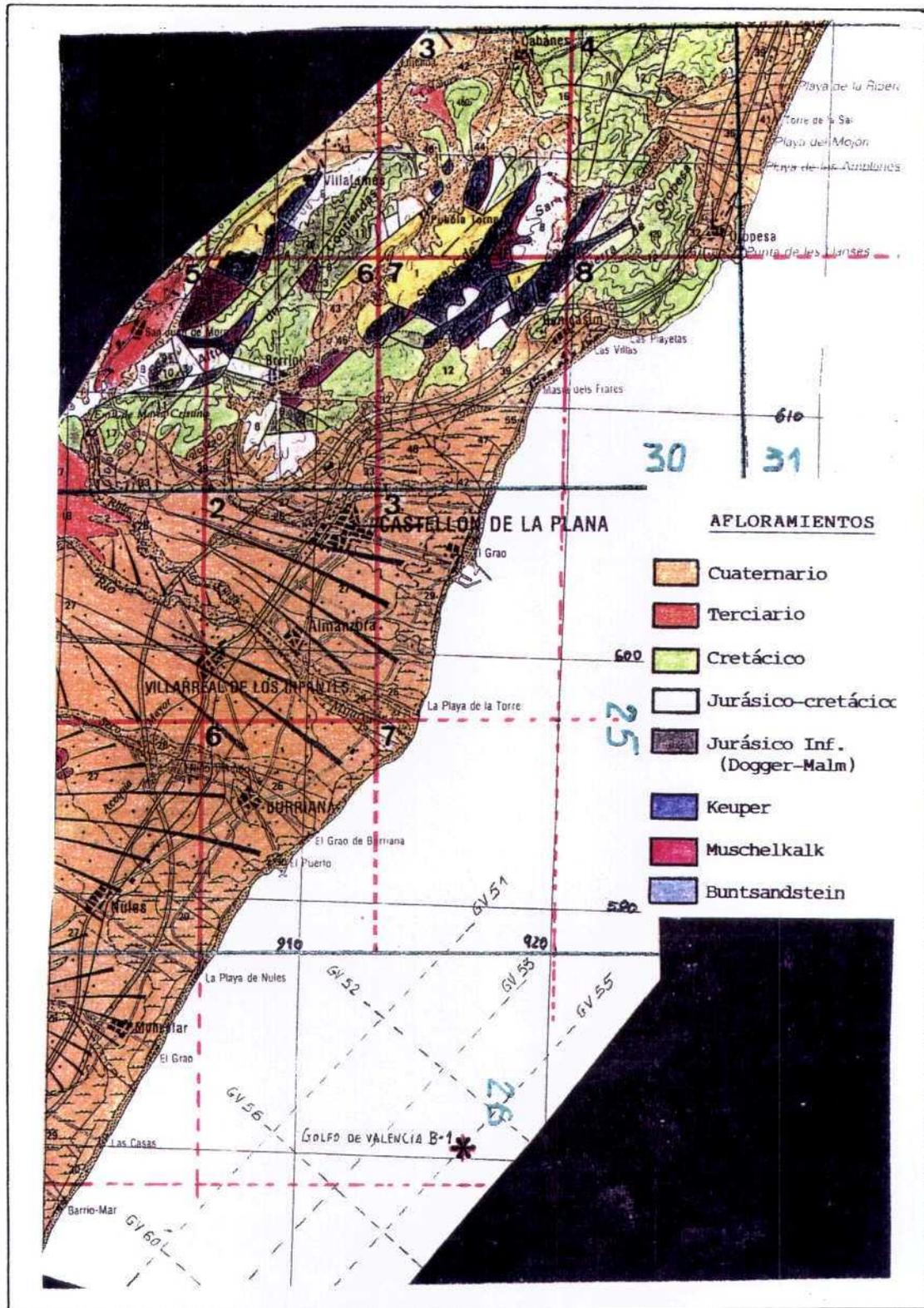


FIGURA 4, Mapa geológico simplificado del AREA DE LA PLANA.

### 3.2 Descripción de las unidades geológicas que constituyen los modelos de inyección

Una vez presentada la geología superficial asociada a las zonas denominadas AREA DE VINAROS y AREA DE LA PLANA, se pasa a establecer cuales serían los materiales geológicos aptos para ubicar en ellos los residuos dadas sus características hidrogeológicas favorables, que permitan el almacenamiento de líquidos, así como la existencia de materiales que actuando de cobertera, impidan la migración de los fluidos inyectados hacia materiales geológicos que contengan aguas de calidad aceptable para el uso por el hombre, en cualquiera de los sectores de actividad o para abastecimiento.

Además, las aguas que pudieran rellenar los huecos de la posible roca almacén, deben ser de mala calidad, de manera que la inyección de residuos líquidos no suponga comprometer el uso futuro de un recurso natural.

Con respecto a este último punto, sólo la interpretación de logs y ciertos ensayos sobre sondeos petroleros, informarán acerca de la calidad de las aguas intersticiales de la posible roca almacén.

En este apartado sólo se atiende a criterios puramente geológicos, estableciendo los modelos -roca almacén y roca de cobertera-, que a priori, es interesante revisar en posteriores fases del proyecto a partir de la información ofrecida por la geología de superficie.

Una revisión de ésta permite la proposición de los siguientes modelos de inyección:

#### \* Modelo triásico profundo (figura 5).

Estaría constituido por la alternancias de areniscas y arcillas del Buntsandstein, donde las formas lenticulares de areniscas, constituyen la roca almacén y el material arcilloso que engloba estos lenticiones, la cobertera o sello, que impide la migración de los fluidos.

Las areniscas son de grano fino a medio y ocasionalmente de grano muy grueso, con espesores variables de 0,5 a 2,5 metros. En algunos casos los lenticiones arenosos muestran una ligera tendencia granodecreciente de base a techo.

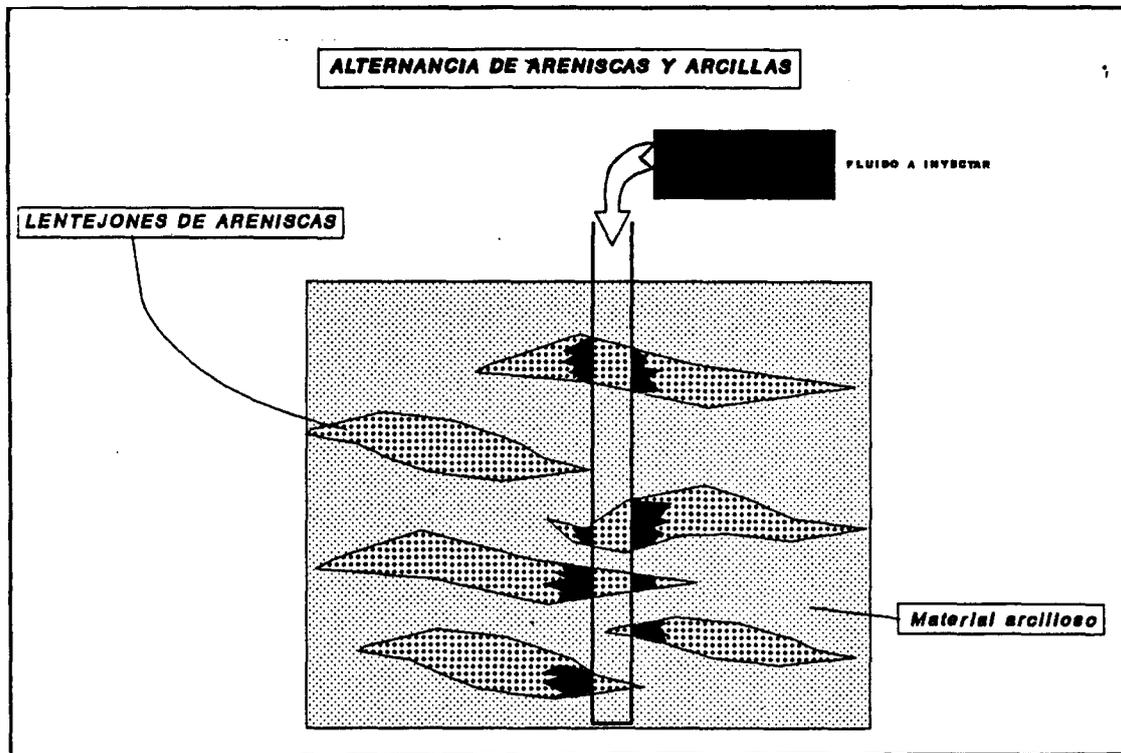


FIGURA 5, Modelo de inyección triásico inferior (Bunt).

\* Modelo carbonatado-Muschelkalk inferior (figura 6).

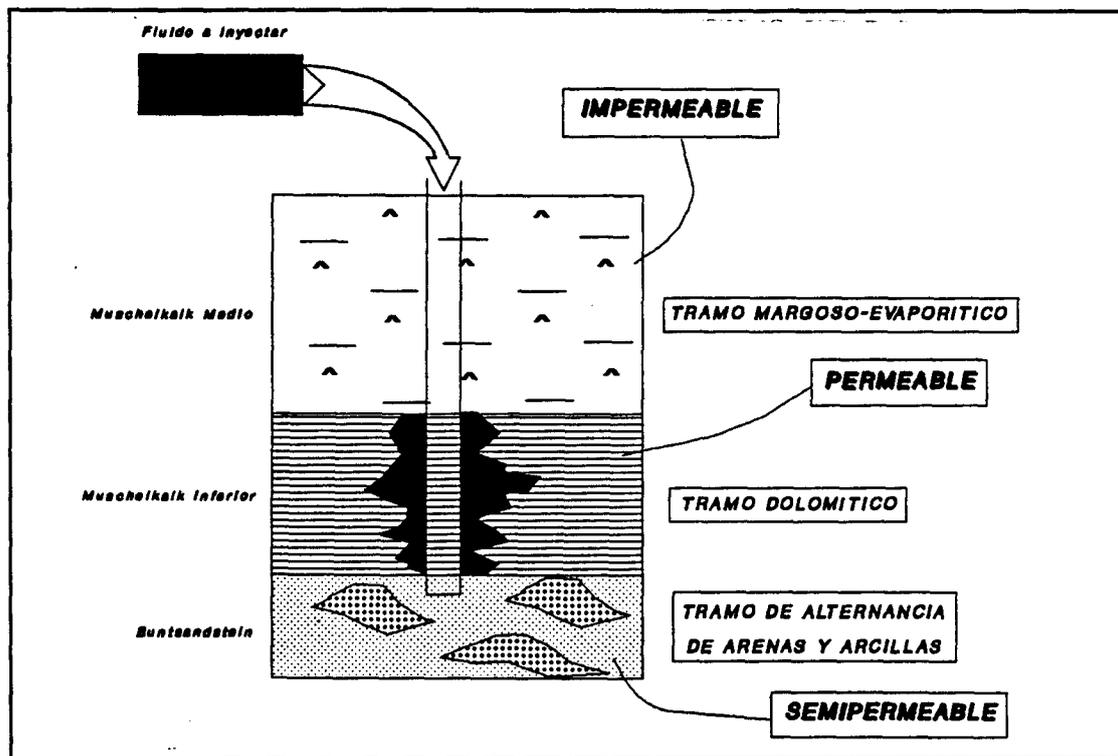
Este modelo está constituido por dos tramos:

- tramo de carbonatos del Muschelkalk inferior (Muschelkalk I), y el
- tramo margoso-evaporítico (Muschelkalk II).

El tramo Muschelkalk I corresponde a un nivel de carbonatos, en su mayor parte dolomías, con intercalaciones de margas, y en menor proporción brechas o dolomías brechoides. Con cierta frecuencia se encuentran tramos oquerosos debido a la disolución de evaporitas.

El tramo margoso-evaporítico corresponde a un conjunto de arcillas versicolores yesíferas e intercalaciones de carbonatos muy alterados.

Se trata, pues, de un nivel muy impermeable y que alcanza potencias importantes (más de 600 m. en el alto Maestrazgo).

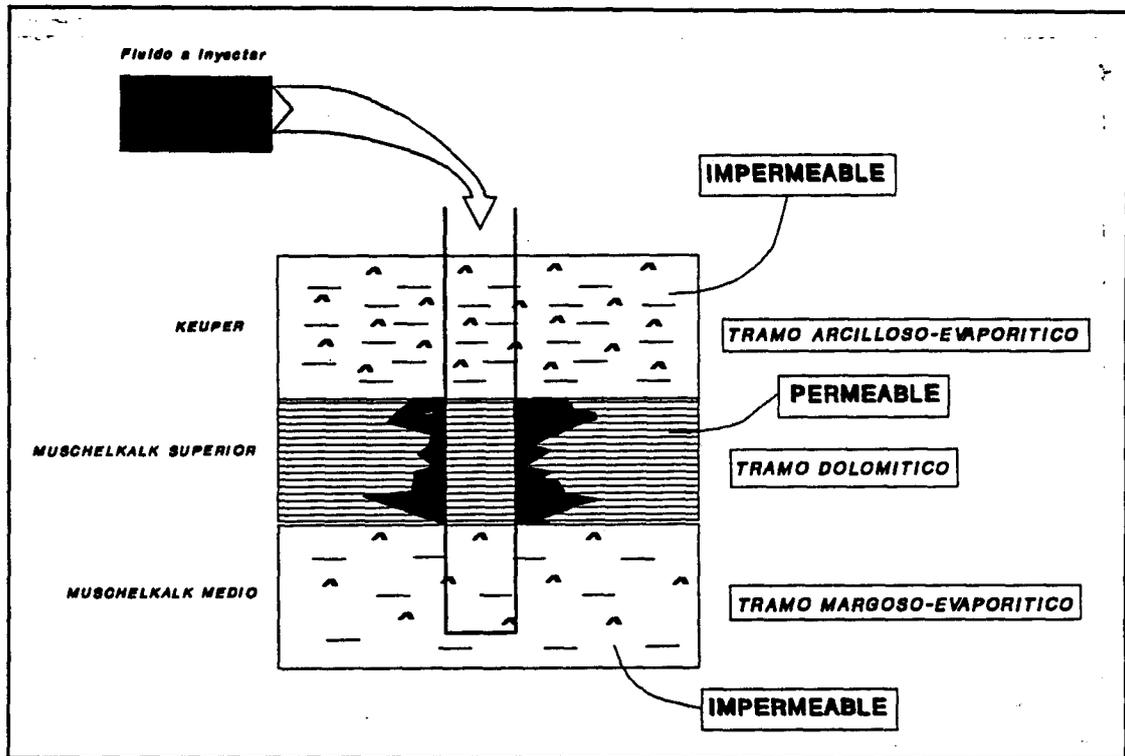


**FIGURA 6, Esquema del modelo de inyección carbonatado muschelkalk inferior**

**\* Modelo carbonatado-Muschelkalk superior (figura 7).**

Este modelo es similar al anterior, pues la roca almacén también está constituida por dolomías, aunque algo más margosas, mientras la cobertera está constituida por un tramo muy continuo en extensión y potencia, compuesto por arcillas y evaporitas (Keuper).

A su vez, el tramo dolomítico queda aislado en su zona inferior por las margas y evaporitas del tramo muschelkalk medio.

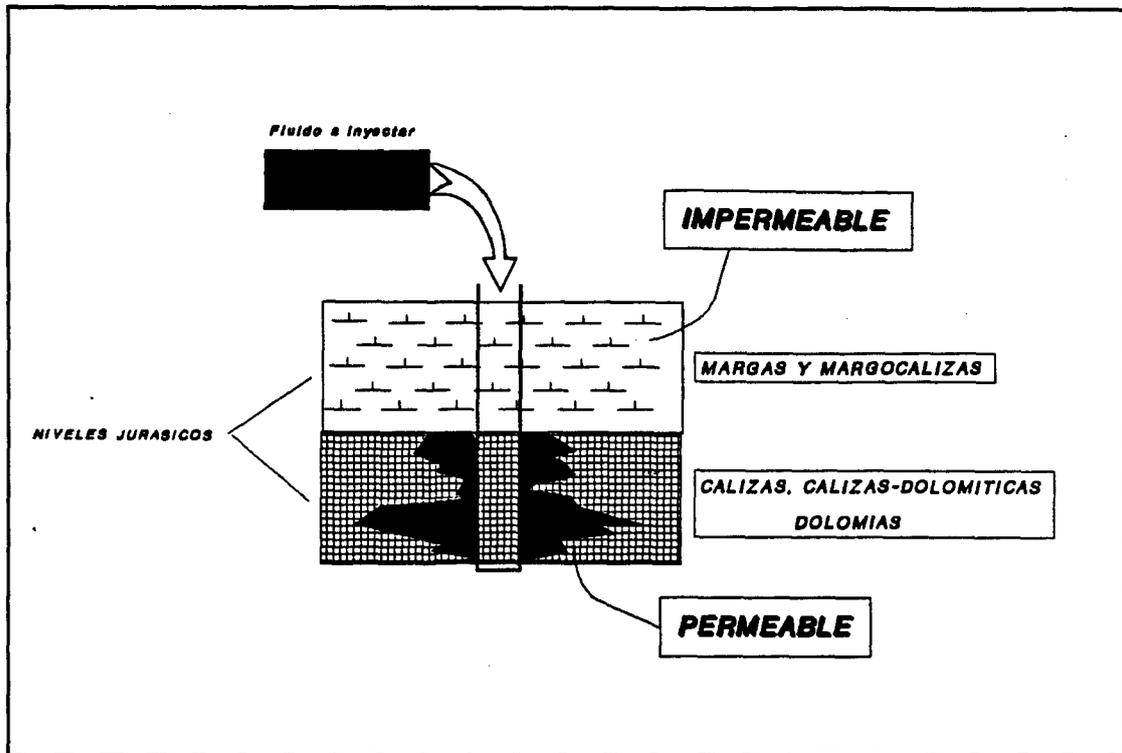


**FIGURA 7, Esquema del modelo de inyección carbonatado muschelkalk superior**

**\* Modelo jurásico (figura 8).**

En el conjunto del megaciclo jurásico aparecen ciertos paquetes carbonatados muy permeables de gran extensión, cubiertos por niveles margosos-arcillosos que actúan de cobertera.

Hay que destacar como niveles permeables importantes, las carniolas del Rethiense, calizas y dolomías del Dogger y ciertos niveles del Malm, sobre todo del Kimmeridgiense.



**FIGURA 8, Modelo de inyección jurásico**

**\* Modelo cretácico inferior (figura 9).**

Al igual que el modelo jurásico mencionado anteriormente, existen niveles calcáreos en el ciclo cretácico de importante permeabilidad y extensión lateral (caso del nivel calizo Neocomiense), que se encuentran cubiertos por niveles margosos de gran extensión (caso del Barremiense).

**\* Modelo cretácico superior (figura 10).**

Este modelo tiene razón de ser en función de la existencia del nivel calizo Aptiense de importante permeabilidad y extensión, que en ocasiones constituye el techo del ciclo cretácico, con lo que queda perfectamente cubierto en la zona superior por los materiales detríticos impermeables del Terciario.

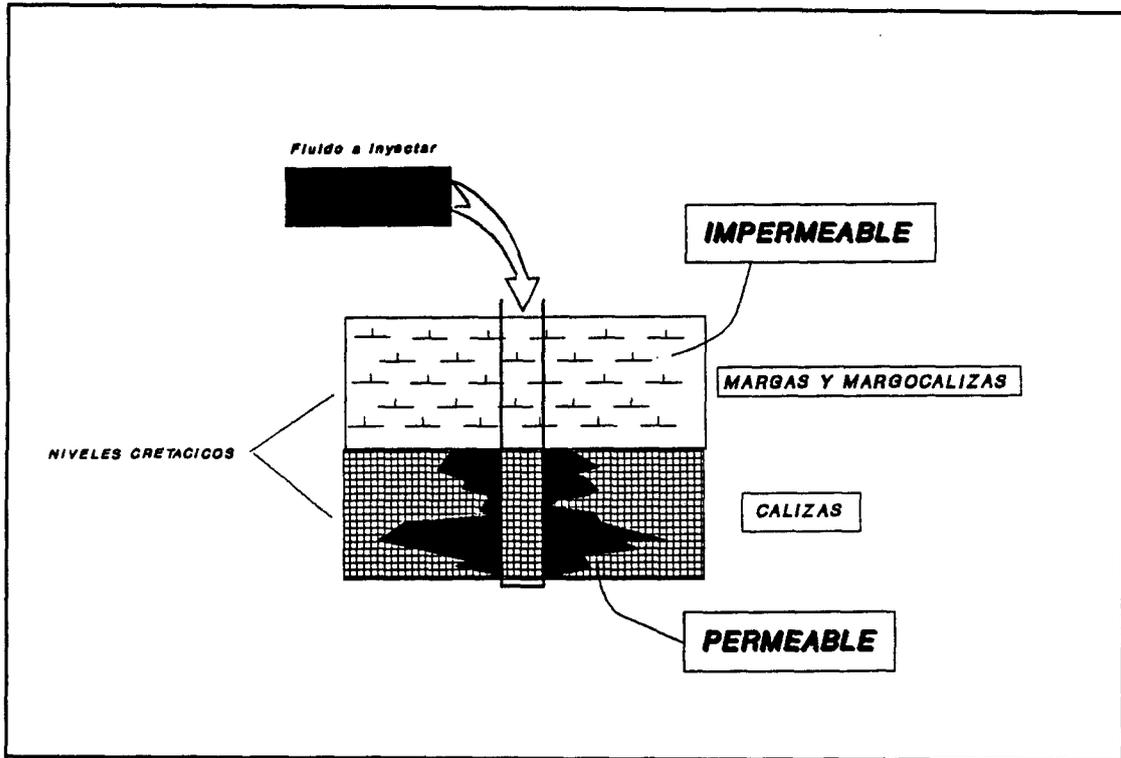


FIGURA 9, Modelo de inyección cretácico inferior.

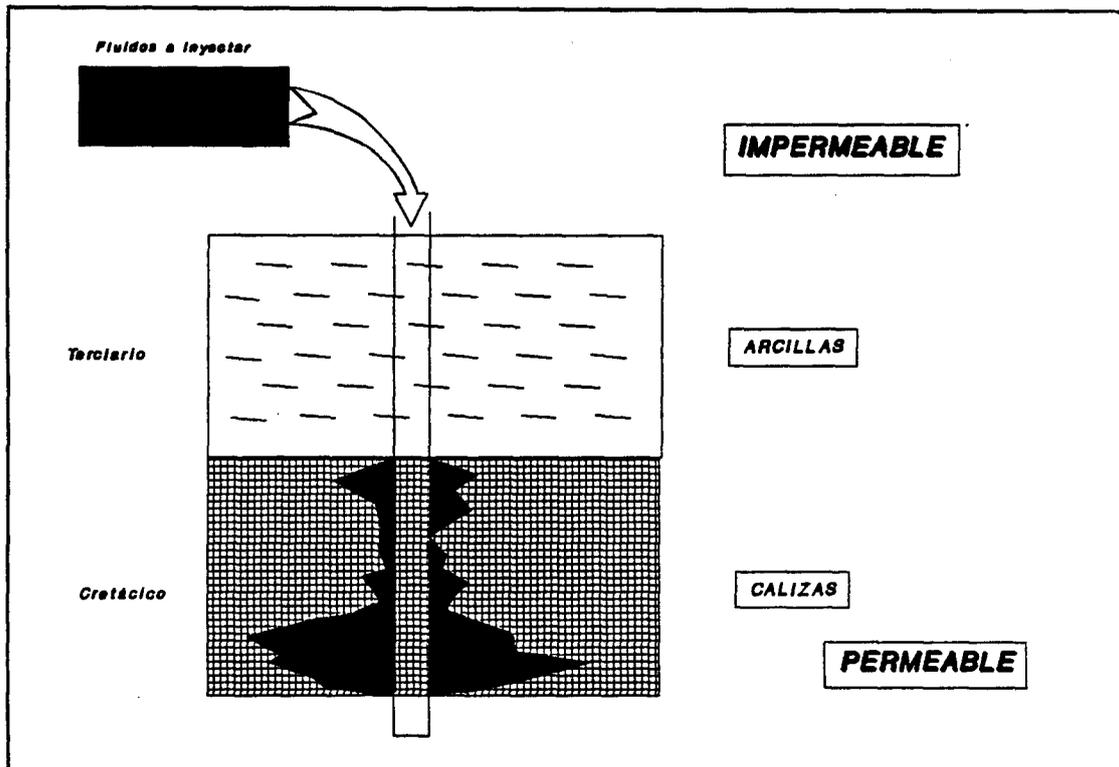


FIGURA 10, Modelo de inyección cretácico superior.

### **3.3 Sistemas y subsistemas hidrogeológicos. Calidad de las aguas subterráneas**

La información incluida en este apartado ha sido elaborada a partir del "Atlas Hidrogeológico de Castellón".

La provincia de Castellón de la Plana ocupa parte de los sistemas acuíferos nº55, Javalambre-Maestrazgo y nº56, Sierra del Espadán-Plana de Castellón-Plana de Sagunto, según la nomenclatura del Mapa de Síntesis de Sistemas Acuíferos del ITGE.

#### **\* Sistema 55: Javalambre-Maestrazgo**

Presenta una superficie total aproximada de 11.500 km<sup>2</sup>, extendiéndose sobre las sierras de Gudar, Montsiá-Godall, Puertas de Beceite, Javalambre, Camarena y Pobo.

El sistema acuífero limita geográficamente, al norte con el río Guadalope y los puertos de Morella-Beceite, al Oeste con las fosas de los ríos Turia y Alfambra, al sur con el río Mijares y la Plana de Castellón y al este con el Mar Mediterráneo.

Está formado por materiales de un espectro temporal muy amplio. Los principales niveles acuíferos están constituidos por: dolomías, carniolas y calizas jurásicas.

En las Planas litorales, el nivel acuífero principal se sitúa en los conglomerados y arenas miocuaternarias, con potencias variables entre 0 y casi 100 m. aumentando en dirección a la costa, si bien, en profundidad se localiza un acuífero Mesozoico carbonatado y confinado por margas y margocalizas del Mioceno.

El impermeable de base lo constituyen los materiales margoarcillosos en facies Keuper.

La alimentación del sistema se realiza fundamentalmente por la infiltración del agua de lluvia y la descarga se produce por: emergencias, salidas al mar y bombeos en las Planas de Vinarós y Oropesa.

#### **\* Sistema 56: Sierra del Espadán-Plana de Castellón-Plana de Sagunto**

Este sistema ocupa una superficie de 3.250 km<sup>2</sup>, de forma aproximadamente triangular y topografía sumamente diversificada, que varía entre los abruptos relieves triásicos y jurásicos de la Sierra del Espadán y Sierra de Toro, con cotas superiores a los 1.100 m.s.n.m., las altiplanicies cretácicas y miocenas de Alpuente y Landete,

respectivamente, situadas a cota superior a 1.000 m.s.n.m. y las llanuras costeras pliocuaternarias de Castellón y Sagunto.

El sistema está integrado por cinco formaciones de interés hidrogeológico:

- Areniscas ortocuarcíticas del Buntsandstein.
- Calizas y dolomías del Muschelkalk
- Calizas y dolomías del Lías-Dogger
- Calizas y dolomías del Cretácico Superior
- Gravas, arenas y conglomerados pliocuaternarios.

La importancia relativa de las mismas varía según las zonas. En el sector oriental el interés se centra casi exclusivamente en los materiales pliocuaternarios y en las calizas y dolomías del Muschelkalk, mientras las areniscas del Buntsandstein presentan un interés mucho más restringido.

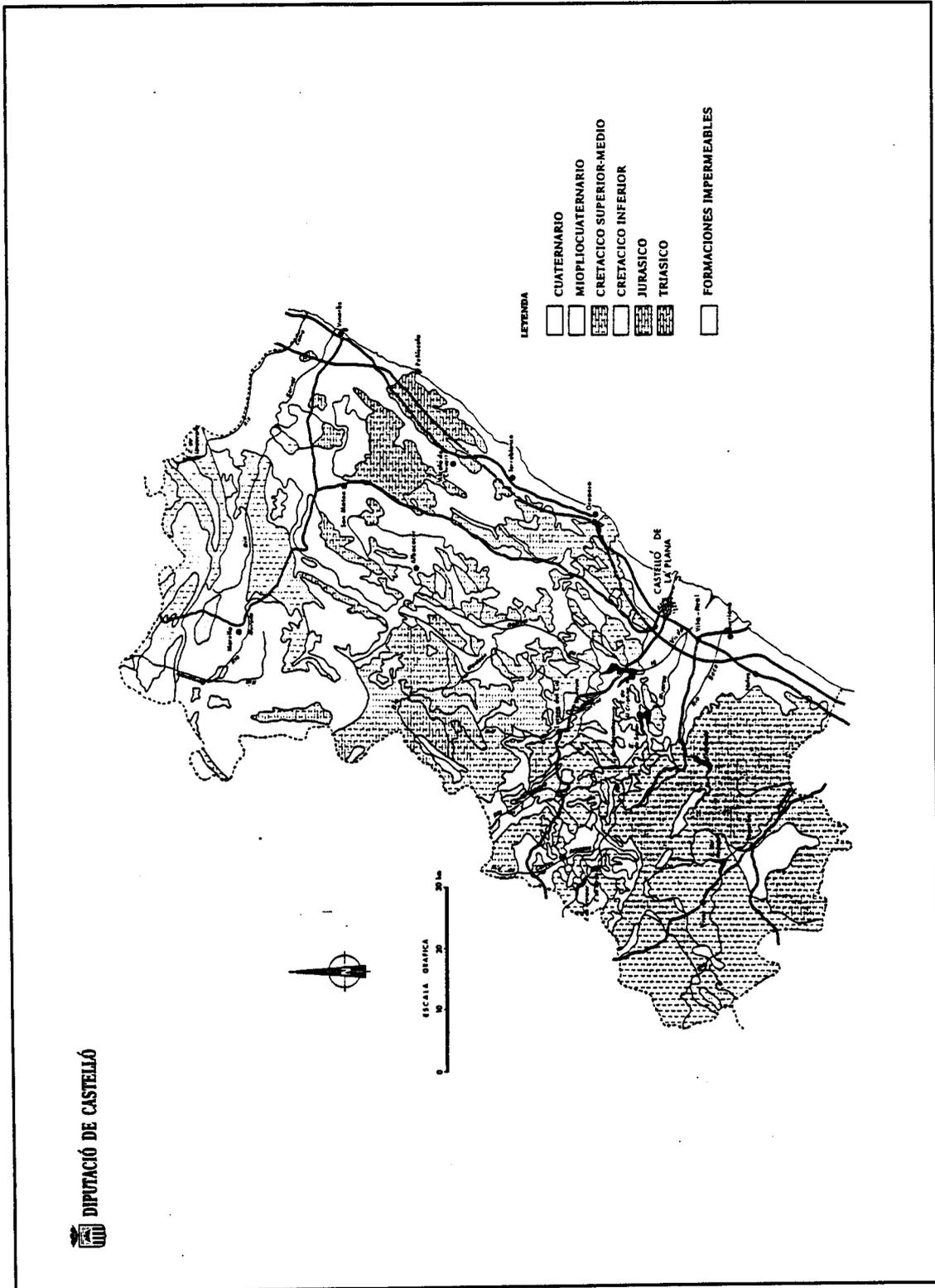
Los límites hidrogeológicos del sistema están definidos en función de la presencia de alineaciones triásicas (Keuper) de naturaleza diapírica, y al este por el Mar Mediterráneo.

En el sistema existen dos dominios sedimentarios con claras implicaciones hidrogeológicas:

- Plana de Castellón-Sagunto
- Acuíferos mesozoicos del interior

El primero está constituido por niveles acuíferos pliocuaternarios de la llanura costera, que se extienden entre Benicasim y Puzol, mientras que el segundo engloba el conjunto de unidades acuíferas ubicadas en los materiales mesozoicos del interior, individualizados en función de la existencia de estructura con significación hidrogeológica.

En la figura 11 se presenta un mapa hidrogeológico de la Provincia de Castellón, tomado del Atlas Hidrogeológico.



**FIGURA 11, Mapa hidrogeológico simplificado de la provincia de Castellón.**

## \* Calidad química de las aguas subterráneas

Este apartado ha sido elaborado a partir del Banco de Datos del ITGE, y tomando toda la información de puntos de agua de la Provincia de Castellón -restringida a las áreas de Vinarós y la Plana de Castellón- referente a litologías y calidad química. El tratamiento de esta información ha permitido elaborar las láminas que aparecen en las figuras 12 -para el área de Vinarós- y 13 -área de la Plana-, en las que, para cada octante de las Hojas 1:50.000 correspondientes, se señalan los acuíferos actualmente explotados, las profundidades de explotación y la calidad de las aguas subterráneas.

La interpretación de esta información permite establecer las siguientes conclusiones para las dos áreas objeto del estudio:

### \* AREA DE VINAROS

En esta área se explotan principalmente dos materiales acuíferos, los niveles carbonatados del cretáceo-jurásico -acuífero profundo- y arenas, conglomerados y gravas -acuífero superficial- correspondientes a las planas de Vinarós y Oropesa.

El acuífero profundo presenta aguas con buena calidad en toda el área, de carácter natural bicarbonatado, aunque en la zona sur, donde estos materiales afloran prácticamente en la línea de costa (Peñíscola) presentan ligeros síntomas de fenómeno de intrusión. En las zonas de Vinarós y Benicarló estos materiales se sitúan a importantes profundidades (más de 400 metros), por lo que son escasamente explotados.

El acuífero superficial presenta buena calidad general en la zonas más alejadas de la costa, pero en las zonas de intensa explotación -proximidades de los núcleos de población costeros de Vinarós, Benicarló y Peñíscola- aparecen importantes fenómenos de intrusión marina y de contaminación por nitratos, derivada de las explotaciones agrícolas existentes en estas planas. De forma que la calidad de las aguas subterráneas asociadas a este acuífero superficial es bastante deficiente.

La posible transferencia natural de contaminación del acuífero superficial al acuífero profundo en la plana de Vinarós-Peñíscola está descartada en principio por la existencia de una importante capa impermeable entre ambos niveles acuíferos, las margas, margocalizas y arcillas del Mioceno, con potencias de hasta 300 m. en la línea de costa.

HOJA N.º	OCTANTE	Información hidrogeológica
31-21	5	Se explotan calizas del Cretácico? No hay información de profundidades ni de calidades
31-21	6	Se explotan calizas del Cretácico, profundidades de hasta 250 m. Se explotan el acuífero superficial (hasta 15 m.) Acuífero superficial: calidad buena Acuífero profundo: calidad buena, bicarbonatada
31-21	7	Se explotan calizas del Cretácico (80 m.) y acuíferos superficiales, ambos de buena calidad
31-21	8	Se explota un acuífero superficial cuaternario (alternancia de gravas, arenas y conglomerados) hasta unos 100 m. de profundidad. Y otro de calizas del Cretácico inferior hasta 300 m. Acuífero cretácico: calidad buena, bicarbonatada cálcica Acuífero superficial: calidad deficiente, algo mineralizada (bicarbonatos y sulfatos), existencia de contaminación por nitratos.
32-21	5	Se explota principalmente el acuífero superficial También existen captaciones en calizas cretáceas Acuífero superficial: calidad deficiente, algo bicarbonatada, existencia de contaminación por nitratos Acuífero profundo: sin información de calidades
31-22	1	Se explota principalmente el acuífero superficial (hasta 30 m.) -gravas y conglomerados del Holoceno- No hay información de calidades
31-22	2	No hay información de litologías ni de calidades
31-22	3	Se explota un acuífero superior -arenas, gravas y conglomerados- de edad Cuaternaria (hasta 50 m.) y un acuífero Cretácico existiendo captaciones hasta los 350 m. Acuífero cretácico: calidad buena Acuífero superficial: calidad buena
31-22	4	Zona con gran densidad de captaciones, donde se explota principalmente el acuífero superficial (entre 20 y 100 m.). El acuífero cretácico es sólo explotado en su tramo superior (hasta los 35 m., en zonas donde el zócalo cretácico está más superficial, hasta profundidades de 150 m.) Acuífero superficial: calidad natural algo deficiente, bicarbonatada y sulfatada, con rasgos de contaminación por nitratos e intrusión mariana Acuífero profundo: calidad buena, bicarbonatada
31-22	5	Se explotan los acuíferos superficial y profundo (cretácico-jurásico?). No hay información de calidades
31-22	6	No hay información
31-22	7	Se explotan 4 acuíferos: uno el superficial, que corresponde a arenas, gravas y conglomerados de edad Cuaternaria; un segundo correspondiente a calizas de edad cretácica inferior; un tercero de calizas-dolomías jurásicas (entre 45 y 200 m.); y un último de calizas-dolomías fisuradas de edad liásica (150 a 250 m.) Acuífero superficial: calidad deficiente (mineralización natural, bicarbonatos y sulfatos) con contaminación por nitratos e intrusión marina Acuífero cretácico: buena calidad, algo bicarbonatada, en zonas costeras posibilidad de existencia de fenómenos de intrusión Acuífero jurásico: Buena calidad, posible contaminación por intrusión Acuífero liásico: No hay información de calidades
31-22	8	Se explota principalmente el acuífero superficial cuaternario, y un acuífero calizo profundo de edad cuaternaria. Acuífero superficial: calidad deficiente (existencia de fenómenos intrusivos y de contaminación por nitratos) Acuífero profundo: calidad buena

FIGURA 12, Lámina que muestra la situación de los acuíferos el AREA DE VINAROS

#### **\* AREA DE LA PLANA**

En este área se explotan diversos tipos de materiales asociados a la Sierra del Espadán y a la Plana de Castellón.

En la zona de la Sierra del Espadán se explotan materiales del Buntsandstein (areniscas) con aguas de buena calidad, y calizas-dolomías del Muschelkalk algo mineralizadas, si bien en algunas zonas esta mineralización llega a ser muy intensa, quizás por la presencia de las evaporitas del Keuper que por "lavado" de las mismas puedan mineralizarse las aguas de acuíferos próximos.

Los acuíferos jurásicos explotados presentan una calidad buena, algo bicarbonatada.

En la Plana de Castellón se explota un acuífero profundo asociado a las calizas del cretácico y otro superficial asociado a los materiales pliocuaternarios.

Las calizas se explotan principalmente en las zonas periféricas de la Plana, ya que en las zonas centrales y en la costa estas aparecen a grandes profundidades. Normalmente este acuífero presenta buena calidad, algo bicarbonatada.

El acuífero superficial es el más ampliamente explotado. Presenta aguas de calidad deficiente por contaminación de nitratos, fruto de la importante actividad agrícola que se desarrolla en la zona. Aunque al contrario de lo que ocurre como en la Plana de Vinarós-Peñíscola, no parecen existir problemas importantes de intrusión marina en la zona norte que nos ocupa, si bien en la zona sur de la Plana (Moncófar) existen serios problemas.

HOJA N°	OCTANTE	Información Hidrogeológica
30-24	3	Se explota el acuífero superficial plio-cuaternario, que presenta aguas de calidad regular, con mineralización en cloruros, sulfatos y bicarbonatos. Con pH de 8.
30-24	4	Se explota el acuífero superficial que presenta una calidad deficiente, aguas salobres (sulfatos, bicarbonatos, Ca, Mg) y procesos de contaminación por nitratos e intrusión.
30-24	6	Se explota el acuífero superficial pliocuaternario de deficiente calidad (contaminación por nitratos) y un acuífero carbonatado superficial de edad cretácica, de buena calidad, aunque algo bicarbonatada.
30-24	7	Se explota el acuífero superficial, hasta 40 metros, el cual presenta una deficiente calidad (intrusión + nitratos)
30-24	8	Se explotan el acuífero superficial pliocuaternario de calidad deficiente (nitratos + intrusión), y el acuífero cretácico aflorante con aguas de buena calidad (bicarbonatada)
29-25	4	Se explota el acuífero superficial pliocuaternario, de calidad natural deficiente (sulfatos-Keuper-) y con procesos de contaminación por nitratos. También se explota un acuífero profundo carbonatado de edad jurásico inferior (Dogger-Malm) con aguas de regular calidad (sulfatos, bicarbonatos, Ca)
29-25	7	Se explota el acuífero carbonatado asociado a los niveles del Muschelkalk, no existiendo información de calidades El acuífero constituido por las areniscas del Buntsandstein también se explota, conteniendo aguas de buena calidad
29-25	8	Se explotan el acuífero superficial pliocuaternario del que no se dispone de información sobre calidades, y una serie de acuíferos carbonatados de edad jurásica (aguas de buena calidad, algo bicarbonatada) y triásica (Muschelkalk, aguas de deficiente calidad, sulfatos, cloruros -Keuper-)
30-25	1	Se explota principalmente el acuífero superficial pliocuaternario, hasta profundidades de 150 metros Presenta una regular calidad, importante mineralización en sulfatos y bicarbonatos, existiendo indicios de nitratos.
30-25	2	Se explota principalmente el acuífero superficial (hasta aproximadamente los 100 m.), que presenta deficiente calidad (nitratos > 50 ppm, no detectándose fenómenos de intrusión)
30-25	3	Se explota el acuífero superficial (hasta los 50 metros) de deficiente calidad, contaminación por nitratos, no detectándose fenómenos de intrusión.
30-25	5	Se explota el acuífero superficial (hasta los 50 metros), con aguas de deficiente calidad natural, muy mineralizadas (sulfatos, bicarbonatos, cloruros) y con procesos de contaminación por nitratos. El acuífero profundo carbonatado (Muschelkalk?) por debajo de los 50 m., presenta regular calidad (sulfatos y bicarbonatos)
30-25	6	Se explota el acuífero detrítico hasta los 60 m., con deficiente calidad, mineralizada (sulfatos-bicarbonatos), con procesos de contaminación por nitratos. No intrusión

FIGURA 13, Lámina que muestra la situación de los acuíferos el AREA DE LA PLANA

#### 4 REVISION DETALLADA DE LOS SONDEOS PROFUNDOS DE INVESTIGACION PETROLERA

##### 4.1 Sumario de sondeos en la zona de estudio

Para facilitar la lectura de datos relativos a los sondeos se presentaron una serie de tablas donde se incluyen toda información recopilada.

##### 4.1.1 Localización

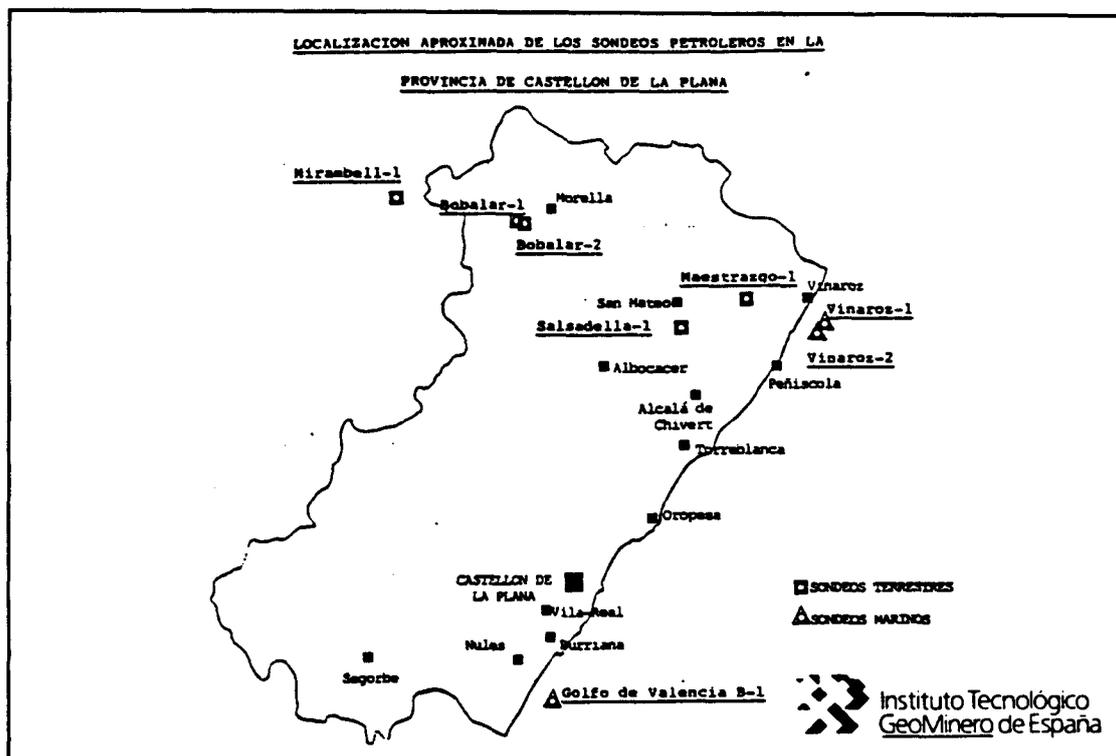
Para la localización de los sondeos que han servido de base en el estudio del subsuelo hemos construido la siguiente tabla:

Sondeo	Número	Coordenadas		Cota	T M	Término Municipal
		X	Y			
Mirambell-1	322	3°14'38"	40°36'49"	1340	T	Tronchón (Teruel)
Bobalar-1	126	3°26'32"	40°32'02"	1190	T	Cincorres (Castellon)
Bobalar-2	133	3°27'03"	40°32'55"	1145	T	Cincorres (Castellon)
Salsadella-1	329	3°51'29"	40°23'08"	415	T	Salsadella (Castellón)
Maestrazgo-1	377	4°01'27"	40°27'25"	162	T	Calig (Castellón)
Vinaroz-1	265	4°16'03"	40°21'15"	-	M	-
# Vinaroz-2	453	0°33'21"	40°24'20"	-	M	-
# G.Valencia B-1	475	0°0'39"	39°45'39"	-	M	-

Número: El asignado en la relación de sondeos petrolíferos.  
T: Terrestre. M: Marino.

Todas las coordenadas están referidas al meridiano de Madrid, excepto para los sondeos marcados con el símbolo "#", referidas al meridiano de Greenwich.

En la figura 14 se ofrece la posición aproximada de los distintos sondeos, con referencia a la provincia de Castellón de la Plana.



**FIGURA 14, Localización aproximada de los sondeos petroleros, utilizados en el estudio del subsuelo.**

#### 4.1.2 Fechas

En la tabla siguiente se presenta la información recopilada en relación a fechas:

Sondeo	Operador	Comienzo	Fin
Mirambell-1	AUXINI	7- V-74	14- IX-7
Bobalar-1	COPAREX	25- IV-63	17-VII-63
Bobalar-2	COPAREX	12-VIII-63	23- XI-63
Salsadella-1	AUXINI	21- I-75	27- II-75
Maestrazgo-1	CAMPSA	10- IV-77	12- IX-77
Vinaroz-1	SHELL	16-VIII-70	6- X-70
Vinaroz-2	SHELL	12- V-80	26- V-80
G.Valencia B-1	EAIPSA	11- II-81	13-III-81

#### 4.1.3 Profundidades

Las diferentes Característica de los sondeos se reflejan en la siguiente tabla:

Sondeo	Profundidad final(m.)	Horizonte alcanzado	Profundidad del mar(m.)	Estado P o A
Mirambell-1	2810,8	PALEOZOICO	-	A
Bobalar-1	1860	MUSCH.MEDIO	-	A
Bobalar-2	2591,6	MUSCH.MEDIO	-	A
Salsadella-1	1073,2	PERMICO	-	A
Maestrazgo-1	2948,2	PERMICO	-	A
Vinaroz-1	2750	MALM	31,1	A
Vinaroz-2	1414	CRETAC.INF.	31	A
G.Valencia B-1	1366	BUNT	25	A

ESTADO: P, productivo  
A, abandonado

#### 4.1.4 Objetivos del sondeo

Los objetivos particulares de cada sondeo se presentan en la tabla siguiente:

Sondeo	Objetivos de la perforación	Resultados de la perforación
Mirambell-1	Calizas y dolomías del Muschelkalk Areniscas del Bunt	Sondeo seco Muschelkalk carbonatado compacto Areniscas Bunt con buenas características almacén pero sin hidrocarburos
Bobalar-1	Musckelkalk superior	Débil permeabilidad y débil presión. Ausencia de fracturación importante
Bobalar-2	Flanco oeste de la estructura de Cinctores	En el Muschelkalk superior y parte superior del medio

	Horizontes jurásicos y triásicos	indicios de hidrocarburos sobre los testigos Mejor zona, la inferior del Muschelk. superior (pérdida de lodos)
Salsadella-1	Tramos triásicos del Muschelkalk y Bunt	Compacidad y carencia de fracturación en el Muschelkalk El Bunt presenta excelentes condiciones como almacén, con altos valores de porosidad. Se encuentra invadido por agua salada
Maestrazgo-1	Reconocer las series cretácicas y jurásicas Reconocimiento del Muschelkalk	Tramos de permeabilidad alta y muy alta en el jurásico con agua dulce (lavado por aguas meteóricas) Existencia de agua salada en el Bunt (el nivel Keuper impidió el lavado por aguas meteóricas) La falta de Muschelkalk obedece a un hecho local
Vinaroz-1	Tramos cretáceos y jurásicos	Resultados negativos
Vinaroz-2	Estructura de carbonatos fracturados y/o karstificados del Cretácico Inferior	Resultados negativos
G.Valencia B-1	Discordancia de base del Terciario y primeros términos del Mesozoico	Abandonado como seco en el Bunt

#### 4.1.5 Sondeos seleccionados para una revisión detallada. Razones de esta selección

Dado el escaso número de sondeos terrestres existentes en la provincia de Castellón o proximidades, ha sido necesario utilizar todos los existentes.

Con respecto a los sondeos marinos, sólo se han tenido en consideración los citados por varias razones:

- Por situarse más cerca de la costa, con lo que la información aportada será mas fácilmente extrapolable.
- Por servir de base a la interpretación de la sísmica marina.
- Por permitir el trazado de perfiles geológicos del subsuelo perpendiculares a la costa mediante la correlación con sondeos terrestres y el apoyo de la sísmica terrestre y marina.

En cualquier caso, se han estudiado con más intensidad los sondeos terrestres, cuya información se considera más valiosa, si bien, el sondeo Golfo de Valencia B-1, por tratarse del único sondeo existente en la zona sur de la provincia, ha sido estudiado con el mismo detalle que los terrestres.

#### 4.2 Resultados de la revisión de los sondeos

Se han tratado por separado los sondeos terrestres de los marinos, formando dos grupos.

##### 4.2.1 Sondeos terrestres

###### 4.2.1.1 Mirambell-1

###### a. Descripción de los modelos de inyección buscados.

En la zona investigada por este sondeo, y a la vista de la columna estratigráfica del mismo (figura 15), se puede establecer tres modelos de inyección, de acuerdo con lo expresado en el apartado II.B:

Un primer modelo que correspondería al modelo carbonatado muschelkalk superior, que se definiría como sigue:

- \* Formación confinante: Nivel Keuper, de 261 m. de espesor, constituido por arcillas y anhidritas, muy impermeable.
- \* Formación almacén: tramo superior dolomítico del Muschelkalk (M3), con 137 m. de espesor.

Un segundo modelo que correspondería al modelo carbonatado muschelkalk inferior:

- \* Formación confinante: tramo intermedio del Muschelkalk (M2) con una potencia de 624 m. y constituido por arcillas abigarradas, sal y anhidrita.

\* Formación almacén: tramo inferior dolomítico del Muschelkalk (M1) con 82 m de espesor.

Y por último, el tercer modelo correspondería al denominado modelo triásico profundo:

\* Materiales areniscosos de permeabilidad discontinua - formas lenticulares-, incluidos en un medio arcilloso que actúa de impermeable.

#### b. Estratigrafía

En la figura 15 aparece un corte estratigráfico de los tramos atravesados por el sondeo con información de litologías y profundidades.

A continuación se describen los materiales atravesados por el sondeo y relacionados con los modelos de inyección ya propuestos.

\* KEUPER (DE 1376 A 1637 m.) -261 m. de espesor-

1376-1490: Alternancia de arcillas versicolores gris, verde, rojas y negras (IMPERMEABLE)

1490-1625: Arcilla salífera gris, sal translúcida, ligeramente coloreada, y anhidritas (IMPERMEABLE)

1625-1637: Arcillas dolo-limoníticas gris con intercalaciones de arcillas dolomíticas gris verdosa, y anhidrita, con pasadas de dolomías (IMPERMEABLE).

\* MUSCHELKALK SUPERIOR -M3- (DE 1637 A 1774) -137 m. de espesor-

1637-1668: Alternancias de arcillas gris beige dolomíticas, arcilla gris-verdosa y pasadas de calizas dolomíticas de color gris beige (SEMIPERMEABLE).

1668-1720: Caliza dolomítica beige microcristalina con algún molusco, localmente recristalizada, con clastos de carbonato empastados en matriz micrítica, con pasadas de arcilla dolomítica de tonos grises, arcilla gris verdosa limonítica (SEMIPERMEABLE).

1720-1774: Caliza gris beige microcristalina, fracturada, venas de calcita y pasadas de arcilla dolomítica beige (PERMEABLE).

\* MUSCHELKALK MEDIO -M2- (DE 1774 a 2398 m.) -624 m. de espesor-

- 1774-1842: Sal gema, translúcida con pasadas más potentes de arcilla gris verdosa (IMPERMEABLE).
- 1848-1889: Anhidrita beige con pasadas de arcilla gris (IMPERMEABLE).
- 1889-1901: Sal gema translúcida, masiva (IMPERMEABLE).
- 1901-1938: Anhidrita, sal gema y arcilla gris plástica (IMPERMEABLE).
- 1938-2004: Arcilla plástica gris con algunas pasadas de anhidritas y sal (IMPERMEABLE).
- 2004-2030: Sal gema con pasadas poco potentes de arcillas (IMPERMEABLE).
- 2030-2248: Alternancias irregulares de anhidritas beige, sal con inclusiones arcillo-anhidríticas, arcilla plástica gris verdosa (IMPERMEABLE).
- 2248-2266: Sal gema masiva blanca (IMPERMEABLE).
- 2266-2352: Arcilla gris dura anhidrítico-salífera, anhidrita muy recristalizada y compacta, con intercalaciones de arcillas dolomíticas (IMPERMEABLE).
- 2352-2362: Margas grises ligeramente dolomíticas (IMPERMEABLE).
- 2362-2378: Anhidrita beige compacta recristalizada con algunas pasadas de arcilla dolomítica gris (IMPERMEABLE).
- 2378-2392: Sal gema con anhidrita a la base (IMPERMEABLE).
- 2392-2398: Dolomía calcárea, pastosa beige, con inclusiones de anhidrita (IMPERMEABLE).

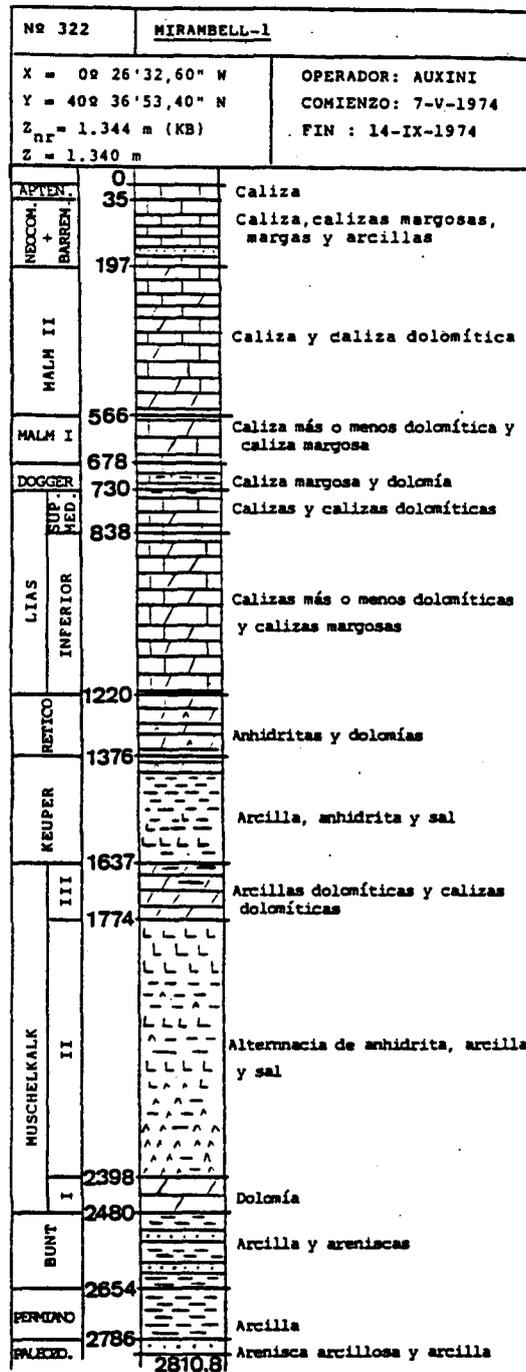


FIGURA 15, Columna estratigráfica correspondiente al sondeo MIRABELL-1.

\* **MUSCHELKALK INFERIOR -M1-** (DE 2398 A 2480 m.) -82 m. de espesor-

2398-2420: Dolomía calcárea gris beige con inclusiones de arcilla gris oscura dura, ligeramente dolomítica (PERMEABLE).

2420-2460: Caliza más o menos dolomítica con pasadas de arcilla dolomítica (PERMEABLE).

2460-2469: Dolomía más o menos calcárea, inclusiones de arcilla doloanhidítica (PERMEABLE).

2469-2480: Arcilla gris beige doloanhidítica con pasadas de arcilla gris medio compacta (IMPERMEABLE).

\* **BUNTSANDSTEIN** (DE 2480 A 2654 m.) -174 m.-

2480-2492: Arcilla rojo-ocre compacta, dura (IMPERMEABLE).

2492-2496: Arcilla limonítica gris, ligeramente dolomítica y arcilla rojo ocre (IMPERMEABLE).

2496-2654: Arenisca de grano fino a medio, subangular, a subredondeado, con cemento arcilloso rojo, localmente margoso. Pasadas de areniscas de grano fino, blanca, dura, cemento doloanhidítico (PERMEABLE).

**c. Estructura geológica**

Este sondeo se encuentra ubicado dentro de la cubeta del Maestrazgo Oriental, con varias estructuras visibles en superficie.

En particular, la estructura Mirambell corresponde a una forma anticlinal de gran tamaño (unos 12 Km en la dirección del eje de plegamiento). Esta arma en superficie en materiales cretácicos, en la zona de intersección de direcciones ibérica (NW-SE) y catalanaide (NE-SW), enmarcada en sus flancos por el Albense (piso de tránsito del Cretácico inferior al superior) y Cretácico Superior, con un núcleo Cretácico inferior-Malm (Jurásico superior).

#### d. Diagramías y pruebas base del estudio

Las diagramías disponibles para la reinterpretación de los diferentes parámetros correspondientes a los materiales geológicos incluidos en los modelos descritos han sido:

- \* CALIPPER + NEUTRON POROSITY INDEX...2500 a 2800 m.
- \* GAMMA RAY + INTERVAL TRANSIT TIME...1275 a 1800 m.
- \* CALIPPER+GAMMA RAY+INTERVAL TRANSIT TIME...0 a 2800 m.

Además de la información obtenida de la reinterpretación de las diagramías, se cuenta con la información aportada por los ensayos de DST realizados en el sondeo, cuyos resultados fueron:

INTERVALO TESTIFIC.	LITOLOGIA	PRESIONES (psi)	SALINIDAD	FLUIDO RECUPE.
2407-2471 (m.)	Calizas del M1	Hidros. inicial....3710 1ºflujo inicial....80 final....84 1ºCierre.....907 2ºFlujo inicial...587 final....81 2º Cierre.....501 Hidros. final.....3707	17500 ppm	153 l/lodo
2491-2655 (m.)	Areniscas del Bunt	Hidros. inicial....3864 1ºflujo inicial....792 final...2010 1ºCierre.....2204 2ºFlujo inicial...2065 final...2195 2º Cierre.....2214 Hidros. final.....3891	30000 ppm	3460 l/lodo  1720 l/agua

#### e. Resultados de la interpretación de las diagramías

Los resultados de la interpretación de las diagramías quedan reflejados en los siguientes cuadros, en ellos expresan los valores calculados para los tramos más interesantes, pertenecientes a los horizontes geológicos definidos como almacenes en los modelos descritos, o incluidos en otros horizontes no contemplados en estos modelos, pero si en otros de los ya definidos (jurásicos):

ZONAS ALMACEN				CONTENIDO EN ARCILLAS	
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	LITOLOGIA	GR (GAPI)	Vsh (%)
1	490	20	Dolomías	10	10
2	700	30	Dolomías	10	10
3	770	43	Dolomías	20	20
4	822	12	Dolomías	25	25
5	937	10	Caliza arcill.	10	10
6	1050	12	Caliza arcill.	5	5
7	1120	10	Caliza arcill.	10	10
8	1275	15	Carniolas	20	20
9	1720	35	Caliza dolom.	20-50	20-30
10	2455	5	Dolomías	45	<20
11	2545	45	Areniscas	15	<20

El dato ofrecido por Vsh(%) no es el contenido real en arcillas de la formación, simplemente se trata de un valor relativo del contenido en arcillas, calculado a partir del GAMMA RAY.

ZONAS ALMACEN			POROSIDADES				
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	Densidad (g/cc)	$\phi_D$ (%)	Sónico ( $\mu$ s/ft)	$\phi_S$ (%)	$\phi_N$ (%)
1	490	20			65	15-18	
2	700	30 #			60	12-14	
3	770	43			65	15	
4	822	12			65	15	
5	937	10			70	16-18	
6	1050	12			55	9	
7	1120	10			65	15	
8	1275	15			55	10	
9	1720	35			57	10	
10	2455	5			52	7-10	
11	2545	45			70	12	15

(#) Los primeros 5 metros más porosos —  $\phi_s = 22-25\%$

Se debe tener en cuenta que la porosidad real es bastante menor que la porosidad sónica calculada ( $\phi_s$ ) pudiéndose establecer que la porosidad real es del 25 al 30% de la sónica. En cualquier caso estos valores calculados permiten evaluar relativamente las características de los niveles escogidos.

#### f. Estudio de posibilidades

A la vista de los resultados ofrecidos por la interpretación de las diagragfías, los modelos que incluyen como almacenes los niveles carbonatados del muschelkalk, resultan poco convenientes dada la escasa porosidad (fracturación) que presentan (valores de porosidad sónica del 7 al 10% -zonas 9 y 10- lo que implica valores reales del 2 al 3%).

En cambio para el modelo triásico profundo, las areniscas que constituirían el posible almacén, presentan porosidadesónicas calculadas del 13-15% y neutrónicas del 15%, lo que implican porosidades reales en un intervalo de 5-10%. El problema de este almacén se encuentra en su constitución litológica, ya que la presencia de arcillas

podría dificultar la operación de inyección.

Los valores de porosidad sónica obtenidos para los niveles jurásicos, variables en un intervalo del 9 al 18%, especialmente una serie de zonas o tramos en el Malm inferior, en el Dogger y en Lias inferior, permite ser más optimista en cuanto a sus posibilidades (zonas 1,2,5 y 7).

#### g. Informe final del sondeo

El sondeo Mirambell-1 se sitúa en la estructura anticlinal del mismo nombre (Mirambell), cortando las series cretácica, jurásica y triásica, llegando hasta el zócalo hercínico (2654 m.)

En la figura 16 se presenta una lámina resumen del sondeo, que incluye aspectos relacionados con la litología, acuíferos explotados, calidad de las aguas, tramos con pérdidas durante la perforación, resultados de los ensayos de DST e información obtenida de las diagrfías.

Este sondeo corta varios niveles permeables que pueden ser utilizados como almacenes de residuos, al existir un material sellante a techo de los mismos, que impediría la migración de los residuos inyectados hacia otros materiales permeables, que supongan acuíferos explotados o con aguas dulces que puedan ser objeto de explotación.

Estos materiales permeables son los tramos superior (M3) e inferior (M1) del Muschelkalk, constituidos por dolomías y calizas dolomíticas de escasa porosidad (2-3 %), dada la escasa fracturación que estos presentan (no dieron pérdidas importantes durante la perforación -ver figura 16-).

El tramo M3 tendría como material sellante las arcillas y sales del Keuper (261 m. de espesor), altamente impermeables.

Asimismo, el tramo M1 tendría su sello en el M2, compuesto por arcillas y sales, muy impermeable, y de gran potencia (624 m.).

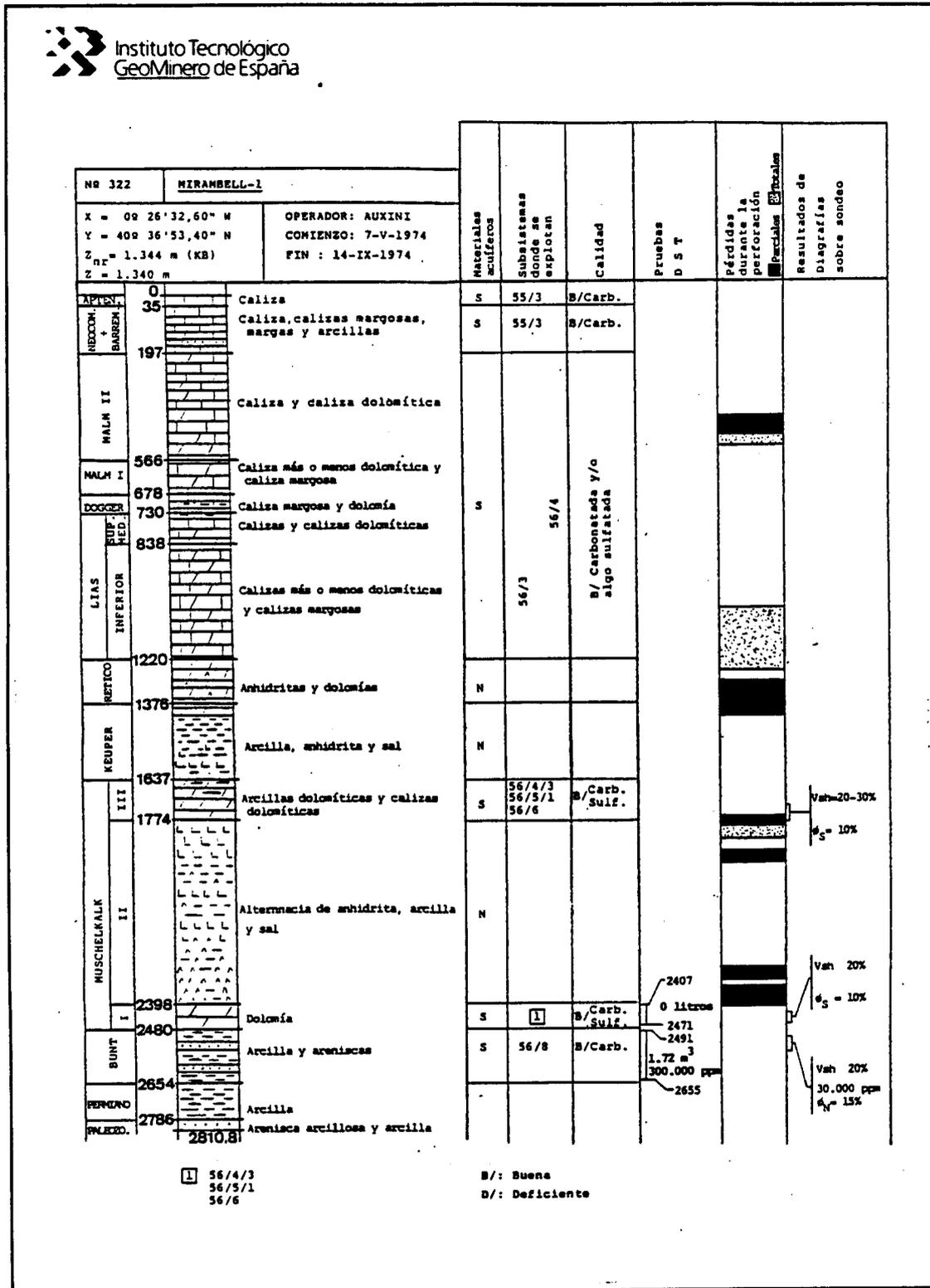
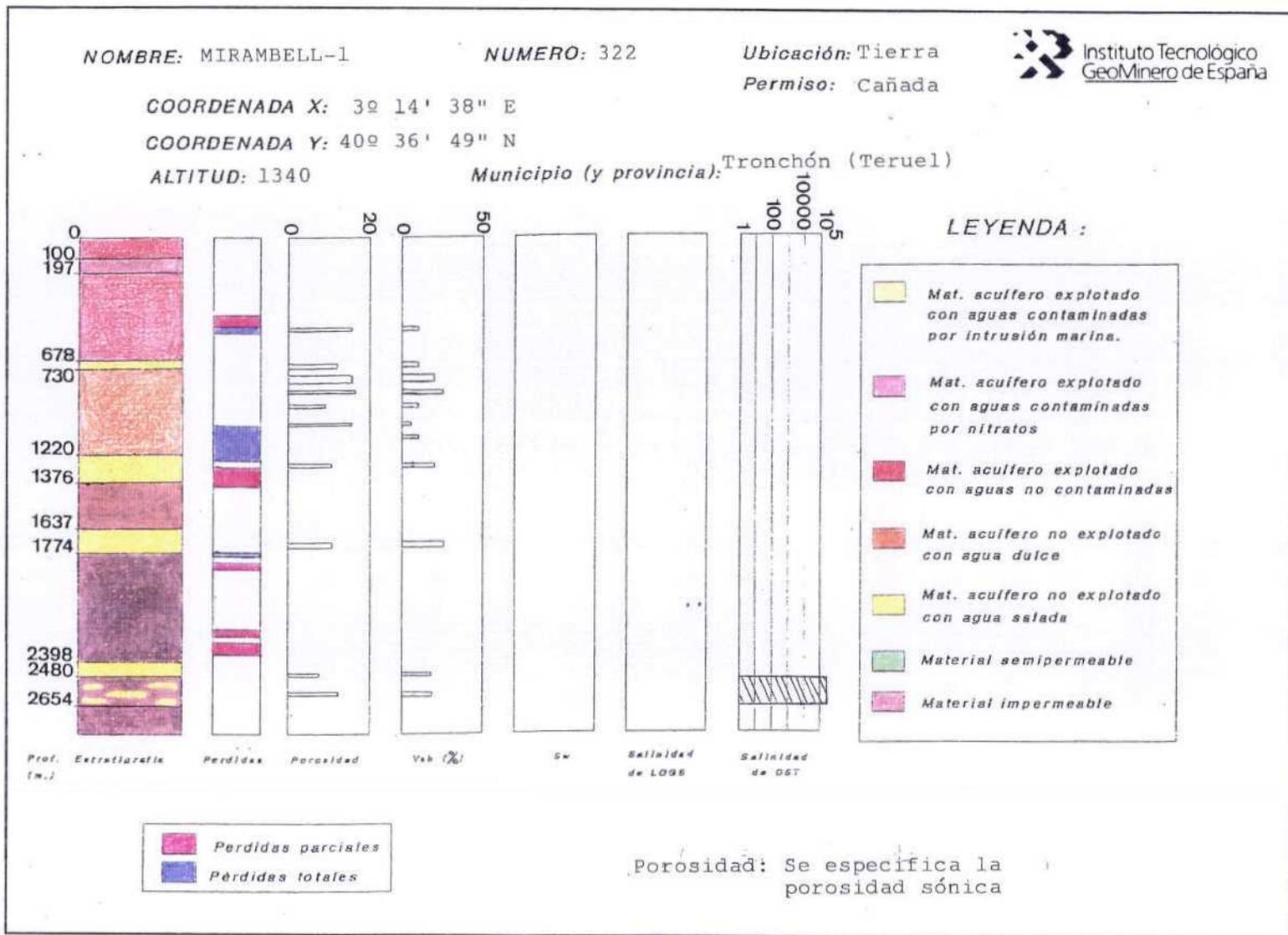


FIGURA 16, sondeo Mirambell-1.

En el caso del modelo de inyección que incluye el Bunt, las condiciones de capacidad de almacenamiento se ven favorecidas por la mayor porosidad, pero disminuidas por la discontinuidad lateral que presentan estas areniscas y la posible presencia de arcillas.

En la figura 17 aparece una lámina resumen correspondiente al sondeo Mirambell-1, donde se intenta recoger toda la información que puede interesar para la inyección de residuos, clasificándose las rocas, no en función de su litología, sino en función de sus características hidrogeológicas y de la calidad del agua que contienen.

FIGURA 17, Lámina resumen de la información aportada por el sondeo Mirambell-1 para la inyección de residuos.



#### 4.2.1.2 Bobalar-1

Y

#### 4.2.1.3 Bobalar-2

Dada la proximidad espacial de estos sondeos se van a presentar conjuntamente.

#### a. Descripción del modelo de inyección buscado

De los tramos atravesados por los sondeos, aparece como apto para almacenar residuos el tramo superior del Muschelkalk (M3), teniendo como cobertera el nivel de arcillas y sales del Keuper. Es por tanto, el modelo carbonatado-muschelkalk superior el asociado a la estructura geológica donde se ubican estos sondeos.

Por tanto, el único modelo que se observa en este área estaría constituido por los siguientes elementos:

- \* Material sellante: arcillas y sales del Keuper, con una potencia de 230-246 m., lo que supone una cobertera muy importante dado su espesor y continuidad lateral.
- \* Material almacén: dolomías arcillosas, con intercalaciones calcáreas del M3, con un espesor de 163 metros.

Además de los materiales considerados por el modelo de inyección descrito, existen una serie de niveles jurásicos, sobre todo en el Dogger y en el Lias, de alta porosidad que podrían ser importantes almacenes, pero que no se han podido estudiar con detalle al no disponer de información, constituidos por dolomías, calizas y calizas-dolomías arcillosas, con importante tectonización (fracturación).

#### b. Estratigrafía

El nivel sellante de éste, está caracterizado por una alternancia de arcillas dolomíticas, arcillas más o menos consolidadas, arcillas yesosas y sal masiva, que presenta una potencia total de 246 m. (de 1004 a 1250 m. de profundidad) en el Bobalar-1, y de 230 m. (de 970 a 1200 m. de profundidad) en el Bobalar-2. A continuación se detalla la composición de este tramo de techo a muro, para el sondeo Bobalar-1:

- \* KEUPER (DE 1004 A 1250 m.) -246 m. de espesor-

1004 a 1021: Arcilla dolomítica gris-verde oscuro y yeso blanco (IMPERMEABLE).

- 1021 a 1043: Alternancias de arcillas poco consolidadas color gris, yeso arcilloso gris claro y de ankerita (IMPERMEABLE).
- 1043 a 1118: Arcilla gris-negra espesa más o menos yesosa (IMPERMEABLE).
- 1118 a 1130: Arcilla blanca abigarrada. Presencia de cuarzos bipiramidales de color oscuro (IMPERMEABLE).
- 1130 a 1141: Sal (IMPERMEABLE).
- 1141 a 1160: Arcilla yesosa plástica versicoloreada. Cuarzos bipiramidales (IMPERMEABLE).
- 1160 a 1180: Sal blanca translúcida (IMPERMEABLE).
- 1180 a 1217: Arcilla gris-negra plástica a muy endurecida, salífera y yesosa. Con intercalaciones de sal (IMPERMEABLE).
- 1217 a 1234: Sal masiva blanca (IMPERMEABLE).
- 1234 a 1250: Arcilla gris-negra endurecida o abigarrada, blanda y espesa. Finas intercalaciones de dolomías arcillosas. Cuarzos bipiramidales (IMPERMEABLE).

El nivel almacén que incluye este modelo corresponde a una alternancia de dolomías y calizas muy compactas y poco tectonizadas, lo que implica su escasa porosidad y permeabilidad. A continuación se detalla la composición de este tramo en el sondeo Bobalar-1:

- \* MUSCHELKALK SUPERIOR -M3- (DE 1250 A 1390 m.) -140 m. de espesor-
- 1250 a 1277: Intervalo compacto e impermeable, representado por una dolomía gris-negra arcillosa pasando a una arcilla endurecida dolomítica gris-oscuro. Numerosos niveles fosilíferos (SEMIPERMEABLE).
- 1277 a 1284: Caliza gris microcristalina y marga dolomítica endurecida de color negro (SEMIPERMEABLE).
- 1284 a 1305: Caliza gris compacta, microcristalina, con estratificación confusa y mayor carácter arcilloso hacia la base (PERMEABLE).
- 1305 a 1314: Calizas blancas a gris claro sublitográfica (PERMEABLE).

1314 a 1357: Calizas arcillosas gris oscuro microcristalinas con numerosas y finas intercalaciones caliza cristalina gris claro. Finas pasadas arcillo-carbonosas de tipo fluidal. Hacia la base alternancia de margas grises-verdosas y arcillas calcíferas (SEMIPERMEABLES).

1357 a 1379: caliza gris oscura microcristalina ligeramente agrietada, frecuentemente arcillosa (PERMEABLE).

1379 a 1390: Calizas muy fracturadas de color gris oscuro (PERMEABLES).

1390 a 1413: Dolomías gris oscuro localmente arcillosa. Intercalaciones de arcilla gris-verde hojosa y raramente yesosa, y de caliza cristalina (SEMIPERMEABLE).

En la figura 18 se ofrecen los cortes estratigráficos de ambos sondeos.

### c. Estructura geológica

Se sitúan ambos sondeos sobre la estructura de Cincorres, formación anticlinal cerrada, de dirección Norte-Sur, que constituye una de las 4 grandes estructuras existentes en la cubeta del Maestrazgo muy influenciada por las direcciones estructurales catalanides que ibéricas.

La estructura es perfectamente cartografiable en superficie, con flancos cretácico-jurásicos y núcleo jurásico.

Se trata de una estructura de 20 Km según la dirección del eje y de 6 Km en la dirección perpendicular, presentando en superficie morfología de domo anticlinal cerrado de 100 km<sup>2</sup>.

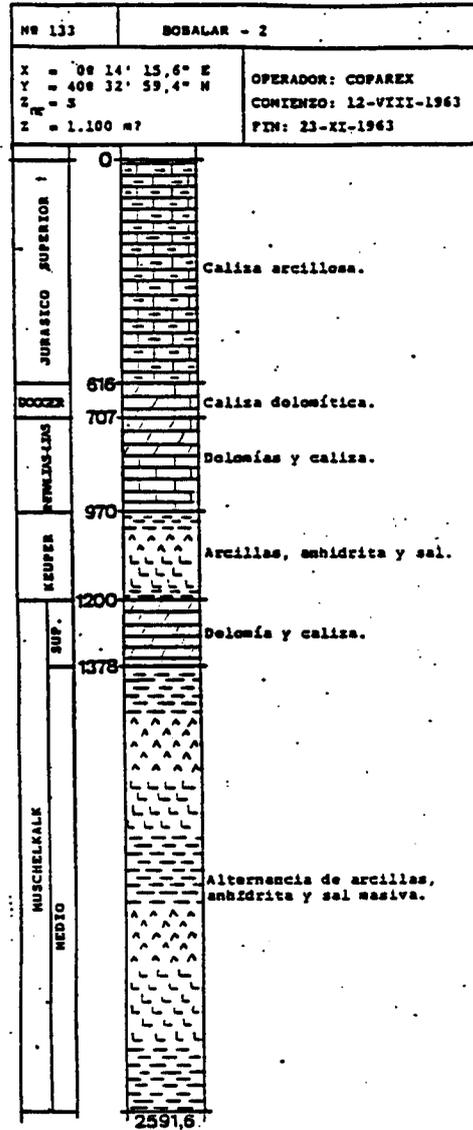
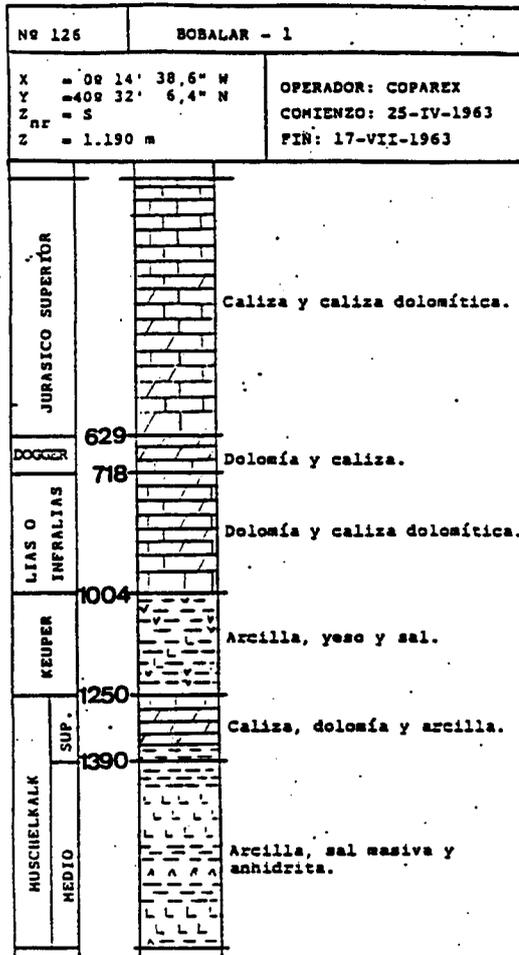


FIGURA 18, Cortes estratigráficos de los sondeos Bobalar-1 y bobalar-2.

#### d. Diagramas y pruebas bases del estudio

Para estos sondeos se ha dispuesto de la siguiente información sobre diagramas:

##### Bobalar-1:

GAMMA RAY+NEUTRON.....800 a 1860 m.  
 LATEROLOG+POTENCIAL ESPONTANEO...1000 a 1650 m.  
 MICROLOG+MICROCALIPPER.....879 a 1496 m.

##### Bobalar-2:

LATEROLOG+POTENCIAL ESPONTANEO...1100 a 1750 m.  
 MICROLOG+MICROCALIPPER.....1150 a 1375 m.  
 GAMMA RAY+NEUTRON.....600 a 1700 m.

Las pruebas de DST realizadas en el sondeo Bobalar-1, arrojaron los siguientes resultados:

Nivel testificado	Intervalo (m.)	Resultados
Techo del M3	1249,00 a 1270,80	Seco. Zona testificada desprovista de permeabilidad
M3	1272,70 a 1295,00	Recogidos 450 litros de lodo y agua, con una salinidad estimada de 100.000 ppm
M3	1295,00 a 1313,80	Recogidos 300 litros de lodo y agua, con una salinidad estimada de 100.000 ppm
Base del M3 (zona con pérdidas)	1357,00 a 1389,00	Recogidos 700 litros de lodo perdidos durante la perforación y agua dulce del tanpón situado en el fondo del pozo para eliminar los estancamientos

#### e. Resultados de la interpretación de las diagramas

Atendiendo exclusivamente a los niveles incluidos en el modelo de inyección descrito, sólo se ha podido hacer uso de las diagramas eléctricas, que nos han permitido llegar a ciertas conclusiones sobre la salinidad de las aguas de formación del nivel almacén considerado, así como una aproximación a los valores de saturación en agua (Sw).

No se ha podido calcular valores de porosidad, si bien se ha acudido a los que aparecen en el informe de los sondeos, que por otro lado, son similares a los recalculados para estos niveles en otros sondeos.

En el siguiente cuadro se expresan estos valores:

Horizonte geológico: MUSCHELKALK SUPERIOR -M3-			
Intervalo (m.)	POROSIDAD NEUTRONICA	(%) REAL	PERMEABILIDAD
1250 a 1284	2 - 3	1	nula
1284 a 1313	2 - 3	0.5	casi nula
1357 a 1390	3	-	-

Asimismo la interpretación de los ensayos de DST ofrece valores de permeabilidad, para los tramos investigados (excepto el n°1), muy bajos o casi nulos:

INTERVALO	T(min)	t(min)	Kg/cm <sup>2</sup>		M	Q(BPD)	h	k/μB	K
			Pisi	Pfsi					
DST N°2	90	60	169	170	2.513	45	73	39,7	12
DST N°3	90	60	170	172	5.026	30,3	62	15,8	5
DST N°4	114	60	176	179	6,488	55,8	102	13,6	4

BPD:barriles por día

Los resultados de la interpretación de las diagrfías quedan expresados en los cuadros siguientes:

ZONAS ALMACEN sondeo BOBALAR-1				CONTENIDO EN ARCILLAS	
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPEJOR (m.)	LITOLOGIAS	GR (GAPI)	Vsh (%)
1	1250	21	Dolomías (#)	-	30
2	1272	22	Dolomías (#)	-	45 (a)
3	1295	19	Calizas	-	40
4	1358	31	Calizas	-	30

(#) con pasadas de arcillas

(a) tramo superior 60%  
tramo inferior 40%

ZONA	ESPELOR (m.)	POROSIDAD (%)	F	T* (°C)	Rt (Ω)	Rw (Ω)	Sw (%)	Salinidad (ppm)
1	21					0,024		300.000
2	22					0,024		300.000
3	19				10	0,012		>300.000
4	31				3	0,031		180.000

Para el sondeo Bobalar-2:

ZONA	PROFUND. (m.)	ESPELOR (m.)	F	T* (°F)	Rt (Ω)	Rw (Ω)	Sw (%)	Salinidad (ppm)
1	1231	8		86	200		<10	>300.000
2	1316	53		86	50		70	300.000

#### f. Estudio de posibilidades

El modelo de inyección previsto presenta ciertos aspectos positivos dadas las características del material sellante, de muy alta impermeabilidad y gran espesor (230-246 m.), pero por contra, la escasa porosidad (1%) y la baja permeabilidad del almacén (4-34 m/día), suponen una valoración negativa del modelo.

#### g. Informe final de los sondeos Bobalar

Los sondeos Bobalar-1 y Bobalar-2 se ubican sobre la estructura anticlinal cerrada de Cinctorres, cuyo eje tiene dirección N-S e importante buzamiento (>30°) en el flanco este.

Estos sondeos cortan las series jurásica y parte de las triásicas, no llegando al tramo inferior del Muschelkalk, permitiendo reconocer varios niveles permeables, pero tan sólo el nivel correspondiente al Muschelkalk superior (M3) presenta ciertas condiciones para almacenar los residuos.

Los niveles jurásicos, aún siendo materiales de gran porosidad y buena permeabilidad, en función de su gran fracturación, no presentan importantes niveles sellantes, lo que no asegura la estanqueidad del almacén. Sólo un estudio de detalle de estos tramos permitiría establecer la

entidad de los niveles sellantes, y de esta forma, evaluar las condiciones de estanqueidad.

El único nivel de los atravesados, que en principio, presenta las condiciones de estanqueidad adecuadas (es decir, la existencia de una capa sellante de gran potencia, extensión y altamente impermeable) es el tramo superior del Muschelkalk (M3). Se trata de un nivel con alternancia de calizas y dolomías, con pasadas de arcillas, perfectamente sellado por el nivel salífero superior (Keuper). Ambos constituyen un modelo ideal, despreciando la tectónica zonal, para la inyección.

Si bien, la escasa porosidad (1%) y baja permeabilidad (4-34 m/día, según tramos) del nivel carbonatado M3, en razón de su escasa tectonización, disminuye las posibilidades de inyección.

En la figura 19 se ofrece una lámina resumen de la información aportada por el sondeo Bobalar-1 para la inyección de residuos. Y en la figura 20 para el sondeo Bobalar-2.

=



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**NOMBRE:** Bobalar-1

**NUMERO:** 126

**Ubicación:** Tierra

**Permiso:**

**COORDENADA X:** 30 26' 32"

**COORDENADA Y:** 40 32' 02"

**ALTITUD:** 1.190

**Municipio (y provincia):** Cincorres (Castellón)

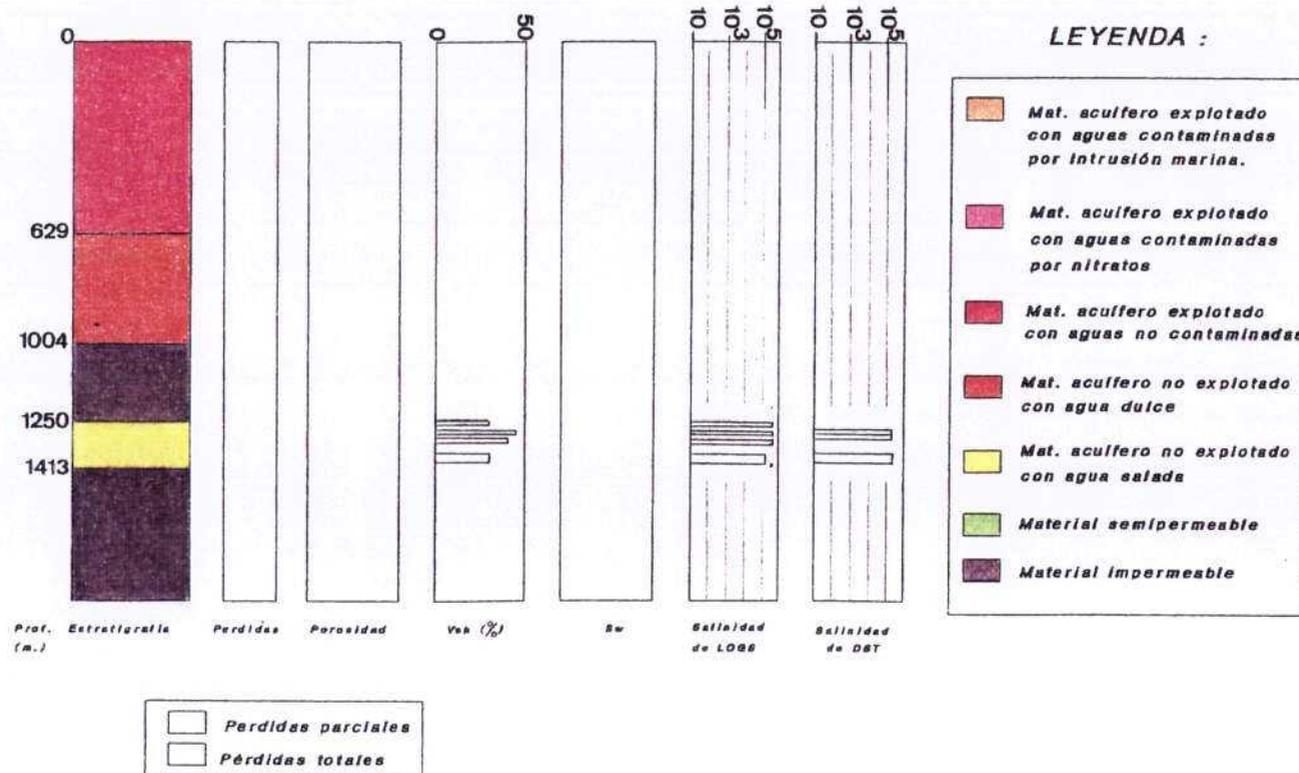


FIGURA 19, Lámina resumen de la información aportada por el sondeo Bobalar-1 para la inyección de Residuos.

**NOMBRE:** Bobalar-2

**NUMERO:** 133

**Ubicación:** Tierra

**COORDENADA X:** 39 27' 03" E

**Permiso:**

**COORDENADA Y:** 409 32' 55" N

**ALTITUD:** 1.145 m.

**Municipio (y provincia):** Cincorres (castellón)

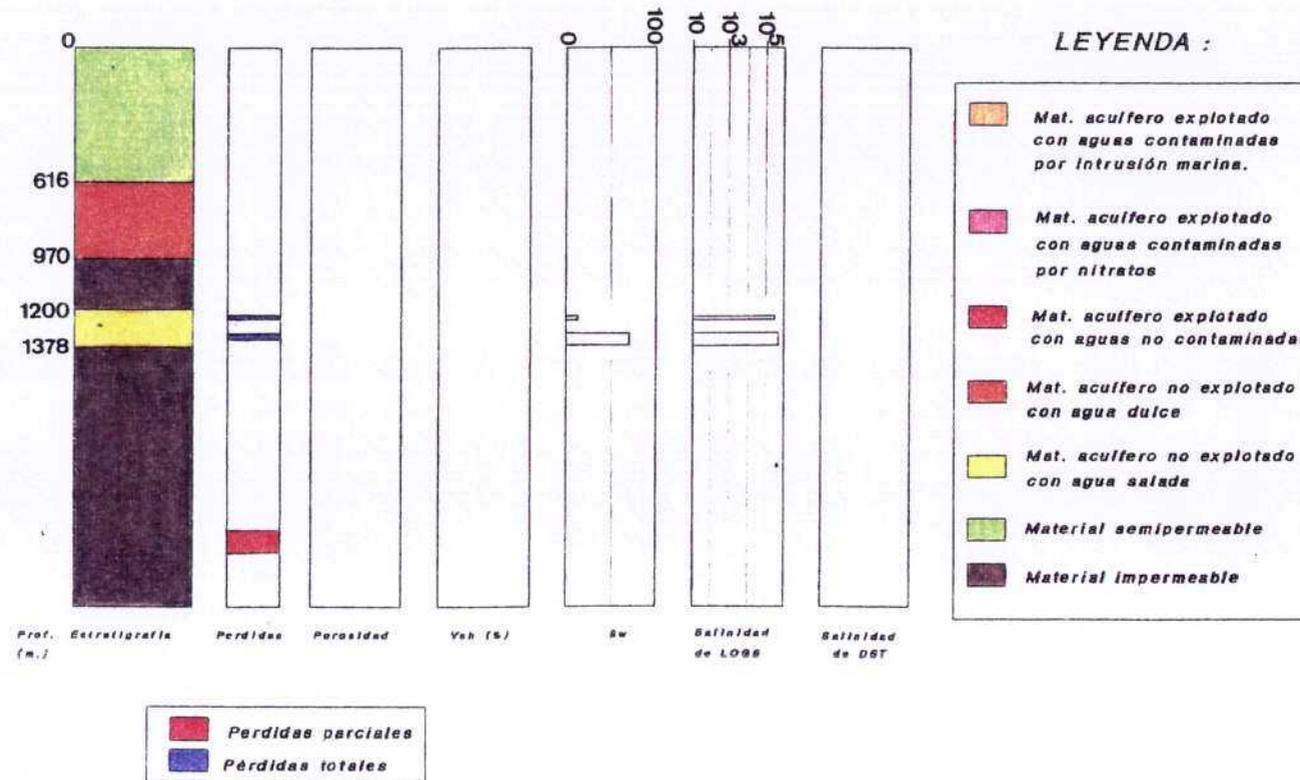


FIGURA 20, Lámina resumen de la información aportada por el sondeo Bobalar-2 para la inyección de Residuos.

#### 4.2.1.4 Salsadella-1

##### a. Descripción de los modelos de inyección buscados

Atendiendo a los niveles cortados por el sondeo se puede definir dos modelos de inyección:

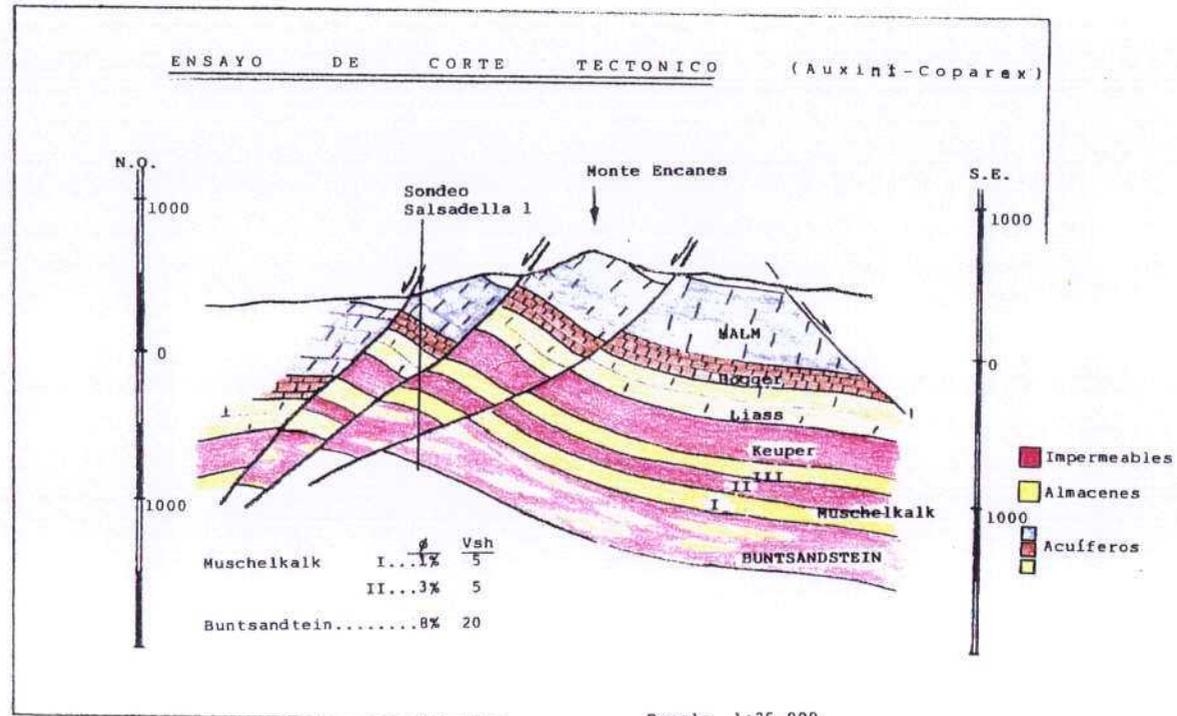
- \* Modelo 1, definido en base a las arcillas, dolomías y anhidritas del Muschelkalk medio (M2), como cobertera, y a las dolomías y calizas con pasadas de arcillas y anhidritas del tramo inferior del M2 y el Muschelkalk inferior (M1). Coincide con el modelo carbonatado-muschelkalk inferior.
- \* Modelo 2, definido en base a las formas lenticulares de areniscas del Bunt, incluidas en un medio arcilloso impermeable. Corresponde con el modelo triásico profundo.

Atendiendo a la interpretación geológica dada para la zona donde se ubica el sondeo (ver figura 21), se puede definir un tercer modelo.

Este tercer modelo quedaría claramente definido al Sureste del sondeo Salsadella-1 (ver figura 21), en base a los siguientes niveles:

- \* Nivel sellante: tramo de arcillas rojas, yesos y sales del Keuper, con una potencia estimada de 200 mts. y gran impermeabilidad.
- \* Nivel almacén: tramo superior carbonatado del Muschelkalk (M1) de unos 100 mts. de potencia, que no es cortado por el sondeo, debido a los accidentes tectónicos que acompañan a la zona donde este se ubica, pero que si es cortado por otros sondeos como el Mirambell-1 o los Bobalar, de forma que está perfectamente definido.

Este modelo de inyección corresponde al carbonatado-muschelkalk superior.



Tanto en el Muschelkalk como en el Buntsandtein aparecen aguas muy saladas, con concentraciones, según los logs de resistividad, de hasta 300.000 ppm.

FIGURA 21, Ensayo de corte tectónico en el área donde se sitúa el sondeo Salsadella-1, realizado por la misma empresa que ejecutó el sondeo (AUXINI).

## b. Estratigrafía

Sólo pueden ser descritos los niveles correspondientes a los modelos 1 y 2, ya que los incluidos en el modelo 3, no son cortados por el sondeo, si bien se hace referencia a ello en otros sondeos donde son cortados.

\* **MUSCHELKALK MEDIO -M2-** (DE 511 A 646 m.) -135 m. de espesor atravesado, estimándose un espesor real de 150 m.-

511 a 610: Alternancia de anhidritas, arcillas gris oscuro y dolomargas beige-gris con pasadas y bancos de dolomías arcillosas gris oscuro o bandeadas de aspecto sacaroideo con fracturas y cavidades rellenas de anhidritas (**IMPERMEABLE**).

610 a 646: Tramo de igual composición que el anterior pero con predominio de los carbonatos, dolomías y calizas dolomíticas gris-beige (**SEMIPERMEABLE**).

\* **MUSCHELKALK INFERIOR -M1-** (DE 646 A 818 m.) -172 m. de espesor-

646 a 818: Alternancia en bancos de 10-15 m. de calizas microcristalinas grises parcialmente recristalizadas y dolomitizadas que localmente contiene estiolitos y dolomías calcáreas gris oscuro, de microcristalinas a sacaroideas, localmente arcillosas con fracturas rellenas de yeso y anhidrita. Ocasionalmente pasadas de anhidrita masiva (especialmente a techo y muro de la formación) y dolomargas beige algo anhidrítica (**POCO PERMEABLE**).

\* **BUNTSANDSTEIN** (DE 818 A 1014 m.) -196 m. de espesor-

818 a 849: Facies Röt: arcilla rojo ocre algo dolomítica con pequeño contenido en mica. Hacia la base pasadas de areniscas de grano fino y limonitas rojo oscuro (**IMPERMEABLE**).

849 a 1014: Alternancia de areniscas de grano fino a muy fino rojo ocre con gruesos cristales de mica, en general mal clasificadas, limonitas rojo oscuras micáceas y arcilla plástica rojo-ocre, algo micácea y dolomítica (**PERMEABLE discontinua**).

En la figura 22 se ofrece la columna estratigráfica del sondeo.

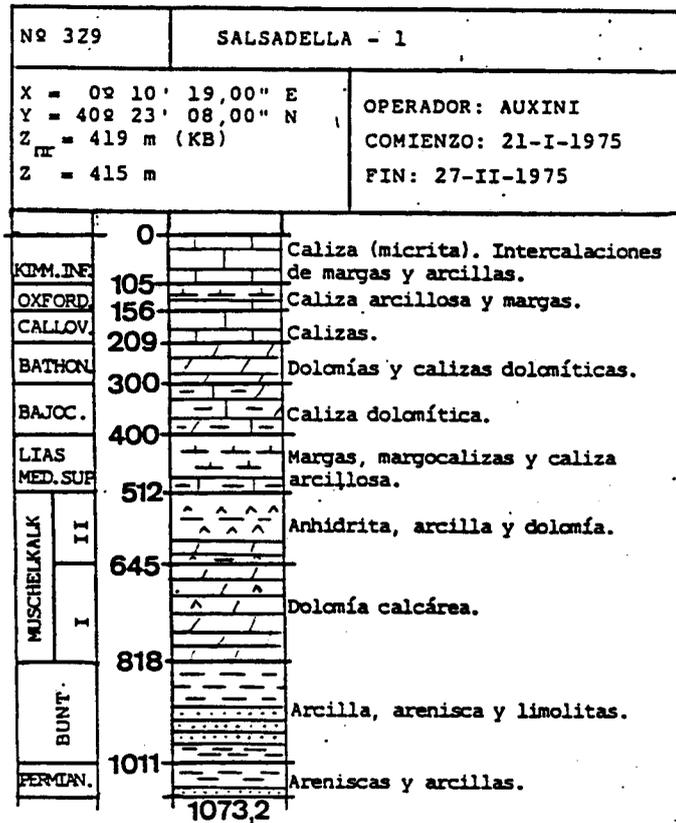


FIGURA 22, Columna estratigráfica atravesada por el sondeo Salsadella-1.

### **c. Estructura geológica**

El sondeo se ubica sobre el núcleo de la estructura anticlinal de Salsadella, al que corresponde edad jurásica.

La presencia de importantes fallas suprimen, en la columna descrita por el sondeo, niveles inferiores del Lias y superiores del Trias.

En la figura 21 se pone de manifiesto todo lo expresado anteriormente. Se observa claramente la existencia de una estructura anticlinal de dirección ibérica, fallada según una estructura en horst.

### **d. Diagrafías y pruebas bases del estudio**

Las diagrafías que han sido utilizadas en el estudio de las características de los materiales atravesados por el sondeo, han sido:

- BULK DENSITY.....567 a 1073 m.
- NEUTRON POROSITY LOG.....567 a 1073 m.
- GAMMA RAY+INTERVAL TRANSIT TIME.....567 a 1073 m.
- GAMMA RAY+INTERVAL TRANSIT TIME.....0 a 1073 m.
- SPONTANEUS POTENTIAL+LATEROLOG.....567 a 1073 m.

Durante la prospección del sondeo no se llevaron a cabo pruebas de producción.

**e. Resultados de la interpretación de las  
diagrfias**

Estos quedan reflejados en los siguientes cuadros:

ZONAS ALMACEN				CONTENIDO EN ARCILLAS	
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPEJOR (m.)	LITOLOGIAS	GR (GAPI)	Vsh (%)
1	590	47	Dolomías	27	15 - 20
2	602	14	Dolomías	27	15 - 20
3	860	67	Arenis-arcillas	10	5
4	870	35	Areniscas	0	2
5	645	173	Dolomías (M1)	15-20	5

El dato ofrecido por Vsh(%) no es el contenido real en arcillas de la formación, simplemente se trata de un valor relativo del contenido en arcillas, calculado a partir del GAMMA RAY.

La zona 5 corresponde a todo el nivel muschelkalk inferior (M1).

ZONAS ALMACEN			POROSIDADES				
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPEJOR (m.)	Densidad (g/cc)	$\phi_D$ (%)	Sónico ( $\mu$ s/ft)	$\phi_S$ (%)	$\phi_N$ (%)
1	590	47	2,70	8	53	8-10	2-3
2	602	14	2,60	12-14	60	11-14	3
3	860	67	2,56	7	75	15-17	14
4	870	35	2,52	8,5	80	18-21	14
5	645	173	2.78	1-4	42	0-3	1

Con estos datos de porosidades se puede acudir a una serie de gráficas empíricas que relacionan dos valores diferentes de porosidad (densidad-sónica-neutron), y ofrecen aproximaciones a datos reales sobre porosidades y contenidos de arcillas en porcentajes (p).

Los resultados de la aplicación de estas gráficas han sido los que se expresan en el cuadro siguiente:

ZONA Nº	Densidad-Neutron $\phi_D - \phi_N$		Densidad-Sónica $\phi_D - \phi_S$		Bulk density-Neutron $d_B - \phi_N$	
	$\phi$	p	$\phi$	p	$\phi$	p
1	-	-	8	5	-	-
2	-	-	11	5	2	5
3	4	20	5	20	7	20
4	7	15	5	22	10	18
5	1	-	2	5	-	-

Los altos valores de porosidad densidad sónica para las dolomías de la base del M2 (zonas 1 y 2) pueden ser debidos a la presencia de capas de arcillas y al relleno de las fisuras por anhidrita. Por otra parte los bajos valores de densidad neutrónica implican la práctica ausencia de agua intersticial, y por tanto, de porosidad. Se asigna una porosidad real aproximada del 3%.

Para las areniscas del Bunt se estima una porosidad del 8%.

Las diagrfías eléctricas han permitido elaborar el siguiente cuadro:

ZONA	ESPESOR (m.)	POROSIDAD (%)	F	T* (°F)	Rt ( $\Omega$ )	Rw ( $\Omega$ )	Sw (%)	Salinidad (ppm)
1	47	3	1180	85	-	0,017	-	>300.000
3	67	8	140	100	7	0,010	45	>300.000

En el nivel inferior del Muschelkalk (M1) no se ha distinguido ningún tramo con permeabilidad, a partir de la reinterpretación de las diagrfías. Se muestra como un nivel muy compacto y con escasa fracturación (además las fracturas se encuentran recristalizadas). Es un tramo de la base del M2 el que si presenta cierta porosidad.

Se ha aplicado el método Tixier para el cálculo de permeabilidad en las areniscas del Bunt, mostrando valores de 60 md (unos 50 m/día).

Por otra parte, la reinterpretación de las diagramas ha permitido establecer valores de porosidad y contenidos relativos en arcillas (Vsh), para los niveles jurásicos atravesados (Malm, Dogger y Lias), que quedan reflejados en el cuadro siguiente:

ZONA	PROFUND. (m.)	ESPESOR (m.)	LITOLOGIAS	CONT.ARCILLAS		POROSIDAD	
				GR	Vsh	t	$\phi_s$
6	209	50	Caliza-dolom.	50	2	67	14-19
7	265	25	Caliza-dolom.	45	0	95	35
8	355	15	caliza-dolom.	60	5	95	35
9	Lias med-sup 400	112	Dolom-calizas margosas	75	35	55	10

Según estos resultados aparecen tres niveles muy interesantes en los niveles Bathoniense y Bajociense (Dogger), y sobre todo en el Bathoniense al que corresponden las zonas 6 y 7 descritas.

#### f. Estudio de posibilidades

En base a la interpretación geológica de la zona, la existencia de importantes fracturas dificultan la inyección en la zona próxima al sondeo, al tratarse de fracturas abiertas que ponen en contacto los hipotéticos niveles almacén con materiales acuíferos que contienen posiblemente, de aguas dulces (ver figura 21). En cambio, en el flanco SE de la estructura se dan condiciones adecuadas para la inyección sobre los modelos definidos, ya que el potente paquete salífero-arcilloso que constituye el Keuper aísla perfectamente los hipotéticos niveles almacén de los acuíferos con recursos explotables, no existiendo tectonización importante.

Los modelos 1 y 3 presentan el inconveniente de la escasa porosidad de los carbonatos del Muschelkalk (1-3 %), si bien los sellos asociados son importantes. (M2 y Keuper).

Es el modelo 2 el que presenta mejores posibilidades de almacenamiento, con porosidades reales próximas al 8% y permeabilidades calculadas de 50 m/día.

Por otra parte los logs eléctricos ponen de manifiesto salinidades muy altas para las aguas contenidas en las formaciones del Muschelkalk y Bunt (>300 gr/litro) y saturaciones en agua del orden del 45% en el Bunt.

Los materiales jurásicos, sobre todo los niveles inferiores del Dogger, presentan interesantes condiciones de almacenamiento, dada su elevada microtectonización (fracturación), con porosidades sónicas de hasta el 35%, lo que implica porosidades reales próximas al intervalo 10-12%, la inyección estaría justificada en el flanco SE de la estructura en virtud de la existencia de niveles margosos de cierta entidad en la base del Malm y techo del Dogger (Oxfordiense-Calloviense..Vsh 25%), si bien la escasa profundidad a la que estos niveles se encuentran (<1.000 m.), y el hecho de que en la zona NO lleguen a aflorar, implica la eventualidad de un lavado por aguas meteóricas, con la consiguiente existencia de aguas dulces que constituyan un recurso explotable. La inexistencia de un nivel similar al Keuper por encima de estos horizontes geológicos, disminuye las posibilidades de inyección.

#### g. Informe final del sondeo

El sondeo Salsadella-1 se ubica sobre la estructura anticlinal del mismo nombre, que se encuentra fallada en forma de horst en su flanco NO, lo que da origen a un hiato de correlación en la columna estratigráfica descrita por el sondeo.

El flanco SE de la estructura presenta mejores posibilidades para la inyección, en base a los modelos establecidos, representando las areniscas del Bunt el nivel almacén más propicio, si bien, presentan el inconveniente de la pérdida lateral de capacidad de almacenamiento, dado que constituyen formas lenticulares incluidas en un medio muy impermeable.

Los modelos que describen como almacenes a los carbonatos del Muschelkalk, sólo presentan cierto interés en un nivel dolomítico de la base del M2, con escasa porosidad (3%).

Las posibilidades de inyección en niveles jurásicos de gran porosidad (Bathonense-Bajociense) son mínimas, ante la escasa entidad aislante de los niveles margosos Oxfordiense-Calloviense ante los fenómenos de lavado por aguas meteóricas.

En la figura 23 aparece una lámina que resume la información aportada por el sondeo Salsadella-1 para la inyección de residuos.



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

NOMBRE: Salsadella-1

NUMERO: 329

Ubicación: Tierra

Permiso:

COORDENADA X: 30 51' 29" E

COORDENADA Y: 40 23' 08" N

ALTITUD: 415 m.

Municipio (y provincia): Salsadella (Castellón)

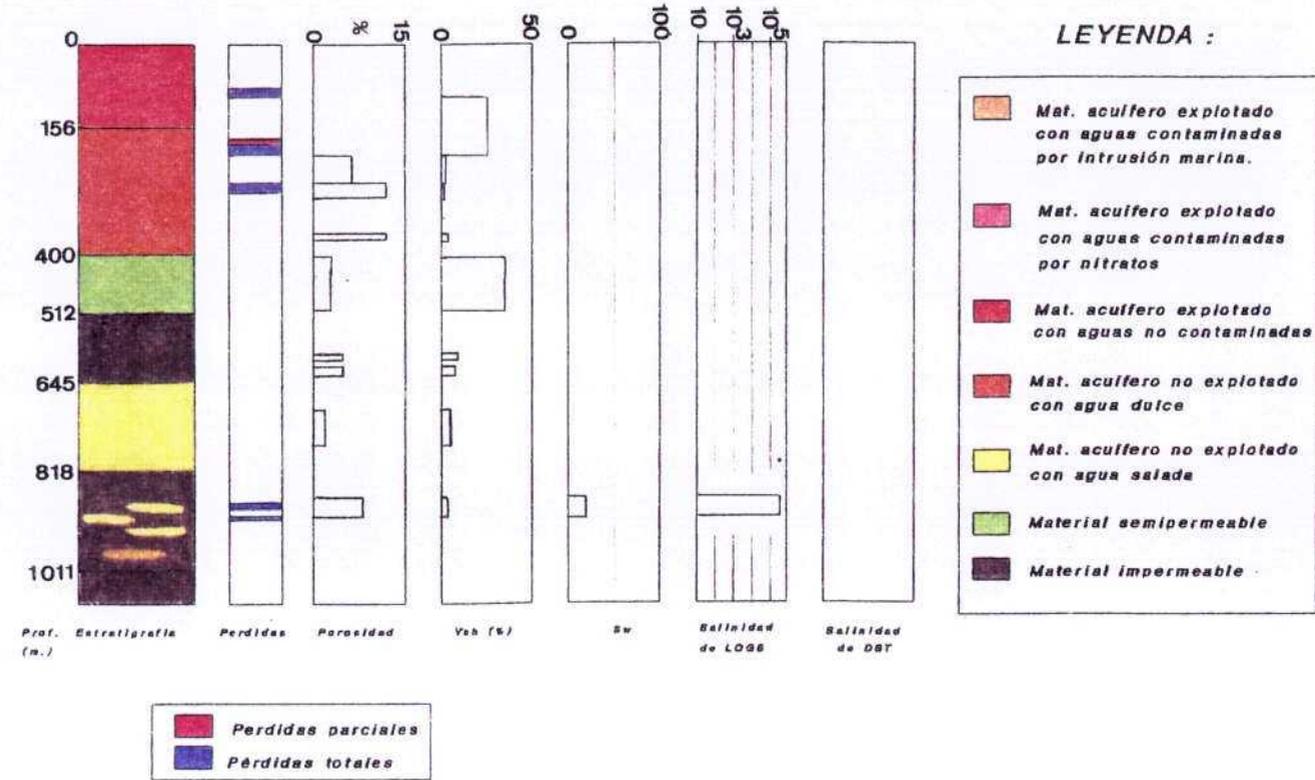


FIGURA 23, Lámina resumen de la información aportada por el sondeo Salsadella-1 para la inyección de Residuos.

#### 4.2.1.5 Maestrazgo-1

##### a. Descripción del modelo de inyección buscado

A la vista de los resultados estratigráficos del sondeo, aparece un modelo para inyección profundo, en base a los siguientes niveles:

- \* Nivel sellante: arcillas, sales y anhidritas del Keuper, tramo de gran potencia (267 m.) y muy alta impermeabilidad.
- \* Nivel almacén: formas lenticulares de areniscas del Buntsandstein.

Este modelo corresponde al modelo triásico profundo descrito.

Este sondeo pone de manifiesto la posibilidad de inyección en los niveles carbonatados jurásicos y cretácicos, si bien en los estudios de detalle aparecen reflejados los resultados de la investigación realizada.

##### b. Estratigrafía

Teniendo en cuenta el modelo definido, la estratigrafía correspondiente a los niveles incluidos en él, corresponden a:

- \* KEUPER (DE 2515 A 2782 m.) -267 m. de espesor-, se trata de un nivel evaporítico constituido por arcillas, anhidritas, margas, yesos, y posible existencia de sal.
- \* BUNTSANDSTEIN, formación de arcillas y areniscas, que aparecen en disposición alternante. Se trata de niveles de areniscas incluidas en un medio arcilloso.

En la figura 24 queda reflejada la columna estratigráfica asociada al sondeo Maestrazgo-1.

##### c. Estructura geológica

Se situó el sondeo en el anticlinal de las sierras de Valdanche y de Irta.

Esta estructura anticlinal quedó especificada mediante perfiles sísmicos.

Las dimensiones aproximadas de esta estructura anticlinal es de 4 km. en el sentido del eje y de 8 Km en el perpendicular, apareciendo como una forma muy cerrada en

la dirección NE-SW y compartimentada por fallas de dirección N-S. Es en esta dirección donde la estructura presenta mayor extensión, sobre todo hacia el flanco N, mientras que en el flanco Sur aparece una importante fractura, detectada por sísmica.

=

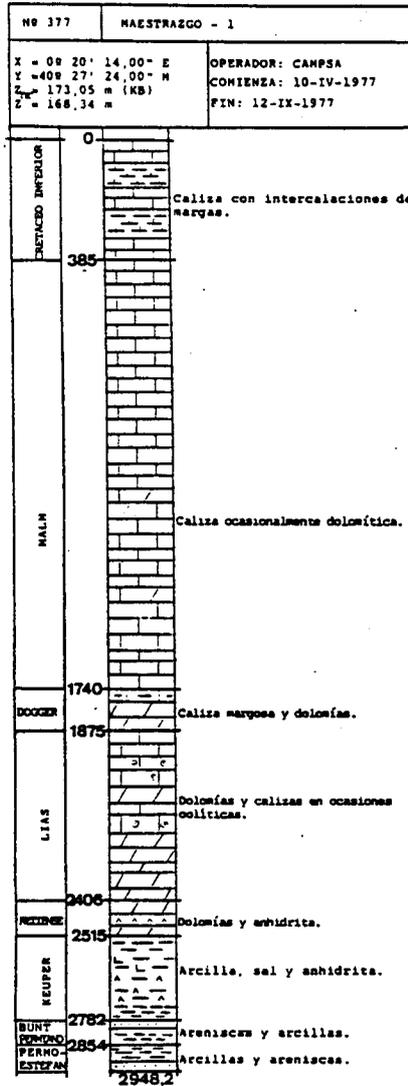


FIGURA 24, Columna estratigráfica del sondeo Maestrazgo-1

Por tanto, se puede asignar una superficie de unos 30 km<sup>2</sup> a esta estructura.

**d. Diagramas y pruebas bases del estudio**

Para la realización del estudio de los materiales geológicos que constituyen el modelo, se han utilizado las siguientes diagramas:

- CALIPPER + MICROLATEROLOG..... 2450 A 2900 m.
- CALIPPER+GAMMA RAY+INTERVAL TRANSIT TIME.2450 A 2900 m.
- CALIPPER+LATEROLOG+MICROSPHERICAL.....2150 A 2450 m.
- CALIPPER+LATEROLOG+MICROSPHERICAL.....2450 A 2900 m.
- CALIPPER + GAMMA RAY + NEUTRON POROSITY  
+ BULK DENSITY.....2150 A 2450 m.
- CALIPPER + GAMMA RAY + NEUTRON POROSITY  
+ BULK DENSITY.....2450 A 2900 m.
- RESISTIVITY (micronormal+microinverse) +  
+ CALIPPER + MICROLATEROLOG.....2250 A 2450 m.

Además de estas diagramas se ha contado con la información de varias pruebas de DST, situadas en niveles jurásicos y uno sólo en las areniscas del Buntsandstein.

**e. Resultados de la interpretación de las diagramas**

El resultado de la reinterpretación de las diagramas sobre las areniscas del Bunt han aportado los siguientes datos:

TRAMO	LITOLOGIA	GR	Vsh(%)	Densidad	$\phi_D$	Sónico	$\phi_S$	$\phi_N$
2761 a 2773 m.	Areniscas	30	25	2.55	5-8	70	11 a 13	12

Si se combinan los datos de porosidades obtenidos para los diferentes registros se puede presentar la tabla siguiente:

Densidad-Neutron $\phi_D - \phi_N$		Densidad-Sónica $\phi_D - \phi_S$		Bulk density-Neutron $d_B - \phi_N$	
$\phi$	p	$\phi$	p	$\phi$	p
4	15	10	5	5	20

Donde  $\phi$  es la porosidad real y p el contenido real en arcillas. Con los datos de esta tabla, se puede dar un valor medio de la porosidad real para las arenisca del Bunt del 6% y un contenido en arcillas medio del 12%.

La interpretación de las diagráfias eléctricas permite establecer que la saturación en agua de esta formación es del 50%, con una salinidad de más de 300.000 ppm. El agua de esta formación resulta, por tanto, ser muy salina e intraformacional. No existiendo lavado por aguas meteóricas, las cuales no han llegado a rebasar el sello salino (Keuper), que actúa como perfecto aislante.

La prueba de DST que se realizó a esta profundidad arrojó los siguientes resultados:

El tramo analizado fue el comprendido entre los 2856 y 2948,2 m. de profundidad, obteniéndose agua y lodo, estimándose una salinidad, para el agua de la formación, de 270.000 ppm. Se recuperaron 2400 litros, no cerrando el packer totalmente.

También se han investigado ciertos niveles del jurásico profundo, aportando datos básicos para la interpretación de detalle realizada posteriormente. Los resultados de la reinterpretación quedan reflejados en los siguientes cuadros:

ZONAS ALMACEN				CONTENIDO EN ARCILLAS	
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	LITOLOGIAS	GR (GAPI)	Vsh (%)
1	2257	14	Calizas	15	5
2	2295	30	Calizas	30	25
3	2360	15	Calizas	10	5
4	2435	20	Dolomías	10	5

ZONAS ALMACEN			POROSIDADES				
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	Densidad (g/cc)	$\phi_D$ (%)	Sónico ( $\mu s/ft$ )	$\phi_S$ (%)	$\phi_N$ (%)
1	2257	14	2.60	10	-	-	5
2	2295	30	2.45	16	-	-	15
3	2360	15	2.30	24(#)	-	-	25(#)
4	2435	20	2.75	6	-	-	9

(#) Presencia de importantes cavernas.

Densidad-Neutron $\phi_D - \phi_N$		Densidad-Sónica $\phi_D - \phi_S$		Bulk density-Neutron $d_B - \phi_N$	
$\phi$	p	$\phi$	p	$\phi$	p
3	5	-	-	2	5
12	5			15	5
-	-	-	-	20	5
5	12	-	-	-	-

Los registros eléctricos, dadas las altas resistividades que presentan los carbonatos, unido a la intensa fracturación que presentan los niveles definidos, imposibilitan una interpretación correcta de las diagrfías.

En cualquier caso, se observa que los materiales jurásicos profundos presentan unas excelentes condiciones de almacén.

#### f. Estudio de posibilidades

En base a los resultados de la interpretación de las diagrfías y lectura de los datos de las pruebas de DST (ver figura 25, donde se muestra un cuadro resumen de la información obtenida del sondeo Maestrazgo-1), el modelo triásico profundo en esta zona parece, en principio atractivo, al estar constituido por un material sellante de gran potencia y alta impermeabilidad (arcillas, anhidritas y yesos del Keuper), y un material relativamente poroso y permeable, como son las areniscas del Bunt, que contienen aguas muy saladas intraformacionales, no habiendo sufrido

lavado por aguas meteóricas, lo que implica el aislamiento que supone la existencia del nivel salino (Keuper). Esto nos garantiza la importante barrera sellante-aislante que constituyen estos materiales del triásico superior.

Dada la importante tectonización existente en la zona, habría que estudiar con detalle cualquier posibilidad de inyección teniendo en cuenta potenciales fugas de residuos a través de fracturas, hacia niveles que contienen aguas dulces en otras zonas distantes de la estructura estudiada.

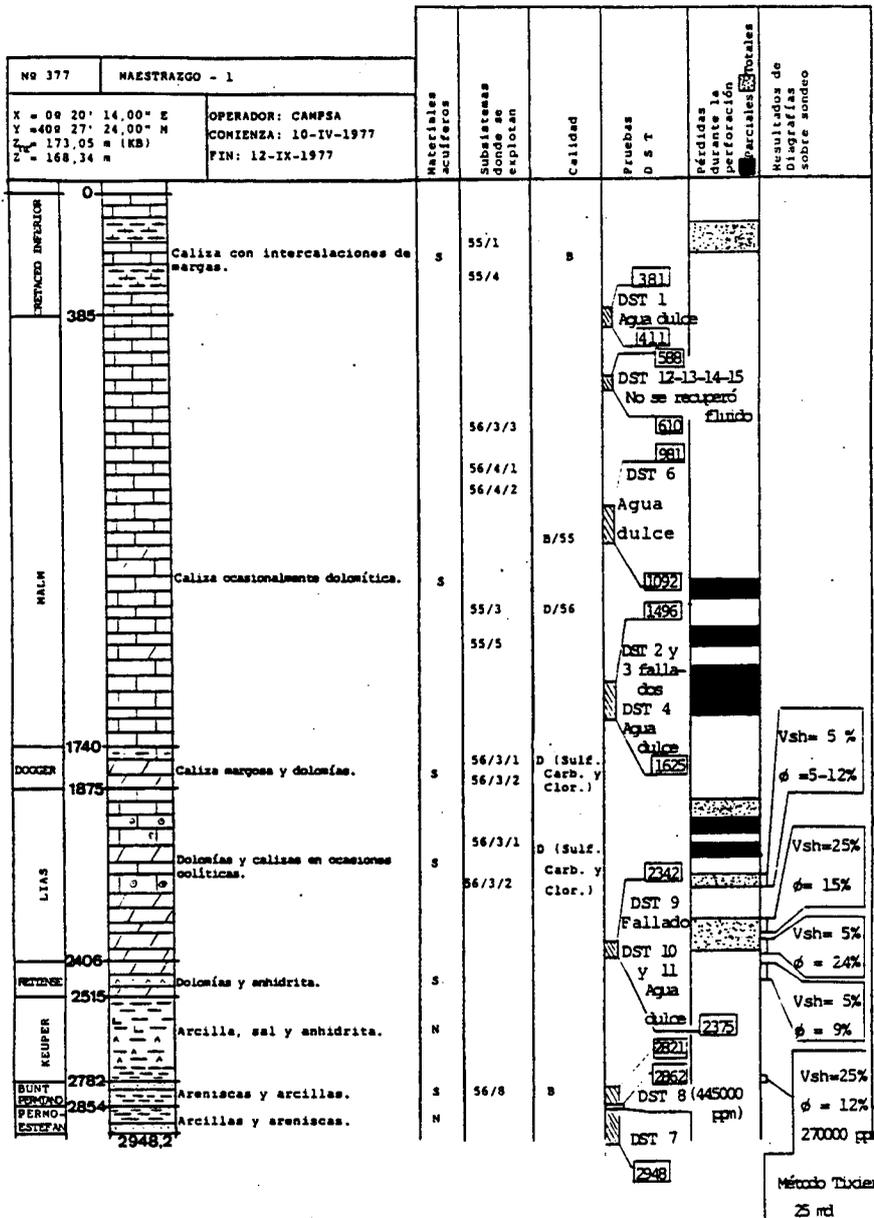


FIGURA 25, Cuadro resumen de la información obtenidas de la reinterpretación de diagramas.

#### g. Informe final

El sondeo Maestrazgo-1 se ubica en la estructura anticlinal de las Sierras de Valdanche e Irta, cortando las series del Cretácico inferior, Jurásico y Triásico, llegando al zócalo hercínico (2854 m.).

El modelo de inyección posible, a la vista de los resultados del sondeo, queda establecido en base a los niveles arcilloso-salinos del Keuper, como sello, y las areniscas lentejonales del Bunt como almacén.

El nivel arcilloso-salino del Keuper, de gran potencia (267 m.), se presenta como muy impermeable, aislando a las areniscas del Bunt, de la acción de las aguas meteóricas que han ido "lavando" los niveles superiores.

El nivel de areniscas del Bunt se presenta con porosidades del 8%, contenidos algo elevados en arcillas (> 10%) y relativa permeabilidad (60 md, aproximadamente 50 m/día, según el método Tixier).

La pérdida lateral de permeabilidad, dada las formas lentejonales de los posibles almacenes, presenta un inconveniente en el cálculo de posibilidades de almacenamiento.

En la figura 26 aparece una lámina resumen de la información obtenida para el sondeo Maestrazgo-1. No aparece ninguna información referida a los niveles cretácicos y jurásicos superiores puesto que estos serán objeto de un estudio de detalle.



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

NOMBRE: MAESTRAZGO-1

NUMERO: 377

Ubicación: Tierra

Permiso: SAN MATEO

COORDENADA X: 40 01' 27" E

COORDENADA Y: 40 27' 25" N

ALTITUD: 162,12 m.

Municipio (y provincia): Cáliz (Castellón)

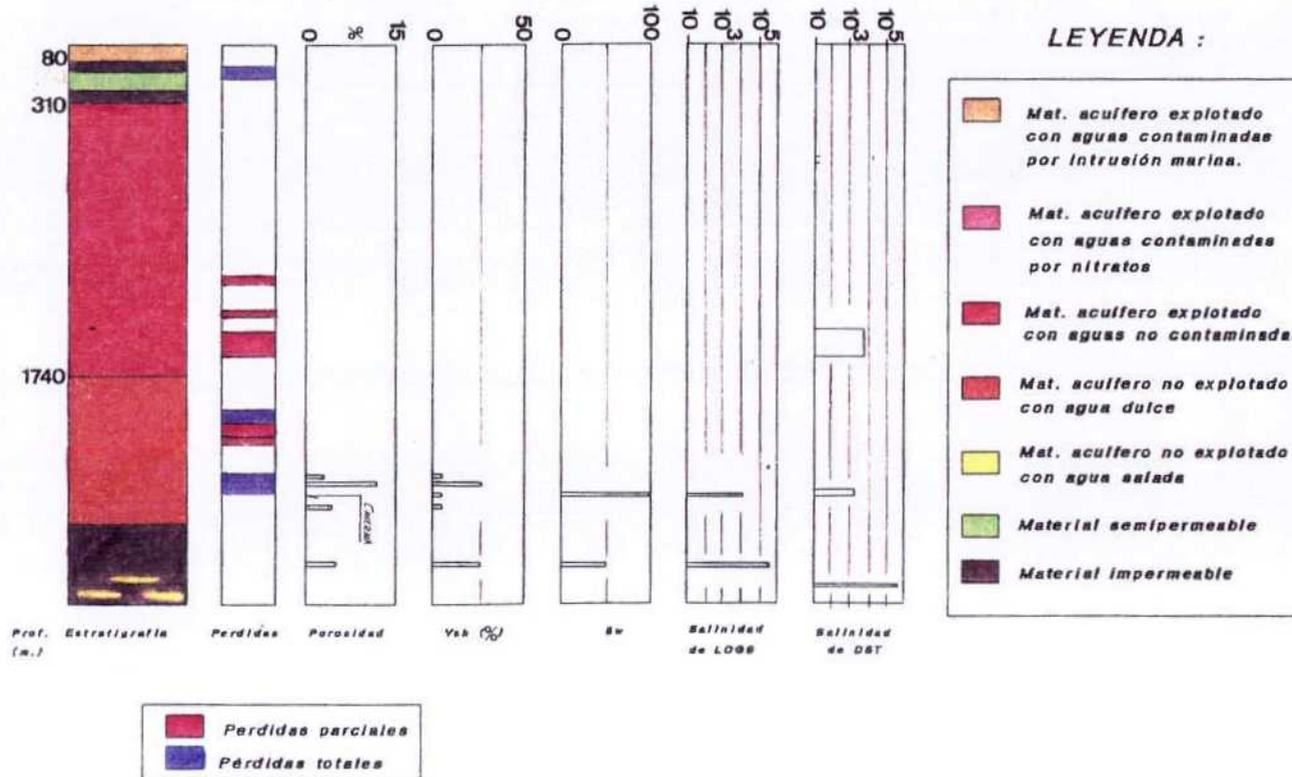


FIGURA 26, Lámina resumen de la información obtenida en el sondeo Maestrazgo-1.

#### 4.2.2 Sondeos marinos

La información que aportan los sondeos marinos no resulta en sí misma definitiva de cara al estudio de los modelos de inyección de residuos descritos, si bien, permitirán ejecutar correlaciones con sondeos terrestres, de forma que se conocer la geología en las zonas costeras, así como, interpretar la sismica marina. Por ello el estudio se hace más abreviado.

##### 4.2.2.1 Vinaroz-1

Este sondeo marino se sitúa a unos 10 kms. de la costa castellonense, entre Benicarló y Vinarós.

##### a. Estratigrafía

Los horizontes geológicos atravesados por el sondeo corresponden a:

- \* **PLIOCUATERNARIO** (de 0 a 846 m.), constituido por alternancia de areniscas, arenas, arcillas, limonitas y margas.
- \* **PLIOCENO** (de 846 a 1173 m.), se trata de un paquete margoso-arcilloso.
- \* **MESSIANIENSE** (Mioceno Superior) (de 1173 a 1601 m.), constituido por la alternancia de areniscas y margas.
- \* **CRETACICO INFERIOR** (de 1601 a 2065 m.), que incluye horizontes calcáreos (Aptiense), margocalizos (Barremiense-Hauteriviense) y de calizas micríticas con pasadas de margocalizas (Berriasiense-Valangiense).
- \* **JURASICO SUPERIOR (MALM)** (de 2065 a 2750 m.), que corresponde a tramos de dolomías, con zonas calizodolomíticas (Kimmeridgiense superior-Portlandiense) y de calizas y margas dolomíticas en el Oxfordiense superior-Kimmeridgiense inferior.

En la figura 27 aparece la columna estratigráfica asociada a este sondeo.

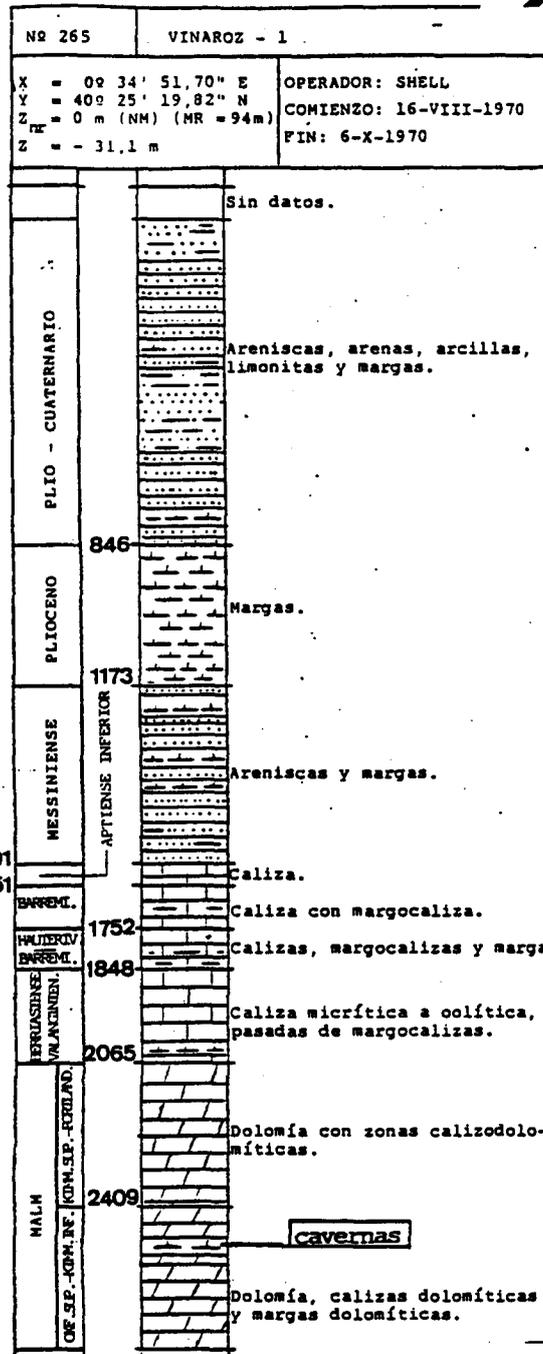


FIGURA 27, Columna estratigráfica asociada al sondeo marino Vinaroz-1.

### b. Diagramas y pruebas bases del estudio

En el estudio de diagramas se ha centrado en los niveles mesozoicos (Cretácico y Jurásico) definidos en el apartado anterior.

Las diagramas utilizadas han sido:

\* Para el Cretácico:

SPONTANEUS POTENTIAL + LATEROLOG ..... 1550 a 2050 m.  
 GAMMA RAY + INTERVAL TRANSIT TIME..... 1550 a 2050 m.  
 CALIPPER + GAMMA RAY + NEUTRON..... 1600 a 2050 m.

\* Para el Jurásico:

SPONTANEUS POTENTIAL + LATEROLOG ..... 2350 a 2650 m.  
 SPONTANEUS POTENTIAL + CALIPPER + INTERVAL  
 TRANSIT TIME.....2100 a 2400 m.  
 CALIPPER + GAMMA RAY + NEUTRON..... 2100 a 2700 m.

Además: GAMMA RAY+INTERVAL TRANSIT TIME+RESISTIVITY de 500 a 2700m.

Sólo una prueba de DST se llevó a cabo. El intervalo testificado fue de 2080 a 2097 m., obteniéndose lodo y agua de formación de la que se estima una salinidad de 22.000 ppm.

### c. Resultados de la interpretación de las diagramas

Para los diferentes tramos considerados en los niveles mesozoicos, los resultados de la interpretación de las diagramas quedan expresados en los siguientes cuadros:

ZONAS ALMACEN				CONTENIDO EN ARCILLAS	
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	LITOLOGIAS	GR (GAPI)	Vsh (%)
1	1635	40	Calizas	30	25
2	1840	50	Calizas	30	25
3	2085	10	Caliz.-dolom.	5	0
4	2500	-	Dolomías cavernosas		
5	2550	100	Dolomías	5	0

ZONAS ALMACEN			POROSIDADES				
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	Densidad (g/cc)	$\phi_D$ (%)	Sónico ( $\mu$ s/ft)	$\phi_S$ (%)	$\phi_N$ (%)
1	1635	40	-	-	55	6-8	2-4
2	1840	50	-	-	55	6-8	2-4
3	2085	10	2.56	10-15	55	6-12	8
5	2550	100	2.55	15-17	60	15	5(#)

(#) Porosidad neutrónica variable entre el 6 y el 10%, con valores máximos del 14%.

Densidad-Neutron $\phi_D - \phi_N$		Densidad-Sónica $\phi_D - \phi_S$		Bulk density-Neutron $d_B - \phi_N$		
$\phi$	p	$\phi$	p	$\phi$	p	
(3)	-	-	10	0	7	0
(5)	-	-	12	0	5	0

ZONA	ESPESOR (m.)	POROSIDAD (%)	F	T* (°F)	Rt ( $\Omega$ )	Rw ( $\Omega$ )	Sw (%)	Salinidad (ppm)
1	40	5		120	125	0,17	50	22.000
2	50	5		124	250	0,19	55	20.000
5	100	12		128	-	0,16	-	24.000

De estos resultados se deduce la gran porosidad de los niveles jurásicos, en comparación a los niveles cretácicos, con existencia de desarrollo de cavernas muy importantes (tramo 4, en los 2500 mts.).

Para el Jurásico (Malm) se puede asignar, según las diagrfías, valores de porosidad medios del 5%, máximos del 12%, salinidades altas (>20.000 ppm) y saturaciones del 50%.

En la figura 28 se han resumido los resultados de la interpretación de las diagrfías y los resultados de las pruebas de DST.

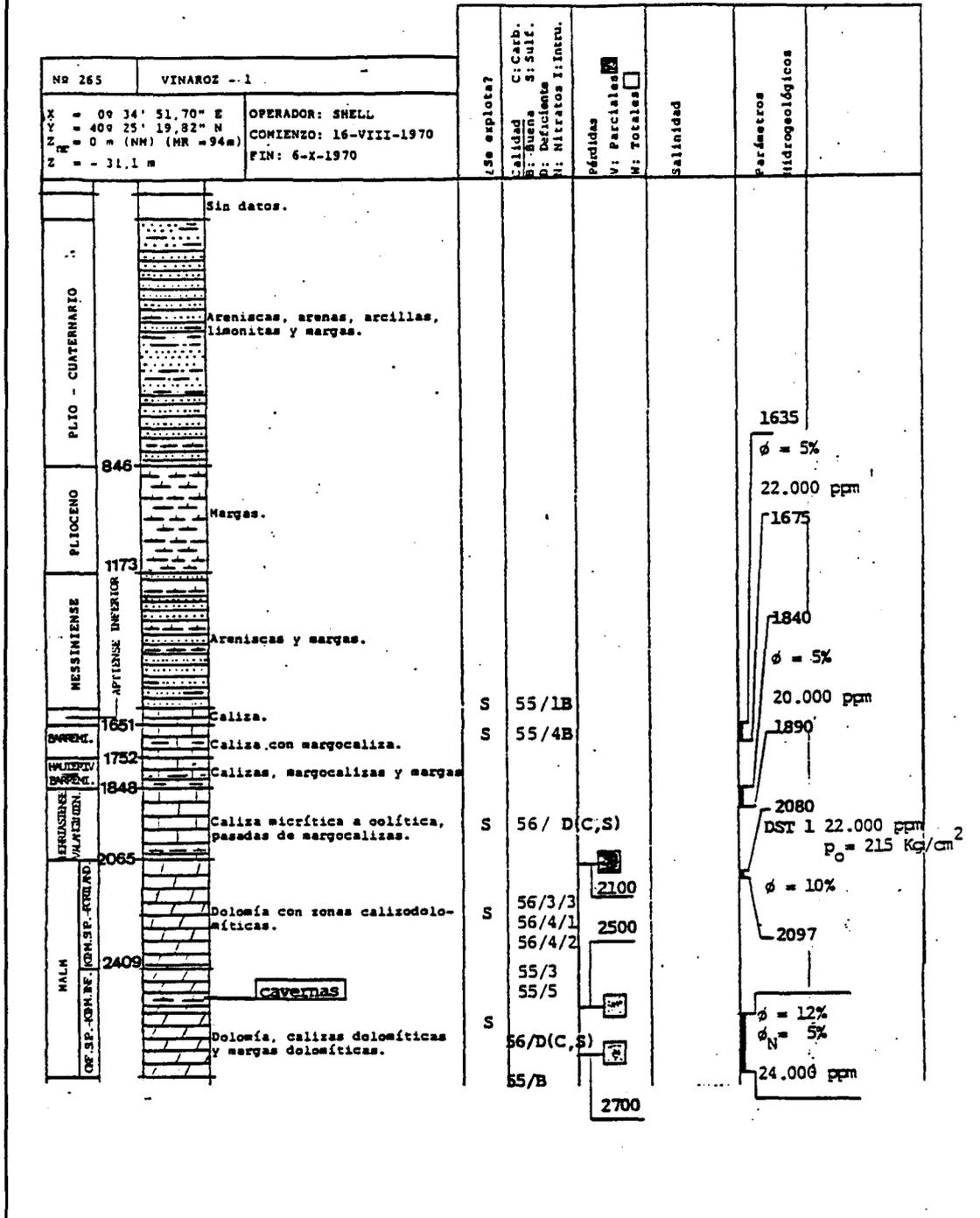


FIGURA 28, Resultados de diagrafas y pruebas de DST en el sondeo Vinaroz-1.

#### **d. Informe final del sondeo**

Este sondeo marino corta las series Plio-cuaternarias, Terciarias, del Cretácico inferior y del Jurásico superior. Los resultados de la interpretación de las diagrafías y de la lectura de las pruebas de DST, concluyen que los niveles correspondientes al Jurásico presentan importantes características de almacén, debido a la intensa fracturación que presentan, con desarrollos cavernosos (2500 mts.), lo que concede una porosidad media, al paquete de dolomías y calizas del Malm (una porosidad media) del 5%, que puede llegar a valores máximos del 12%.

El paquete cretácico presenta, en conjunto, una porosidad menor, con tramos muy margosos (Hauteriviense-Barremiense), si bien, en ciertos tramos del Aptense (tramo superior), se han calculado porosidades máximas del 5%.

#### **4.2.2.2 Vinaroz-2**

Este sondeo marino se sitúa muy próximo al sondeo Vinaroz-1, aunque algo más próximo a la costa (9 kms.)

#### **a. Estratigrafía**

La serie pliocuaternaria, que llega hasta los 1300 mts., corresponde a un potente tramo con alternancia de margas, arcillas y calizas arenosas-arcillosas.

El Mioceno, que representa un pequeño tramo de 8 mts. de espesor, está formado por arcillas compactas a techo y calizas a muro.

El techo cretácico atravesado por el sondeo, está constituido por calizas y dolomías.

En la figura 29 se muestra la columna estratigráfica atravesada por el sondeo.

#### **b. Diagrafías y pruebas bases del estudio**

Se ha centrado en el nivel cretácico y en el mioceno, en base a las siguientes diagrafías:

**CALIPPER + SPONTANEUS POTENTIAL + LATEROLOG +  
MICROSPHERICALOG.....1200 a 1414 m.**

**GAMMA RAY + SONIC.....1200 a 1414 m.**

Además, se ha contado con los resultados de una prueba de DST realizada sobre el nivel carbonatado cretáceo.

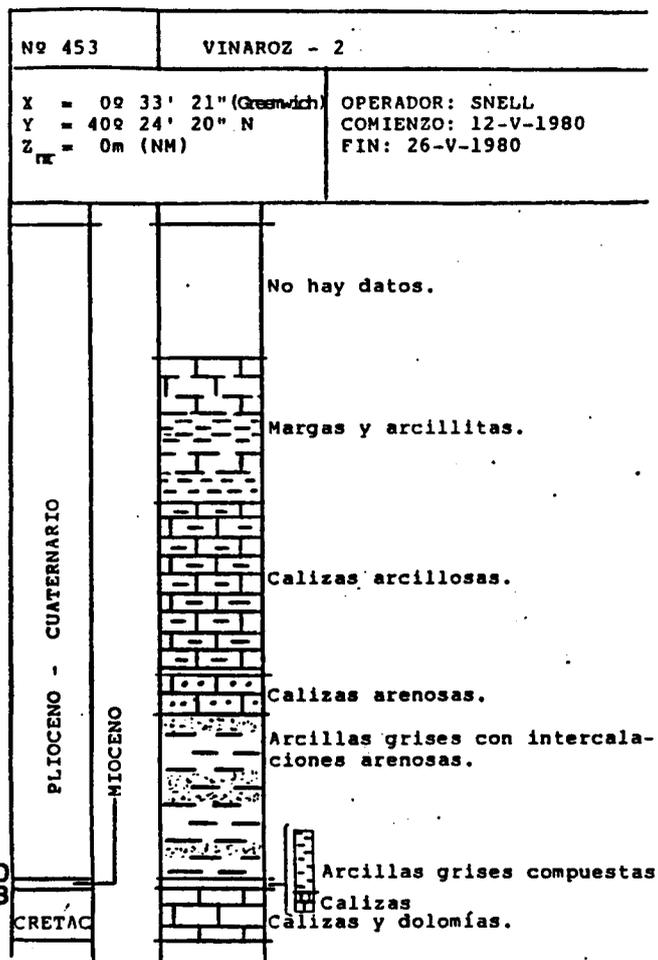


FIGURA 29, Columna estratigráfica atravesada por el sondeo Vinaroz-2.

### c. Resultados de la interpretación de las diagrafías

Los resultados de la reinterpretación de las diagrafías quedan expresados en los siguientes cuadros:

ZONA	PROFUND. (m.)	ESPESOR (m.)	LITOLOGIAS	CONT.ARCILLAS		POROSIDAD	
				GR	Vsh	t	$\phi_s$
1	1357	23	Calizas	35	5	47,5	0-3
2	1385	15	Dolomías	35	5	52,5	6-9
3	1306	2	Calizas mioc.	45	12	65	12

ZONA	ESPESOR (m.)	POROSIDAD (%)	F	T* (°C)	Rt ( $\Omega$ )	Rw ( $\Omega$ )	Sw (%)	Salinidad (ppm)
1	23			50,8	12	0,043		50-60000

Se puede concluir, como datos más relevantes, la escasa porosidad del nivel cretácico, siendo, como es lógico pensar, los tramos dolomíticos, los más porosos.

En cambio, las calizas miocénicas presentan una mayor porosidad.

De los logs eléctricos se puede deducir la elevada salinidad que presentan las aguas asociadas al nivel cretácico (50-60 g/l).

El ensayo de DST que se realizó, arroja los siguientes resultados:

- \* Tramo ensayado 1196-1333 m., se recogió lodo y agua, estimándose una salinidad para el agua de la formación de 41000 ppm.

### d. Informe final

Este sondeo marino, ubicado sobre una estructura anticlinal submarina, corta las series cenozoicas (pliocuaternarias, pliocenas y miocenas) llegando al zócalo cretácico.

Los resultados de los logs informan de la baja porosidad del nivel carbonatado cretácico, constituido por calizas y dolomías, siendo estas últimas las más porosas. De forma que podemos asignar valores de porosidad real para

los tramos calcáreos del 1%, y para los tramos dolomíticos del 2-4%.

Los logs eléctricos indican contenidos salinos muy altos (50-60 g/l), para las aguas de los carbonatos cretácicos, mientras la prueba de DST, en su día realizada, permitió la estimación de la salinidad de estas aguas en 41 g/l. Se trata, por tanto, de aguas muy saladas, no existiendo lavado por aguas meteóricas, dada la barrera sellante (impermeable) que constituyen los materiales cenozoicos.

#### 4.2.2.3 Golfo de Valencia B-1

Se sitúa frente a la costa castellonense, a unos 15 kms. de esta, a la altura de la Playa de Nules.

##### a. Estratigrafía

El sondeo corta los horizontes pliocuaternarios, miocénicos y mesozoicos (Cretácico-Jurásico-Triásico), marcando una discordancia estratigráfica en el tránsito Mioceno-Cretácico, y dos hiatos importantes en los tránsitos Cretácico-Jurásico superior y Jurásico superior-Muschelkalk inferior. Ambos hiatos son función de la accidentada tectónica presente en toda la zona sur de la provincia castellonense asociada a los materiales mesozoicos, como lo pone de manifiesto las formaciones mesozoicas aflorantes en la Sierra del Espadán.

Atendiendo a criterios puramente estratigráficos, cada uno de los horizontes nombrados corresponden a:

- \* **PLIOCUARTERNARIO (0 A 642 m.)**, constituido prácticamente por arcillas con pasadas de areniscas, arenas y calizas más o menos dolomitizadas.
- \* **MIOCENO TERMINAL-PLIOCENO INFERIOR (DE 642 A 844 m.)**, que corresponde a un tramo muy arcilloso con pasadas de calizas.
- \* **MIOCENO SUPERIOR (DE 844 A 967 m.)**, que está constituido, a techo, por arcillas con niveles calcáreos, y a muro, por areniscas con cemento calcáreo.
- \* **CRETACICO INFERIOR (DE 967 A 1048 m.)**, con un tramo superior de calizas, y otro inferior con alternancia de arcillas y calizas.
- \* **JURASICO SUPERIOR (DE 1048 A 1148,5 m.)**, paquete de calizas y dolomías muy fracturadas, sobre todo en su base.

- \* MUSCHELKALK INFERIOR (DE 1148,5 A 1254 m.), que presenta un tramo superior, de mayor potencia, constituido por dolomías muy compactas, y un tramo inferior de escasa entidad (14 m.), constituido por arcillas y anhidritas.
  
- \* BUNTSANDSTEIN (DE 1254 A 1360 m.), constituido por alternancias de arcillas y areniscas con cemento silíceo.

En la figura 30 aparece la columna estratigráfica asociada a este sondeo.

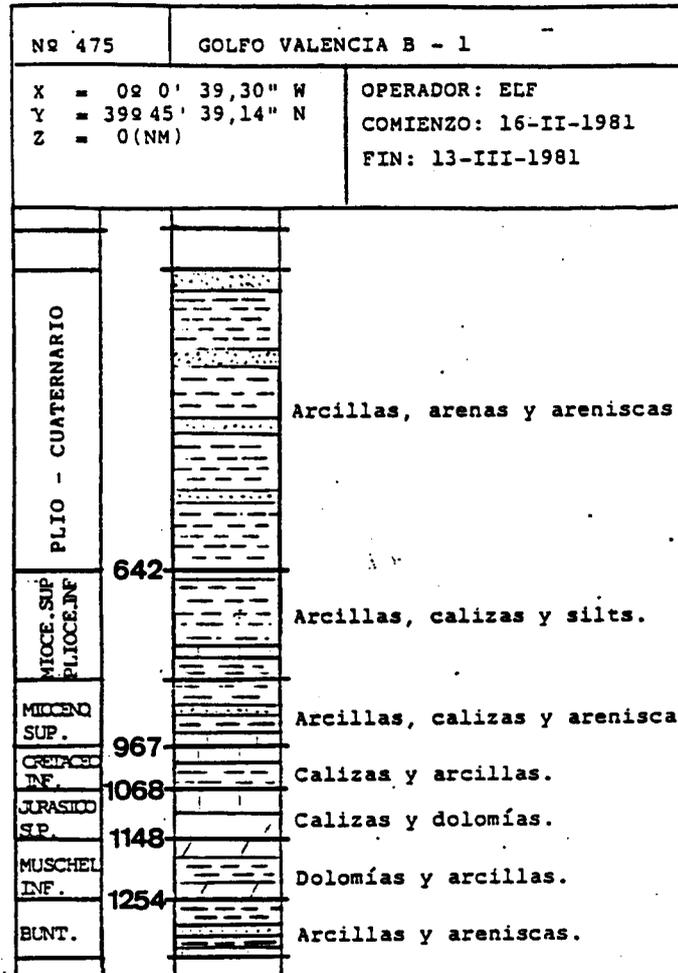


FIGURA 30, Columna estratigráfica asociada al sondeo Golfo de Valencia B-1.

**b. Diagramas y pruebas base del estudio**

Al ser el único sondeo, aunque marino, existente en la zona sur de la provincia, se han estudiado los logs asociados a todos los niveles mesozoicos.

Las diagramas reinterpretadas han sido:

**NEUTRON POROSITY + BULK DENSITY + CALIPPER +  
+ GAMMA RAY.....975 a 1250 m.**

**SPONTANEUS POTENTIAL + GAMMA RAY + INDUCTION +  
SPHERICAL + INTERVAL TRANSIT TIME.....975 a 1280 m.**

**GAMMA RAY + SPONTANEUS POTENTIAL.....1250 a 1359 m.**

**SPHERICAL+INDUCTION+INTERVAL TRANSIT TIME..1250 a 1359 m.**

**c. Resultados de la interpretación de las diagramas**

Los resultados para los tramos almacén considerados, quedan expuestos en el siguiente cuadro:

ZONAS ALMACEN				CONTENIDO EN ARCILLAS	
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	LITOLOGIAS	GR (GAPI)	Vsh (%)
1	990	22	Calizas	30	15
2	1075	25	Calizas	15	12,5
3	1130	20	Calizas	45	25
4	1150	50	Dolomías	15	10
5	1210	15	Caliza-dolomí.	25	15
6	1225	15	Dolomías	60	25
7	1305	45	Areniscas	120	75

ZONAS ALMACEN			POROSIDADES				
ZONA	PROFUN. (m.)	ESPESOR (m.)	Densidad (g/cc)	$\phi_D$ (%)	Sónico ( $\mu s/ft$ )	$\phi_S$ (%)	$\phi_N$ (%)
1	990	22	2.55	9	60	12	1
2	1075	25	2.56	8	55	8	2
3	1130	20	2.22	28	80	25	5
4	1150	50	2.55	10-15	50	7.5	<0
5	1210	15	2.45	15-20	60	12-14	<0
6	1225	15	2.1-2.3	30-35	70-110	20-40	0-1
7	1305	45	2.55	6-8	65	7-10	3

ZONA	ESPESOR (m.)	POROSIDAD (%)	F	T* (°C)	Rt ( $\Omega$ )	Rw ( $\Omega$ )	Sw (%)	Salinidad (ppm)
1	22	9	12.5	49	50	0,11	50	40.000
2	25	8	12.5	52	50	0,09	50	45.000
3	20	-	-	54	-	0,13	-	30.000
4	50	-	-	54	-	0,10	-	40.000
5	15	12	6.5	56	6	0,105	100	35.000
6	15	-	-	56	-	0,105	-	35.000
7	45	5	-	60	10?	0.145	100?	25.000

A la vista de las porosidades calculadas para el tramo de calizas jurásicas fracturadas, se observan valores muy altos de porosidad sónica y de porosidad de densidad, fruto de la importante fracturación que estos materiales presentan.

Por otra parte, destacar los importantes valores de porosidad calculados para ciertos niveles dolomíticos del Muschelkalk, lo que implica la existencia de mayor fracturación de este nivel triásico en el sur de la provincia que en el norte, donde se presenta más compacto.

Los logs eléctricos permiten estimar salinidades para las aguas de las formaciones atravesadas de 30-40 g/l.

En la figura 31 se ha representado junto a la columna estratigráfica, la información, simplificada, obtenida de los logs reinterpretados.

#### d. Informe final del sondeo

Este sondeo marino, situado enfrente de la costa sur castellonense, permite establecer correlaciones con los afloramientos y sondeos continentales, de manera que se llegue a establecer cortes geológicos perpendiculares a la costa, que informen de la profundidad a la que se encuentran los materiales aptos para la inyección.

Por otra parte, se ha podido obtener información sobre los materiales mesozoicos, que han resultado ser muy similares a los obtenidos en la zona norte de la provincia, salvo para ciertos tramos dolomíticos del Muschelkalk, que en este sondeo presentaron importantes pérdidas durante la perforación y han sido calculadas elevadas porosidades sónica y de densidad.

Destacar la presencia de niveles cretácicos poco porosos alternantes con tramos margosos muy impermeables. Niveles jurásicos muy porosos, sobre todo hacia la base, fruto de la gran tectonización que presentan.

Como ya se ha reseñado, la mayor tectonización de los niveles dolomíticos del Muschelkalk, con respecto a la zona norte, donde se muestran más compactos.

En el nivel areniscoso del Bunt aparecen porosidades importantes, si bien, algo menores que en la zona norte.

Sería de gran importancia llegar a establecer cortes geológicos profundos en las zonas próximas a la costa, donde el nivel Muschelkalk se encuentre sellado por el tramo Keuper, de gran potencia y extensión, que no ha sido cortado por este sondeo, en función de un accidente tectónico.

Por otra parte, señalar que los logs eléctricos ponen de manifiesto importantes salinidades (30-40 g/l) para los tramos mesozoicos atravesados.

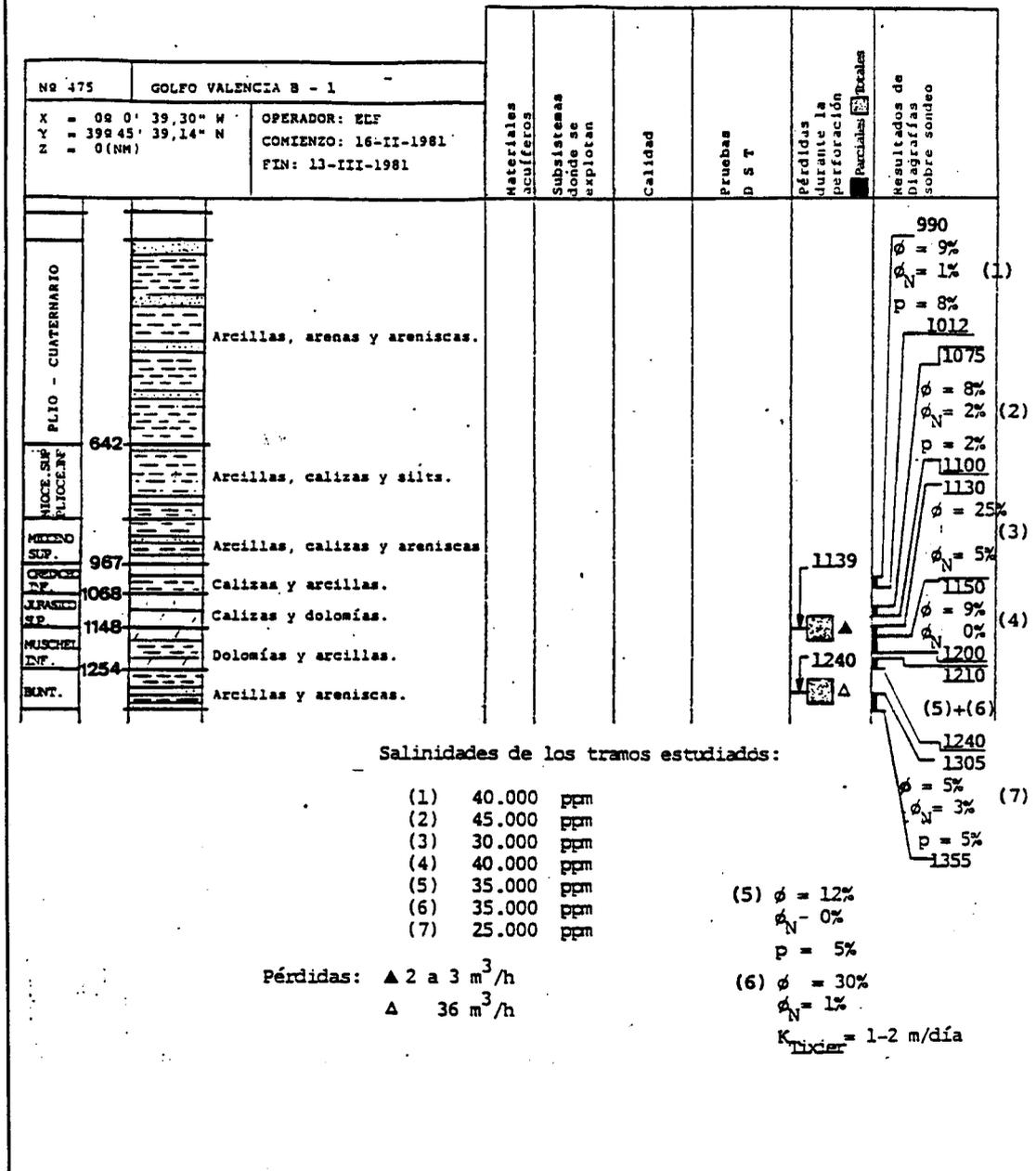


FIGURA 31, Resultados de la interpretación de diagrafías en el sondeo Golfo de Valencia B-1.

#### 4.3 Conclusiones de la revisión del conjunto de sondeos

Resumiendo los datos obtenidos en capítulos anteriores, se llega a las siguientes conclusiones:

##### \* MODELO TRIASICO PROFUNDO

**NIVEL ALMACEN:** areniscas del Bunt, con porosidades calculadas del 8% (Salsadella-1 y Maestrazgo-1) y del 5% en el sondeo marino G. de Valencia B-1, con contenidos en arcillas variables entre el 10% (Maestrazgo-1), el 15% (Salsadella-1) y el 5% del sondeo marino G.Valencia B-1.

**NIVEL SELLANTE:** constituido por las arcillas que engloban los lentejones areniscosos, se trata de arcillas rojas con limonitas (facies Röt) en Salsadella-1, y por arcillas en los restantes sondeos.

##### \* MODELO CARBONATADO MUSCHELKALK INFERIOR

**NIVEL ALMACEN:** tramo dolomítico inferior del Muschelkalk (M1) con porosidades calculadas del 2-3% (Mirambell-1), en la zona norte, y bastante mayores en la zona sur (hasta el 12% en G. Valencia B-1).

**NIVEL SELLANTE:** constituido por niveles de dolomías, anhidritas y sales, siendo mayor su desarrollo y carácter salino en zonas interiores (sondeo Mirambell-1, 624 mts. de espesor), decreciendo su potencia hacia las zonas costeras (Salsadella-1 sólo 150 mts. de espesor). Se trata de un nivel muy constante en el espacio y de gran espesor medio.

##### \* MODELO CARBONATADO MUSCHELKALK SUPERIOR

**NIVEL ALMACEN:** tramo dolomítico superior del Muschelkalk (M3), con escasa porosidad en la zona norte (2-3% en Mirambell-1, 1% en Bobalar y 1-3% en Salsadella), no habiendo sido cortado en la zona sur por el sondeo G.Valencia B-1, por causa de un accidente tectónico, si bien habrá que pensar en que las características sean mejores.

**NIVEL SELLANTE:** constituido por arcillas y sales del Keuper, nivel de gran continuidad espacial e importante espesor (261 m. en Mirambell-1, 246 m. en Bobalar-1, 230 m. en Bobalar-2, , 267 m. en Maestrazgo-1 y 200? en Salsadella). No es cortado por el sondeo G.Valencia B-1, si bien es un material aflorante en la Hoja 1:200.000 de Valencia en la zona de la Sierra del Espadán.

**\* MODELO JURASICO**

**NIVEL ALMACEN:** este modelo no presenta un nivel único, ya que el megaciclo jurásico han sido reconocidos importantes niveles con buenas características de almacén, con desarrollo de cavernas. Independientemente del estudio de detalle llevado a cabo en base al sondeo Maestrazgo-1 para la zona norte, los tramo que generalmente presentan datos de porosidades más elevados se sitúan en:

- \* Malm inferior (Kimmeridgiense-Oxfordiense)
- \* Dogger (Bathonense-Bajociense)
- \* Lias inferior
- \* Rethiense

**NIVEL SELLANTE:** han sido reconocidos ciertos niveles muy margosos en el jurásico que podrían servir de sello para los niveles almacén anteriormente señalados. estos tramos margosos se sitúan, preferentemente, en la zona media del Malm, techo del Dogger, mientras que el Rethiense aparecen intercalaciones de anhidritas.

**\* MODELO CRETACICO INFERIOR**

**NIVEL ALMACEN:** normalmente los niveles carbonatados del cretácico presentan peores características de almacén que los términos jurásicos, destacando ciertos niveles del cretácico inferior (Neocomiense).

**NIVEL SELLANTE:** destaca un nivel bastante continuo como es el Barremiense, constituido por margas y margocalizas, de gran extensión y potencia (385 m. en el sondeo Maestrazgo-1).

## **\* MODELO CRETACICO SUPERIOR**

- NIVEL ALMACEN:** constituido por las calizas del Aptiense, techo del Cretácico inferior, con valores de porosidad calculadas del 1-5%, en los sondeos marinos de Vinaroz-1 y Vinaroz-2, correspondiendo los valores de porosidad más altos a ciertos niveles dolomíticos existentes.
- NIVEL SELLANTE:** constituido por el potente y regular Terciario, formado por arcillas, margas, margocalizas y pasadas de arenas, muy impermeable.

## **5. ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS**

### **5.1 Reinterpretación de sísmica terrestre y marina**

De los perfiles sísmicos existentes para cada concesión se han tomado aquellos que contengan los sondeos estudiados, de manera que se puedan efectuar cortes geológicos interpretativos del subsuelo.

Asimismo, ciertos perfiles han permitido llevar a cabo correlaciones geológicas entre sondeos, de cara a la interpretación de la distribución espacial de los distintos niveles geológicos en el subsuelo.

La sísmica marina ha sido de especial utilidad en la correlación de sondeos terrestres y marinos, de manera que han podido ser trazados perfiles geológicos del subsuelo, perpendiculares a la costa.

En cualquier caso, la interpretación de los perfiles sísmicos ha necesitado de la elaboración de un modelo sísmico, cuando ello ha sido posible, en base a la información extraída de los logs de velocidad disponibles.

Se van a diferenciar las zonas estudiadas en función de las concesiones de exploración petrolífera.

#### **5.1.1 Concesión San Mateo**

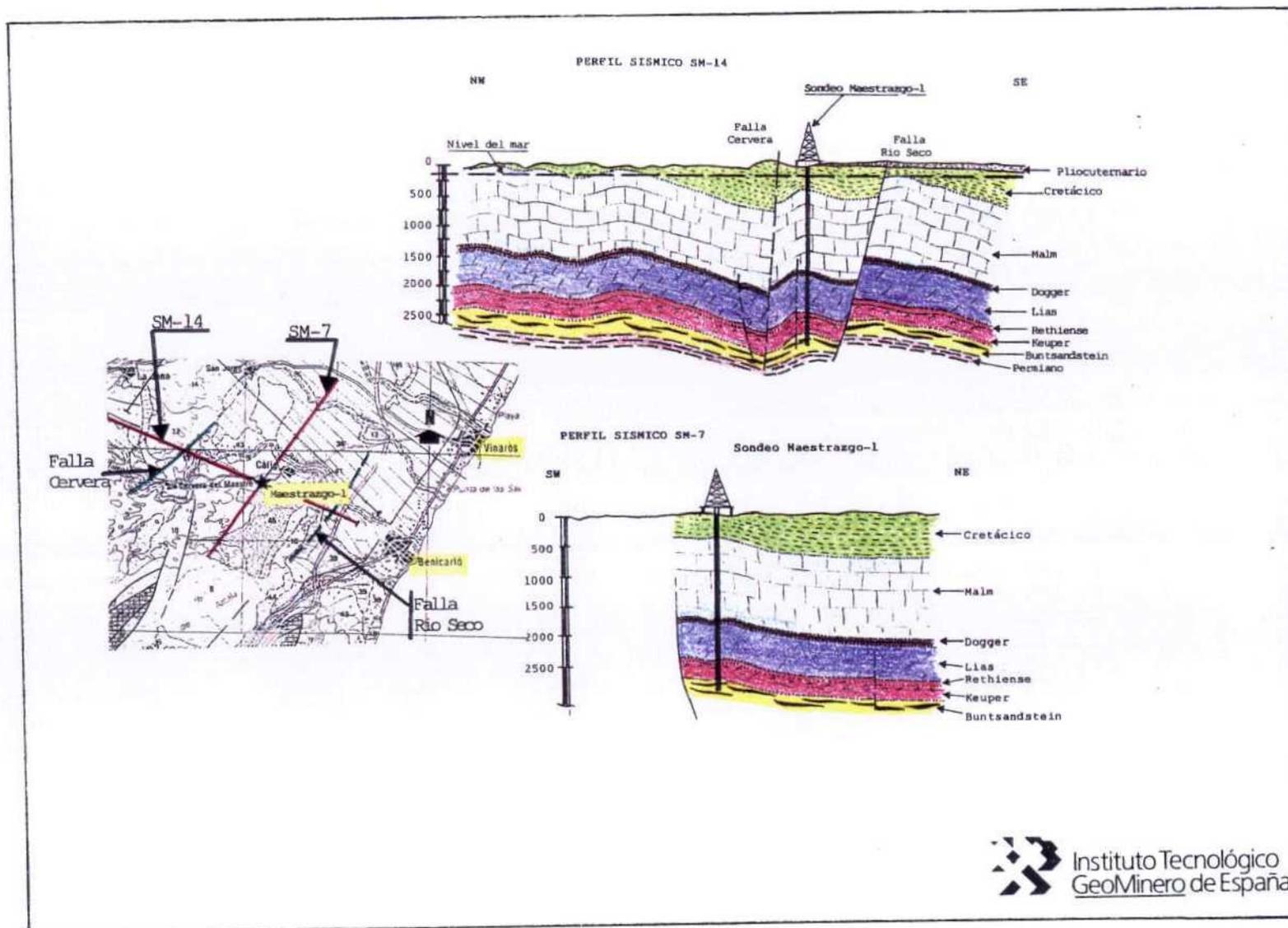
Se trata de una concesión terrestre incluida en el AREA DE VINAROS, y donde se ubicó el sondeo Maestrazgo-1.

De todos los perfiles sísmicos existentes en esta concesión, se han escogido los denominados SM-14 y SM-7, el primero perpendicular a la costa, y el segundo paralelo a esta (ver figura 32).

La interpretación de estos perfiles ha puesto de manifiesto una estructura favorable para la inyección en relación a una estructura anticlinal profunda, y una estructura abierta con buzamiento hacia la costa, si bien la existencia de fallas normales (abiertas), denominadas fallas Cervera y Rio Seco, que afectan a toda la serie mesozoica, exigirán estudios de detalle en relación con la presión de inyección y dirección de movimiento del fluido en el subsuelo, al objeto de impedir la movilidad de los residuos a favor de estas fracturas.

Los resultados de la interpretación de los perfiles sísmicos SM-14 y SM-7 aparecen en la figura 32a. En el perfil SM-7 aparece al SW una importante falla que impide cualquier interpretación, de ahí que la información sólo llegue hasta este accidente tectónico.

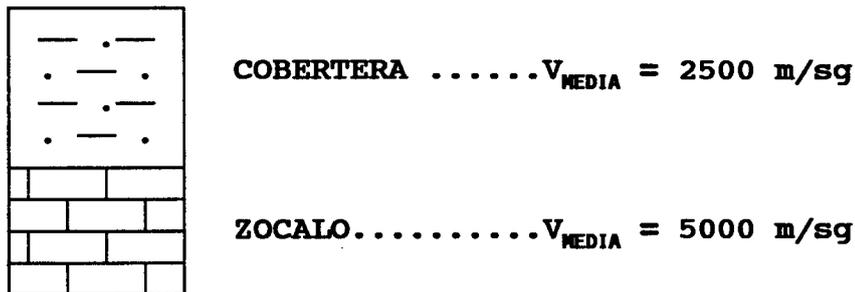
FIGURA 32a, Resultados de la reinterpretación de perfiles sísmicos en la conseción San Mateo (AREA DE VINAROS).



### 5.1.2 Concesión Vinarós

Para la interpretación de los perfiles sísmicos marinos correspondientes a esta concesión, ha sido necesario construir un modelo sísmico en base al SEISMIC WELL VELOCITY LOG realizado en el sondeo Vinaroz-2.

El modelo establecido -ver figuras 32b(1) y 32b(2)- se puede resumir en la forma siguiente:



Estableciéndose el primer reflector sísmico en la discontinuidad que supone el contacto terciario-cretácico.

Este modelo permite identificar, en los perfiles sísmicos, el reflector anteriormente descrito, llegando a poder establecerse cortes geológicos con el apoyo de la información suministrada por los sondeos Maestrazgo-1, Vinaroz-1 y Vinaroz-2, y la geología de superficie -ver figura 33-.

De los perfiles sísmicos marinos se ha elegido el P52, que se ha completado con la información de afloramientos superficiales y el sondeo Vinaroz-2, al objeto de trazar un corte geológico-sísmico, perpendicular a la costa.

De la misma forma, con ayuda de los perfiles sísmicos, que informan de aspectos relacionados con la tectónica (existencia de fallas, etc.) y la disposición de las capas (buzamientos, etc.), y los sondeos Vinaroz-1 y Maestrazgo-1, se ha trazado un perfil geológico perpendicular a la costa de gran interés para el estudio de las posibilidades de inyección.

De la observación de estos perfiles geológicos del subsuelo, refiriéndose al tramo costero, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El modelo triásico profundo, aparece en la zona de costa a profundidades superiores a los 3.000 mts., lo que dificulta su utilización para la inyección de residuos, al menos que estos sean de gran peligrosidad que justifiquen una obra de esta envergadura, dadas las condiciones de estanqueidad de este modelo de

inyección.

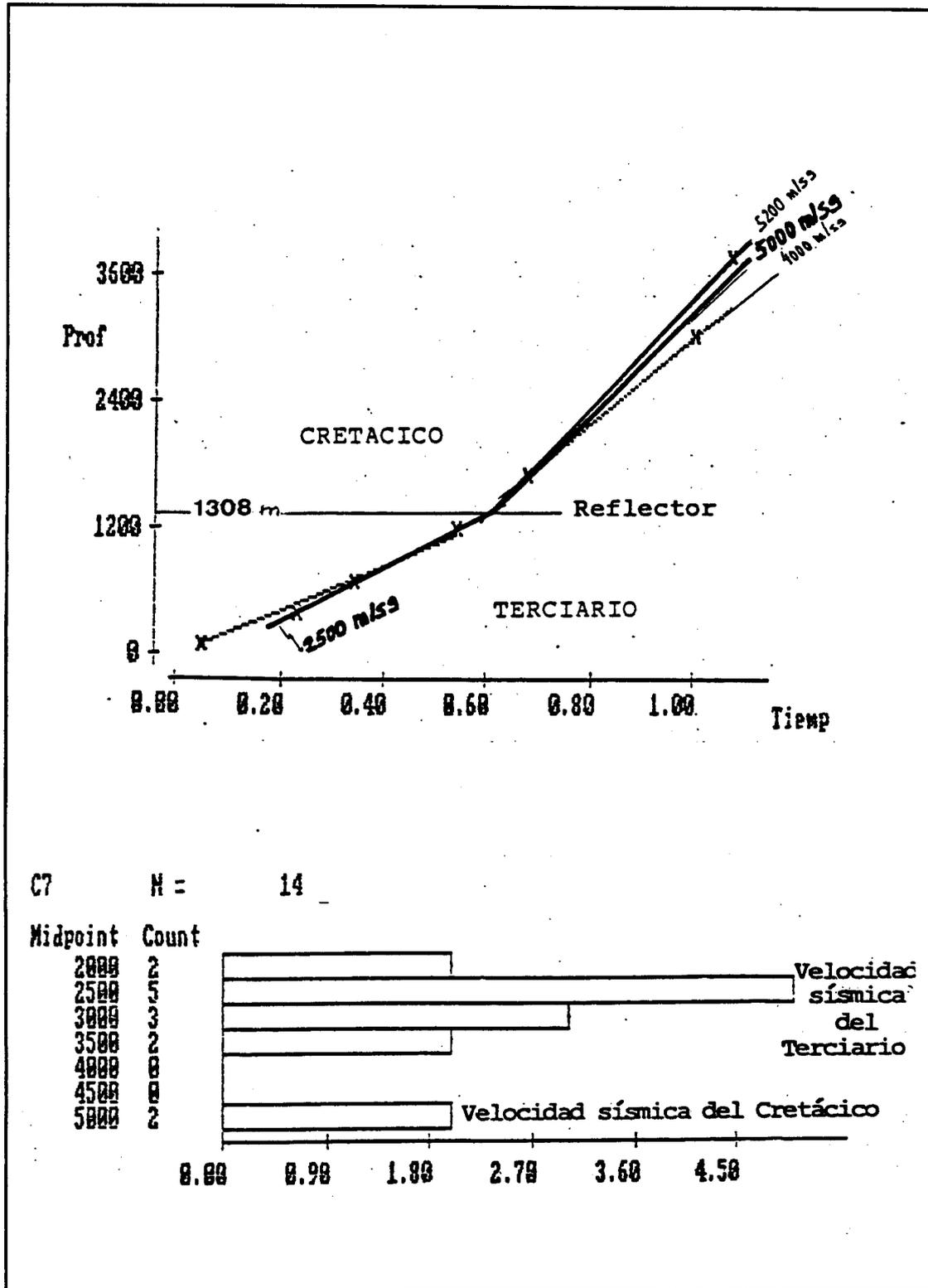


FIGURA 32b(1), Modelo Sísmico para sondeo Vinaroz-1.

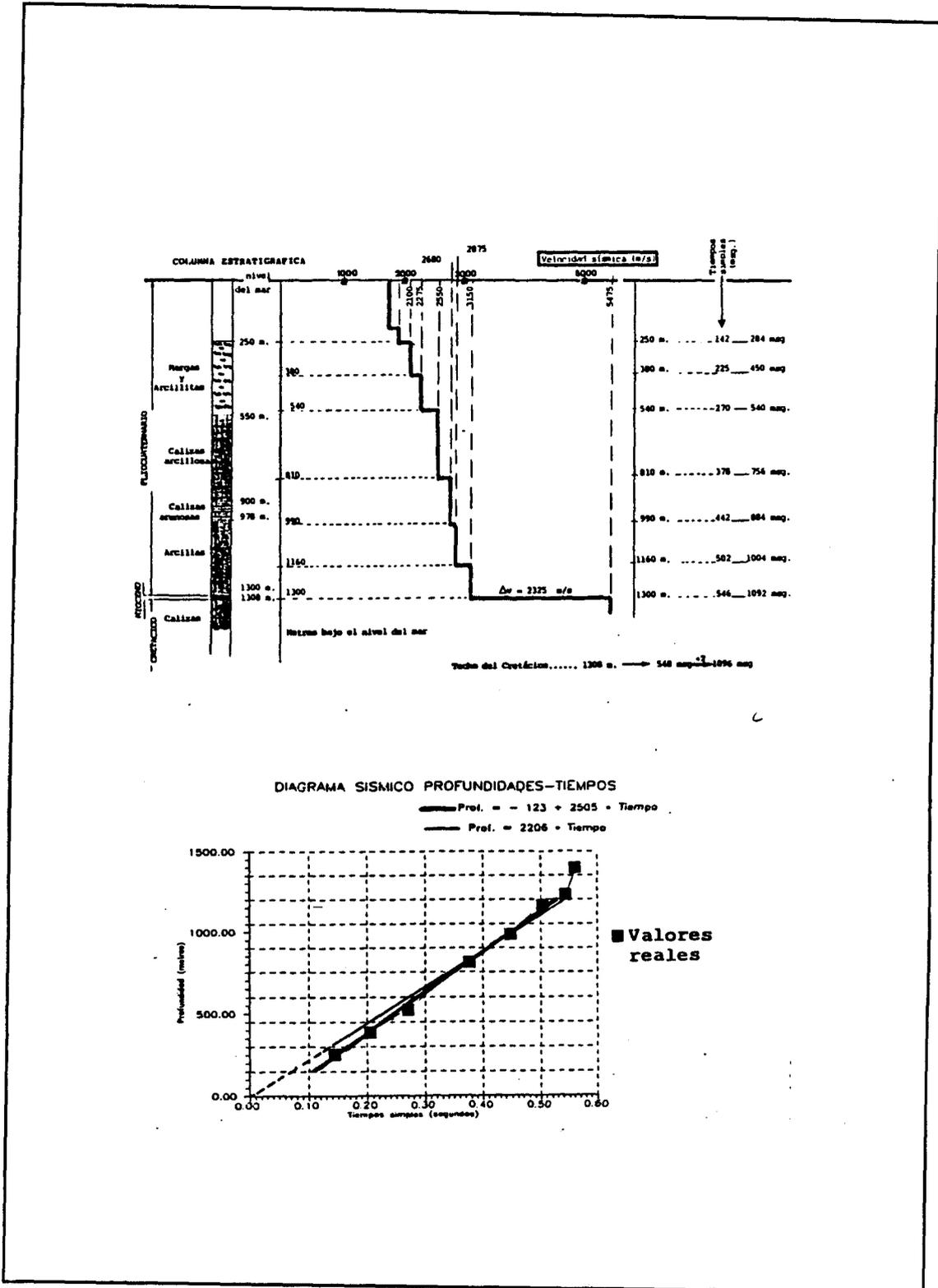


FIGURA 32b(2), Modelo Sísmico para el sondeo Vinaroz-2.

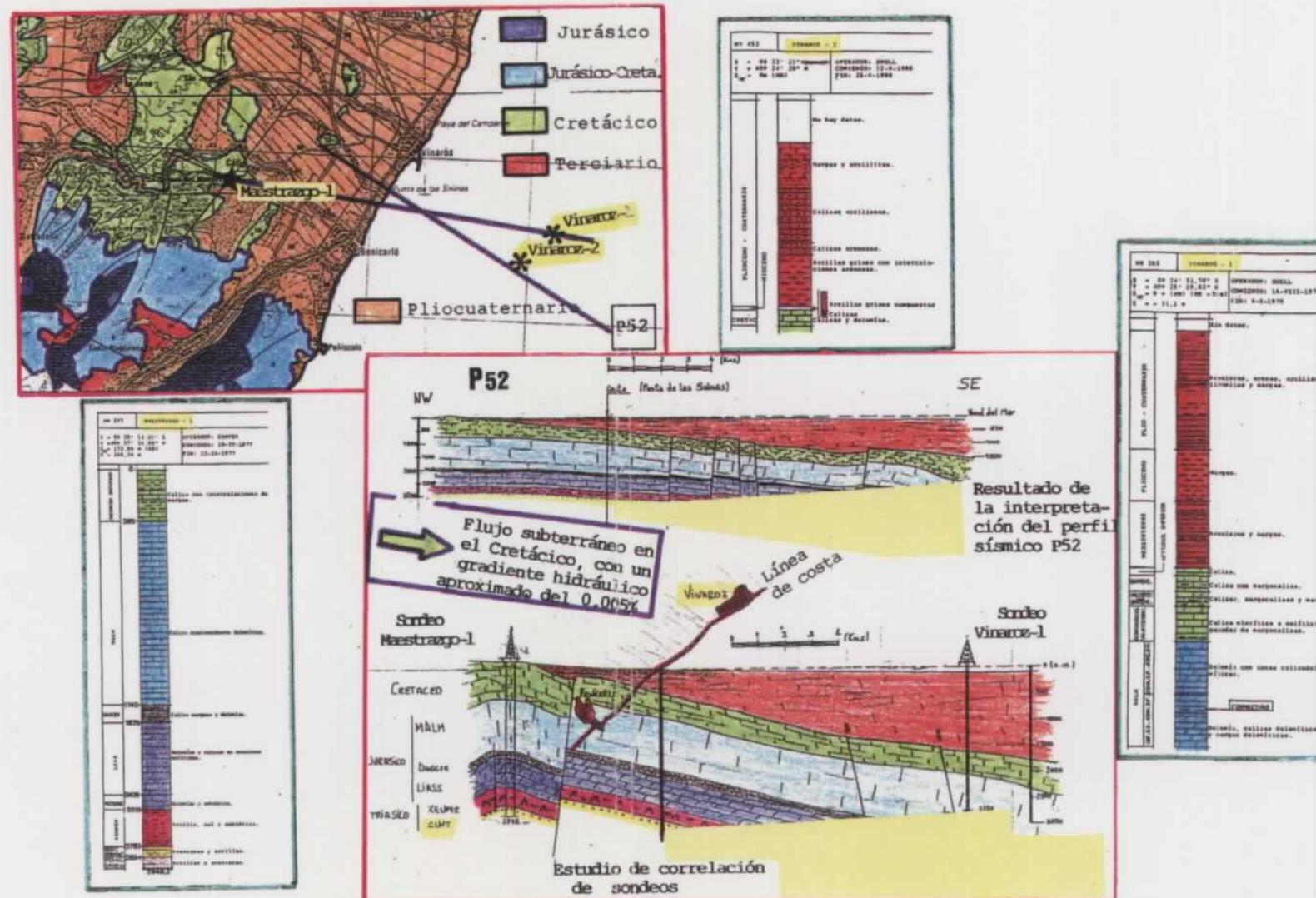


FIGURA 33, Resultados de la reinterpretación de la sísmica en la concesión marina Vinarós.

- Necesidad de estudiar con más detalle tramos jurásicos-cretácicos, en cuanto a la definición de las características de posibles sellos y almacenes, y de las aguas intraformacionales.
- El estudio sobre estos niveles jurásicos debería incorporar una evaluación sobre la predicción de las direcciones de drenaje en estos materiales, pues si bien, los niveles superiores cretácicos presentan flujos hidráulicos en sus tramos más superficiales hacia la costa, con gradientes hidráulicos estimados del 0.005 %, habría que asegurarse que estas direcciones de flujo son preferencialmente hacia el mar, con lo que el peligro de contaminación de acuíferos costeros más superficiales quedaría soslayado.

### 5.1.3 Concesión Golfo Valencia-B

Para la reinterpretación de los perfiles sísmicos ha sido necesario construir un modelo sísmico en base al SEISMIC WELL VELOCITY LOG existente en el sondeo G.Valencia B-1.

Para la elaboración de este modelo se han seguido, en este caso, dos metodologías, una puramente estadística, y la otra teniendo en cuenta las velocidades medias para cada horizonte considerado.

Teniendo en cuenta el modelo creado a partir de la velocidad media asignada a cada tramo aparecen 2 reflectores -ver figura 34-, uno que corresponde al techo cretácico, y el segundo al tránsito Jurásico (muy fracturado) al Muschelkalk (menos tectonizado).

Estos dos reflectores definen 3 tramos geológicos que corresponden a:

- 1) Materiales detríticos (arcillas y arenas) del Pliocuaternario y mioceno, con niveles margosos de base.
- 2) Materiales carbonatados cretácicos-jurásicos (calizas y dolomías) muy fracturadas, sobre todo en su base.
- 3) Dolomías más compactas del Muschelkalk, menos tectonizadas.

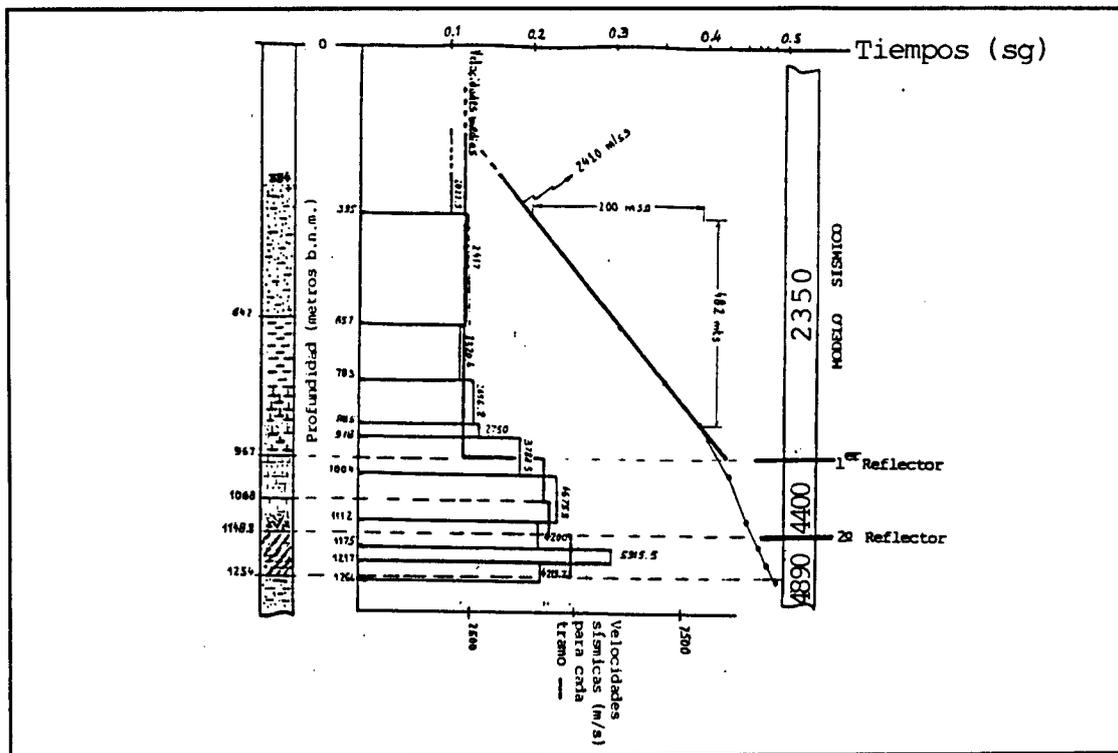


FIGURA 34, Construcción del modelo sísmico mediante el método de la velocidad media.

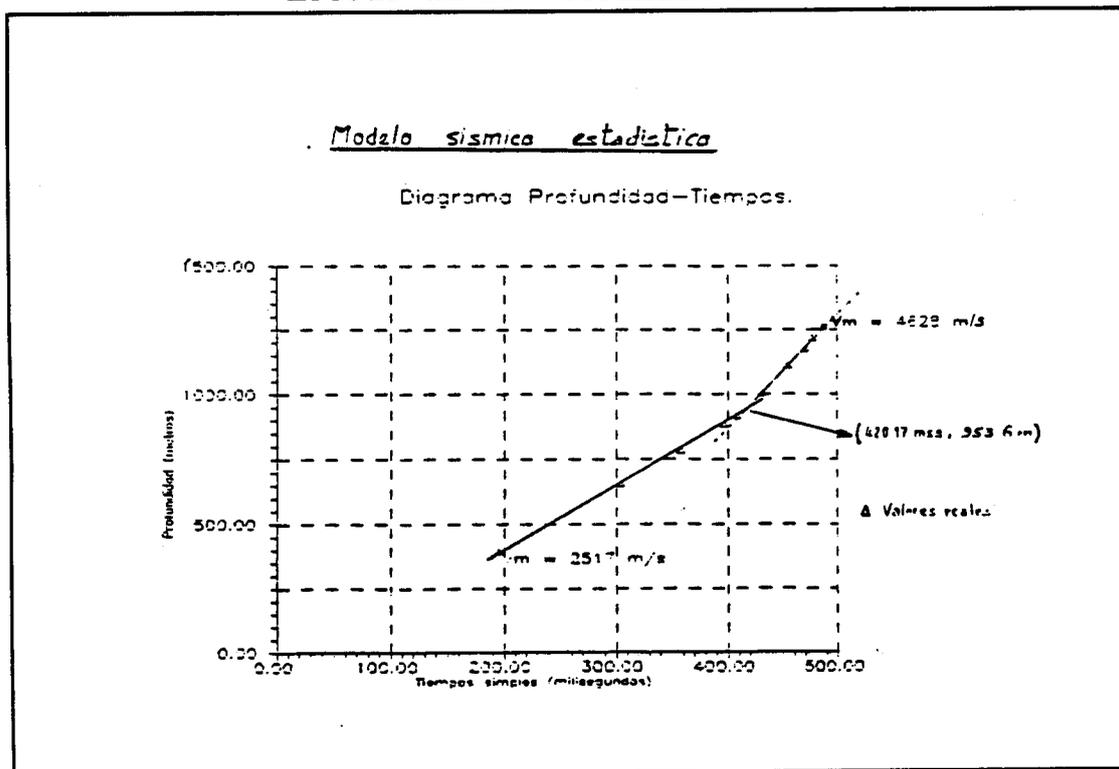
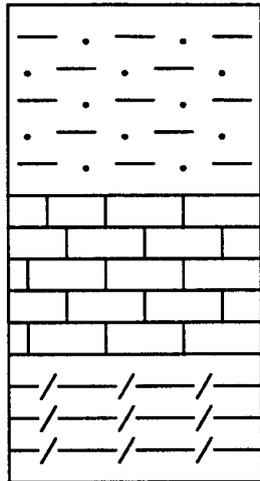


FIGURA 35, Construcción del modelo sísmico mediante el método estadístico.

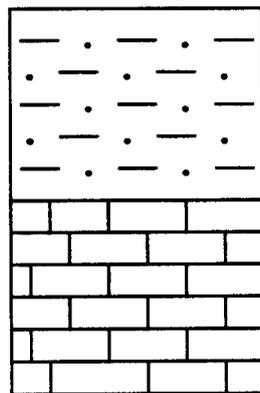


COBERTERA..... $V_{MEDIA} = 2350$  m/sg

ZOCALO..... $V_{MEDIA} = 4400$  m/sg

ZOCALO PROFUNDO.. $V_{MEDIA} = 4890$  m/sg

El método estadístico -ver figura 35- ofrece un sólo reflector que define un paquete superior correspondiente a los materiales detríticos definidos en el modelo anterior, y un paquete inferior carbonatado (mesozoico).



COBERTERA..... $V_{MEDIA} = 2500$  m/sg

ZOCALO..... $V_{MEDIA} = 4500$  m/sg

Estos modelos han permitido interpretar los perfiles sísmicos, situando el reflector que separa los materiales terciarios y mesozoicos, no pudiendo llegar a interpretar en los perfiles el segundo reflector ya que la accidentada tectónica de la zona, que afecta al zócalo mesozoico, da lugar a numerosas reflexiones que impiden cualquier interpretación en profundidad.

Cualquier intento de investigar mediante sísmica los tramos mesozoicos profundos podría resultar infructuoso.

Combinando la información tomada de los sondeos de explotación profundos en el AREA DE LA PLANA (ver figura 36), los afloramientos superficiales (mapa 1:200.000 de Valencia), la interpretación que sobre la disposición del techo cretácico se ha obtenido de los perfiles sísmicos y del sondeo Golfo de Valencia B-1, se ha podido llegar a trazar un corte geológico perpendicular la costa, desde la posición del sondeo G.Valencia B-1 hasta la estructura de

Onda-Betxi (figura 37).

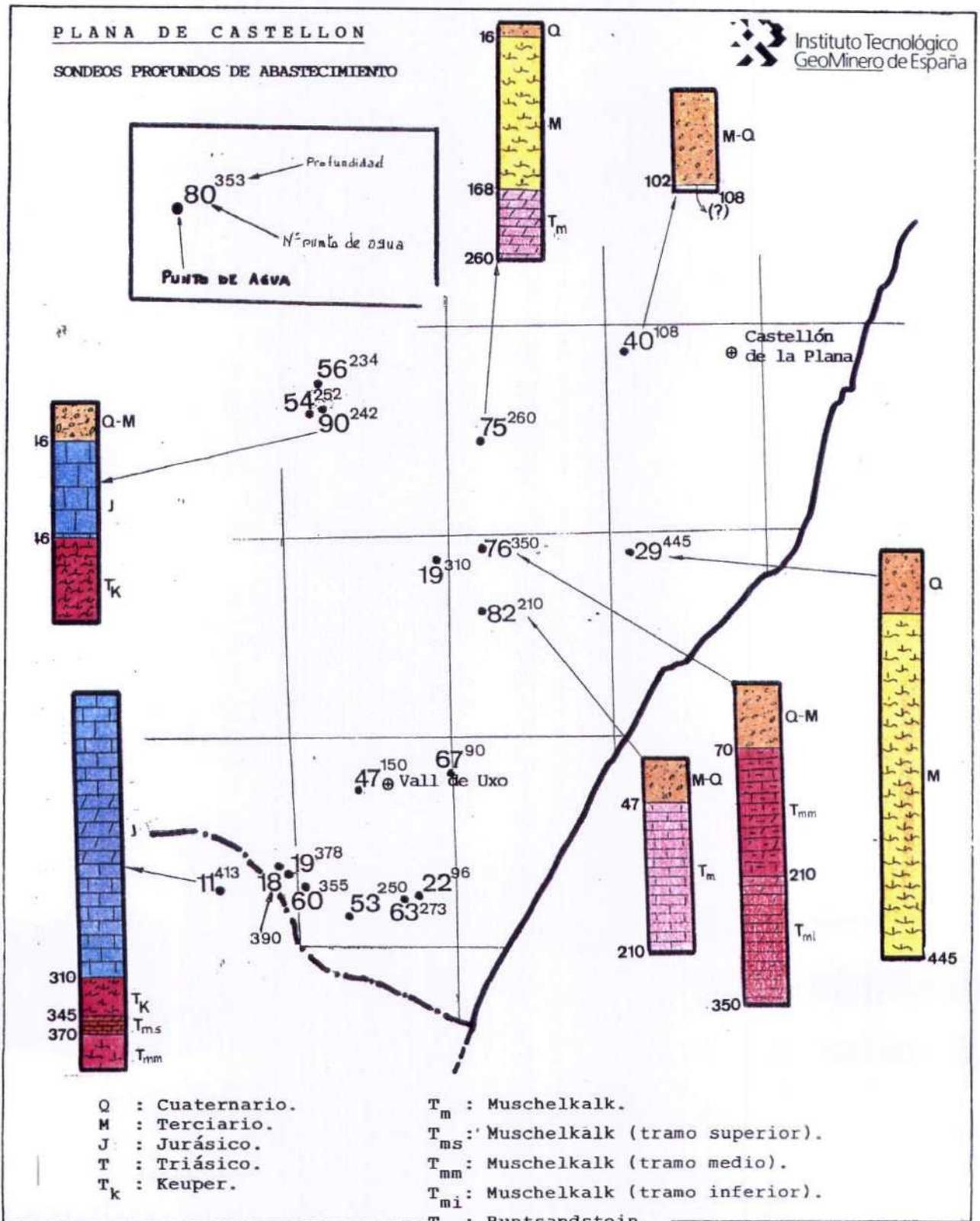


FIGURA 36, Sondeos de explotación profundos en el AREA DE LA PLANA.

CORTE ESQUEMATICO DE LA ZONA SUR DE CASTELLON

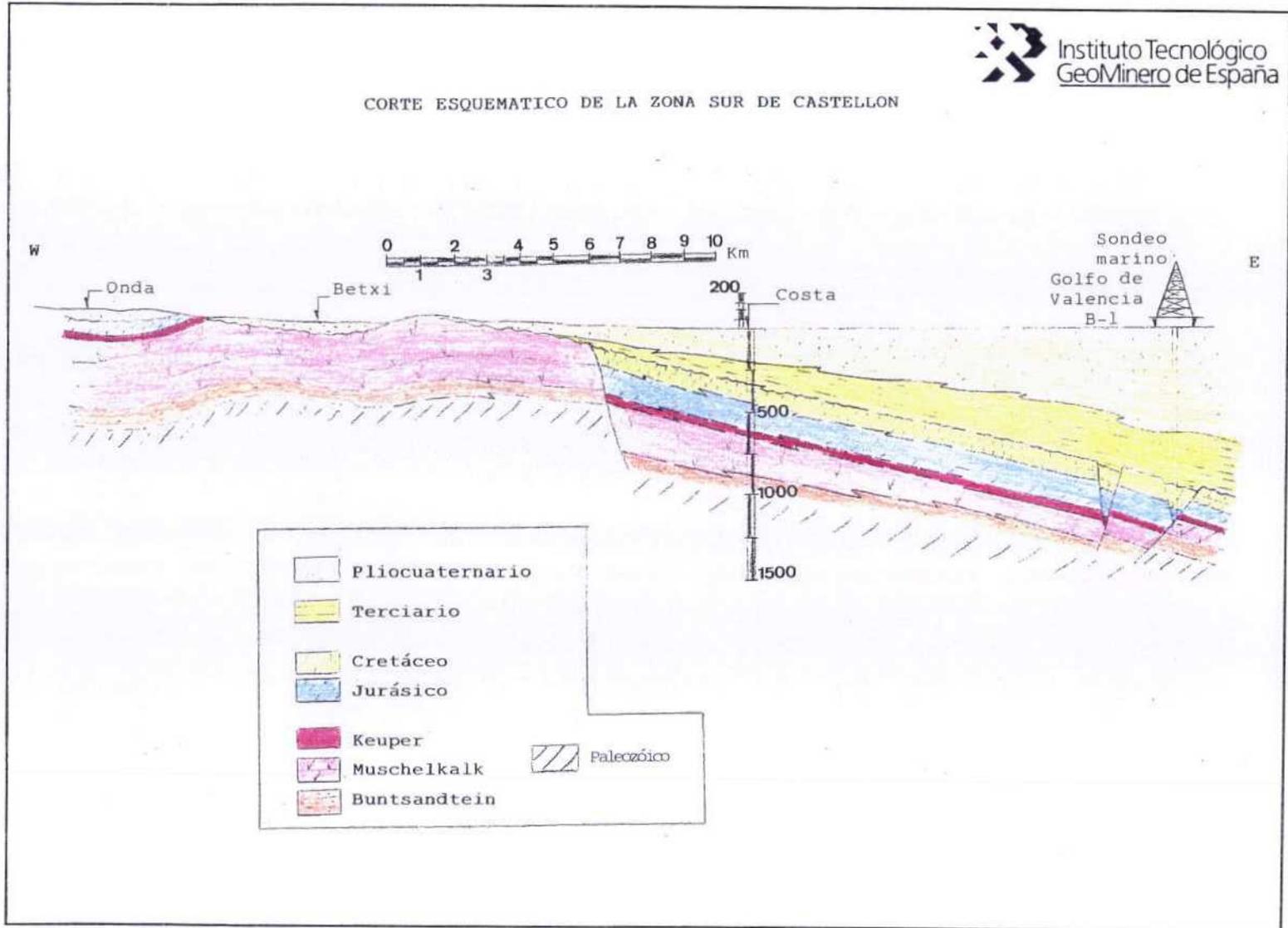


FIGURA 37, Corte geológico de la zona sur de la provincia castellanonesa (AREA DE LA PLANA).

Del corte esquemático de la figura 37 y de todo lo expuesto se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Dadas las condiciones de gran tectonización que se asocia a los niveles del zócalo mesozoico es difícil definir en detalle la situación de las diferentes formaciones, ya que cualquier estudio sísmico profundo no ofrecería el resultado deseado.
- La necesidad de realizar un sondeo en la zona de costa, que mostrase información puntual, acerca de las características de los materiales mesozoicos, los cuales presentan, a priori, condiciones interesantes como almacenes de residuos, existiendo, asimismo, niveles sellantes importantes. Siempre habría que tener en cuenta que la tectónica asociada es muy accidentada, siendo necesaria una evaluación de las direcciones preferenciales de drenaje en estos materiales permeables por fisuración, mediante estudios de microtectónica sobre materiales aflorantes, para evitar la contaminación de potenciales acuíferos profundos costeros explotados o susceptibles de serlo.

## 5.2 Correlaciones

Utilizando la información suministrada por los sondeos petrolíferos y la geología de superficie, se ha podido llegar a establecer cortes geológicos profundos

Para la zona norte de la provincia, donde se concentran los sondeos petrolíferos estudiados, se ha realizado un corte NW-SE (figura 38). Para ello se ha utilizado los sondeos Mirambell-1, Bobalar-2 y Salsadella, y la información del mapa geológico 1:200.000 de Vinarós. esta información se ha complementado con perfiles sísmicos pertenecientes a la concesión de Cañada.

En este corte general se pone de manifiesto la importancia de los accidentes tectónicos en la zona. Quedando constituidos estos accidentes tectónicos, a grandes rasgos, por fases de plegamiento y relajación de bloques, con formación de grandes facturas abiertas, que afectan a todo el paquete mesozoico. Todo este zócalo plegado y fracturado, quedó recubierto por los materiales de relleno terciarios y pliocuaternarios que se adaptaron a la paleo-topografía cretácica, dando lugar a la formación de las planas costeras.

Por otra parte, se pone de manifiesto la notoria disminución de potencia del horizonte Muschelkalk hacia la costa, sobre todo en el nivel M2, que da lugar a estructuras anticlinales (por inestabilidad salina) importantes en la zona NW (estructuras de Mirambell y Cinctorres).

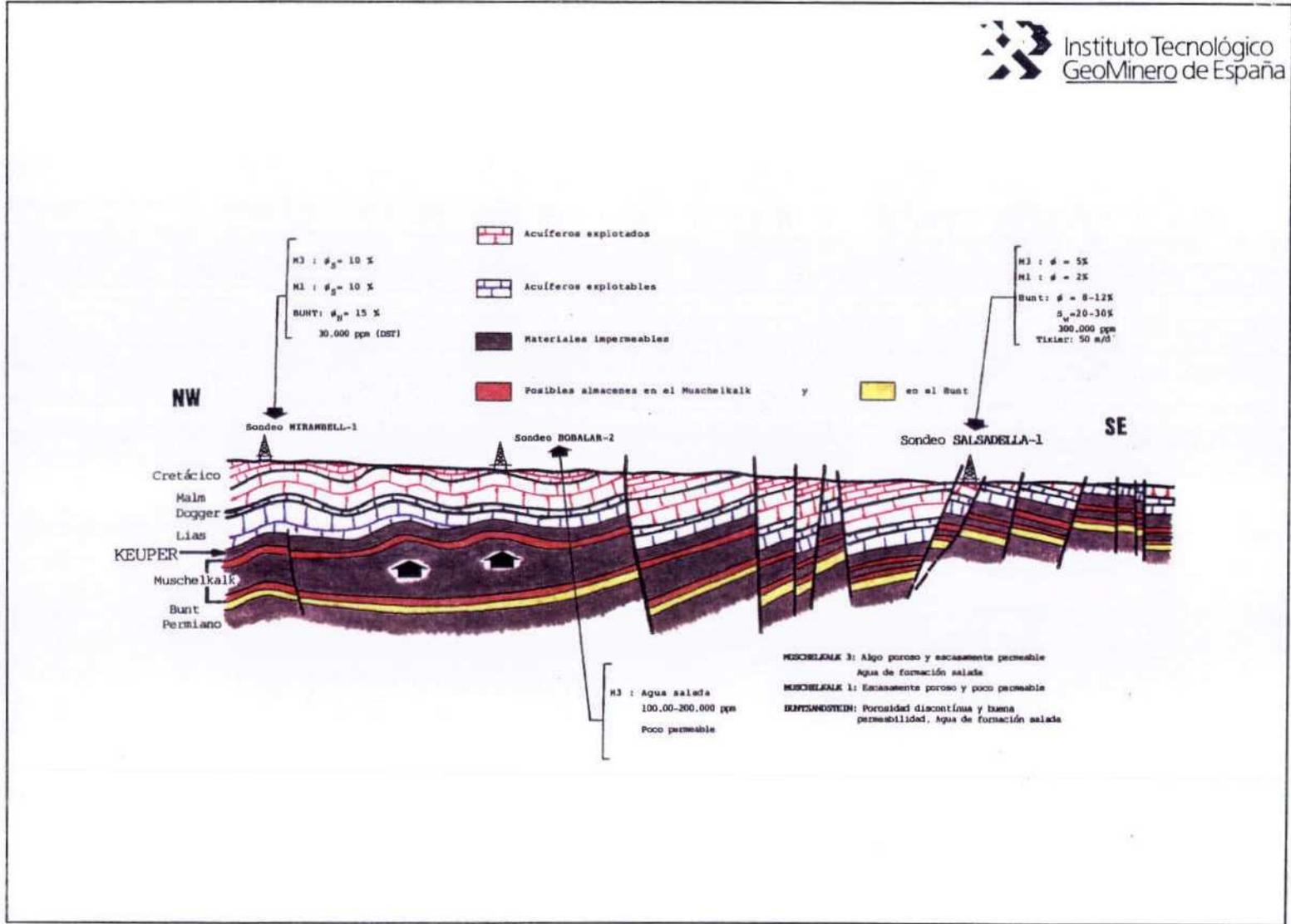


FIGURA 38, Corte geológico de la zona norte de la provincia de Castellón.

Al correlacionar los sondeos de Maestrazgo-1 y Salsadella-1 se observa la pérdida del nivel Muschelkalk hacia la zona donde se sitúa el primero de los sondeos reseñados. Al parecer, según el estudio sísmico de la concesión San Mateo (perfil SM-7, ver figura 32), la pérdida del Muschelkalk no obedecería a razones tectónicas. En la figura 39, se ha intentado una explicación a este hecho, atendiendo a la información aportada por los sondeos Salsadella-1 y Maestrazgo-1, así como la geología de superficie del mapa geológico 1:50.000 correspondiente. Según esta interpretación se debería a un acunamiento del Muschelkalk por pérdida lateral de sedimentación hacia el NE, lo cual resulta interesante de cara a la inyección, por cuanto supone una estructura geológica profunda y completamente estanca asociada al Muschelkalk, teniendo el Keuper como sello.

ENSAYO DE CORTE GEOLOGICO PARA LA CORRELACION DE LOS SONDEOS SALSADILLA-1  
Y MAESTRAZGO-1 (Cubeta del Maestrazgo, Castellón de la Plana)

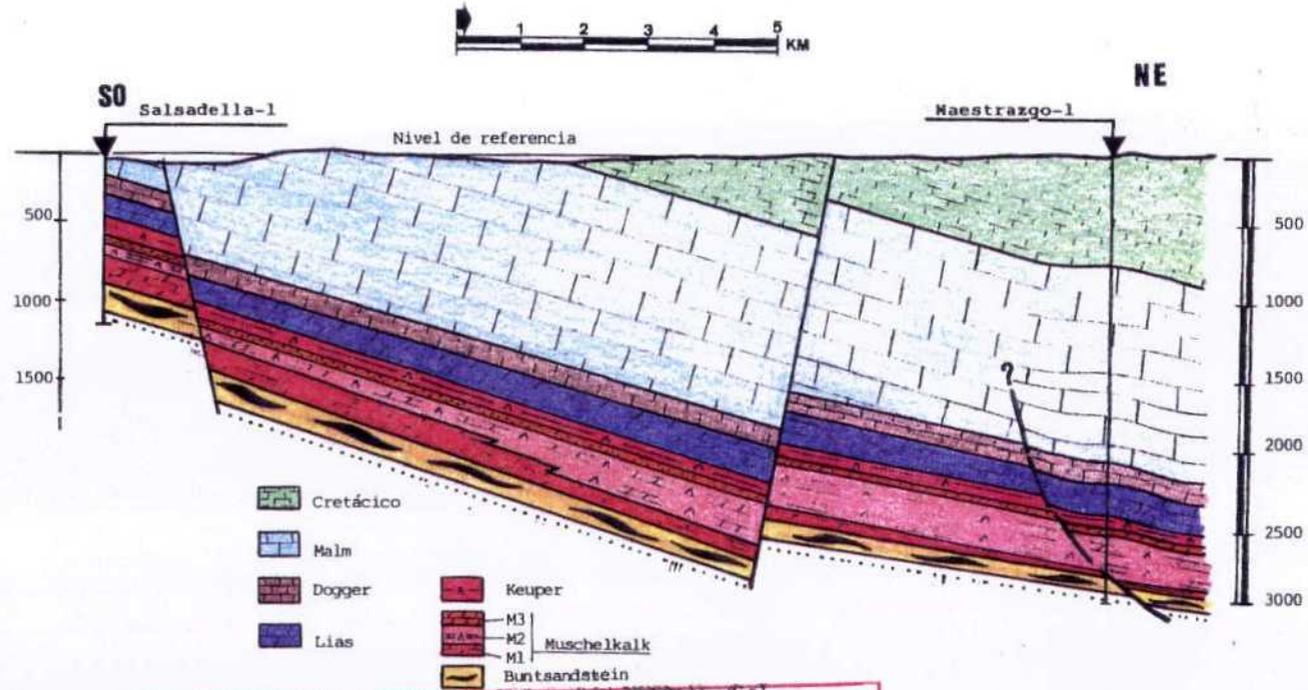


FIGURA 39, Correlación geológica para los sondeos Salsadella-1 y Maestrazgo-1.

### 5.3 ESTUDIO DE DETALLE EN LA ZONA NORTE DE LA PROVINCIA (área de Vinarós)

En la zona norte -AREA DE VINAROS- los modelos más claramente definidos (triásico profundo o carbonatados inferior y superior del Muschelkalk) o no aparecen o lo hacen a importantes profundidades (> 3.000 mts.) en la zona de costa, que es la que genera mayor cantidad de residuos.

La existencia de horizontes con importante permeabilidad en el Jurásico, y algo menos en el Cretácico, junto a otros niveles de notable impermeabilidad, aconsejan un estudio de detalle de estos megaciclos para establecer claramente los modelos de inyección jurásicos y cretácicos.

Se ha utilizado como base de estudios los ensayos y digrafías del sondeo Maestrazgo-1. Tras una revisión detallada de los mismos se pueden presentar las siguientes conclusiones más importantes:

#### \* CRETACICO

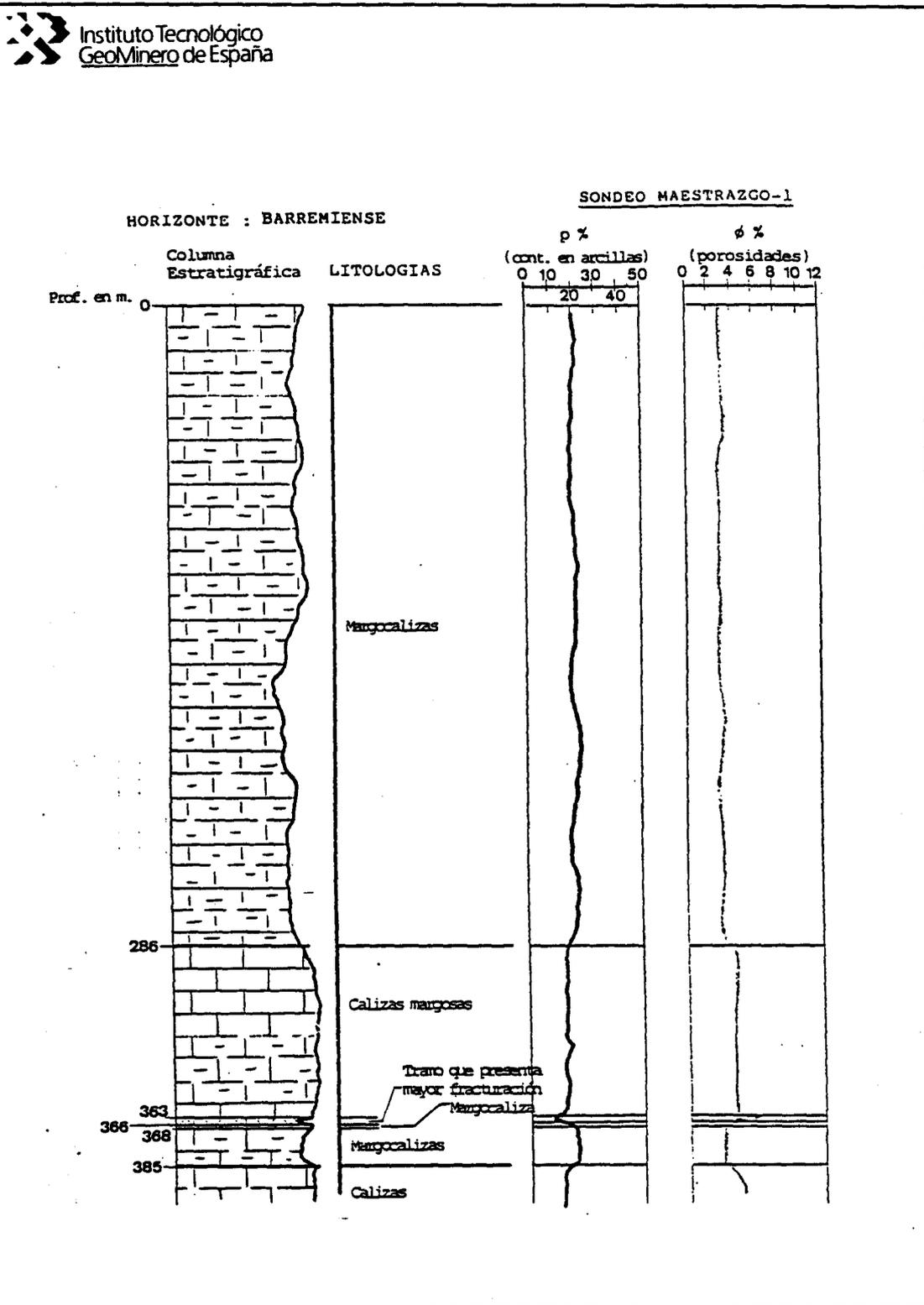
- Existencia de un nivel (Barremiense) constituido por calizas con intercalaciones margosas, donde se alcanzan contenidos estimados en arcillas del 20%, valores de porosidad calculados bajos (3-4%) -ver figura 40-. Se trata de un nivel de gran continuidad y relativa impermeabilidad que aparece en la zona costera a unos 600 mts. de profundidad.
- A muro de este nivel cretácico, bastante impermeable, se encuentra el nivel Neocomiense, que presenta en su tramo inferior, en el tránsito hacia el Jurásico, una zona de carbonatos con importante fracturación, zona que aparece, tanto en el sondeo Maestrazgo-1, como en el sondeo marino Vinaroz-1 -ver figura 41-.

Este tramo presenta contenidos en arcillas del 5-10% y porosidades de hasta el 6%, reconociéndose en el sondeo Maestrazgo-1 potencias de más de 20 mts. (570 a 668 mts. de profundidad).

Se trata, por tanto, de un nivel con importante porosidad, de gran continuidad lateral y que aparece en la zona de costa entre 900 y 1000 mts.

- El sondeo Maestrazgo-1 no corta el nivel Aptiense, pero si es cortado por los sondeos marinos Vinaroz-1 y Vinaroz-2, de manera que puede, teniendo en cuenta la geología de superficie y la sísmica, suponerse que aparecería en la zona de costa, aproximadamente, a unos 500-600 mts., con valores de porosidad del 2-4% y contenidos relativos en arcillas de 15-20%, teniendo como sello los materiales terciarios, muy impermeables. Hay que destacar que el Cretácico Superior es soporte de un

importante acuífero carbonatado en la zona de Vinarós-Peñíscola.



**FIGURA 40, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del BARREMIENSE.**

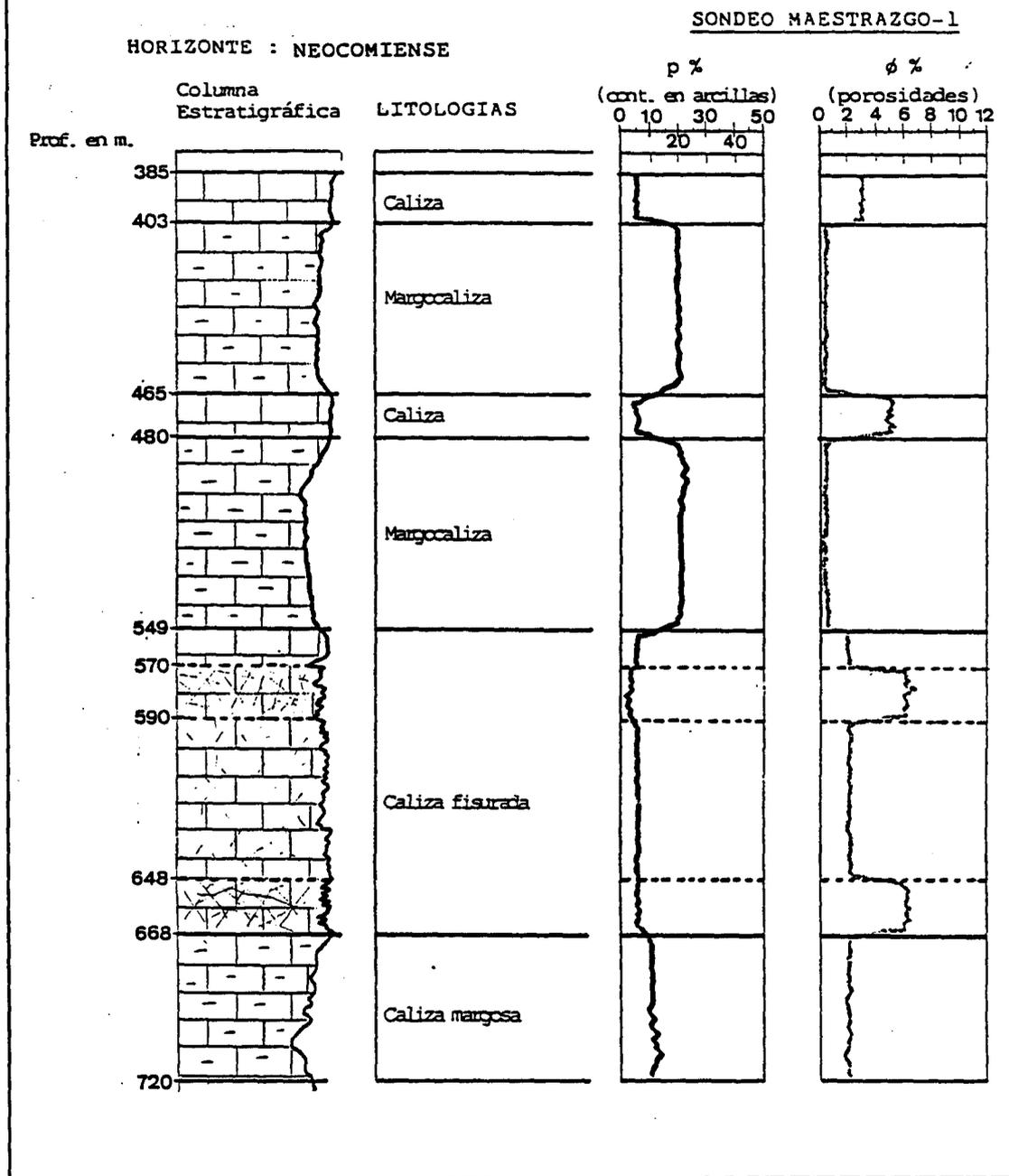


FIGURA 41, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del NEOCOMIENSE.

\* **JURASICO**

- El tramo superior del Jurásico cortado por el sondeo Maestrazgo-1 -Portlandiense-, se muestra desprovisto de porosidad y bastante impermeable. Se trata de un nivel de 56 mts. de potencia, constituido por calizas con intercalaciones de margas -ver figura 42-, que constituiría la cobertera del Jurásico y el nivel aislante del Cretácico.
- En la base del Portlandiense se sitúa el **Kimmeridgiense superior**, nivel que en su tramo superior (unos 30 mts de espesor), con porosidades del 5%, contenidos puntuales de arcillas del 20% y medios del 12 % (figura 43). Este nivel de 30 mts. aparecería en línea de costa a unos 1300 mts. de profundidad.
- En el **Kimmeridgiense inferior** aparecen una serie de tramos de calizas y dolomías muy compactas (porosidades del 3% y contenidos en arcillas por debajo del 5%), junto con tramos de calizas-dolomías con intercalaciones margosas, pero muy fisuradas, que presentan porosidades del orden del 6% y contenidos en arcillas del 15% (ver figura 44). Estos niveles con buenas características de almacén aparecerían en la línea de costa entre los 1500 y 1900 mts.

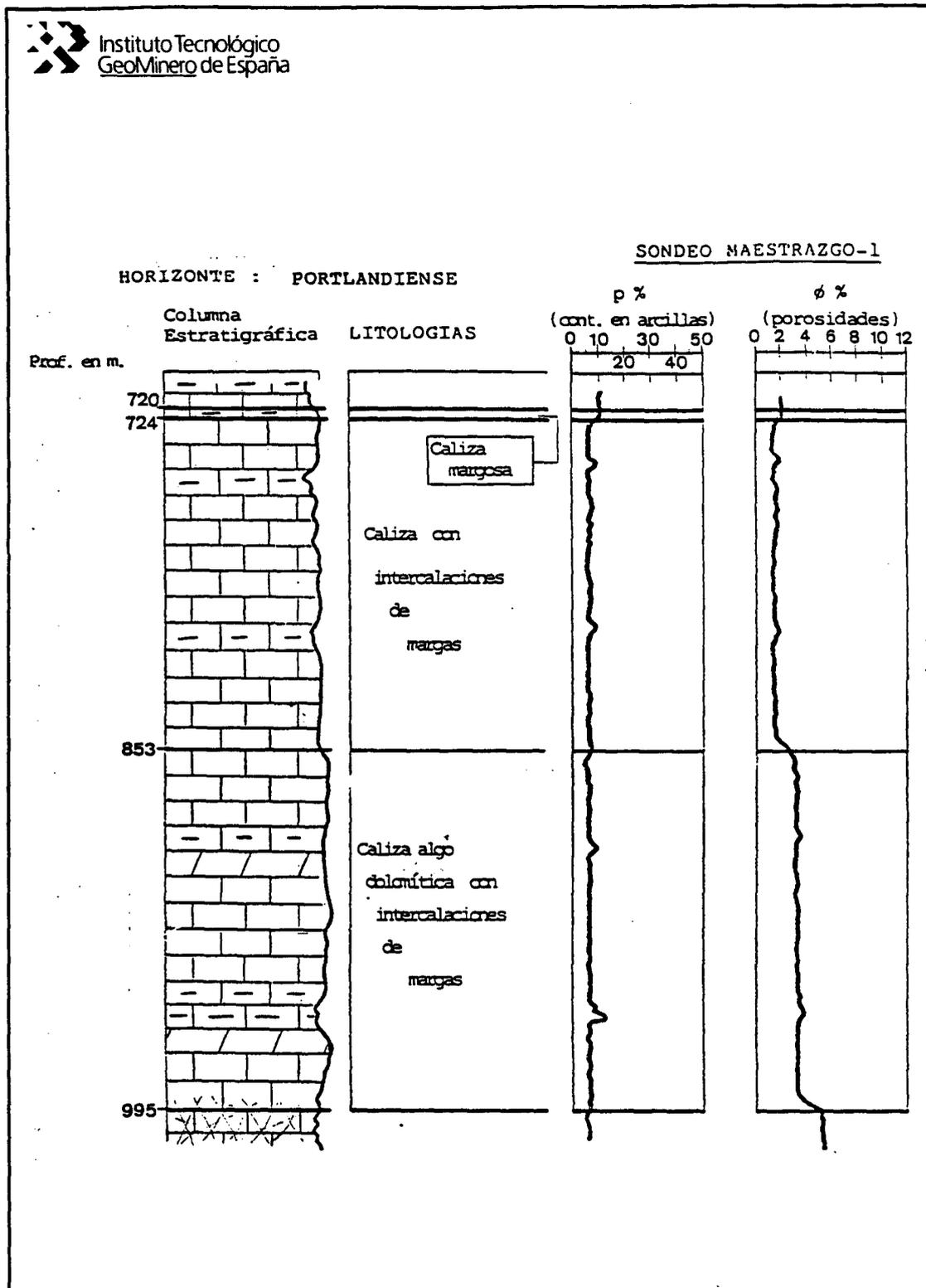
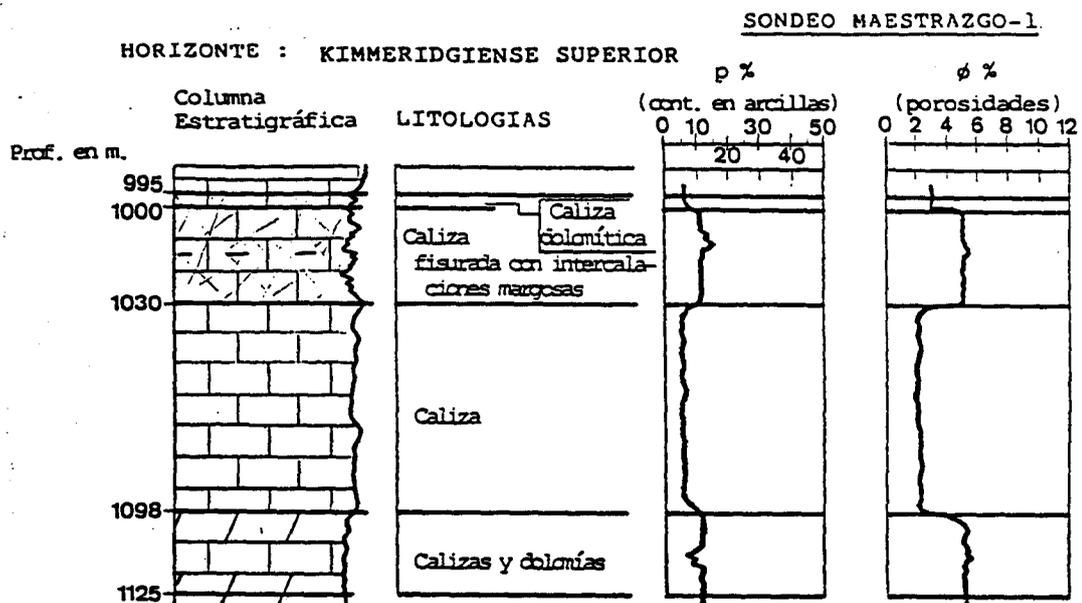
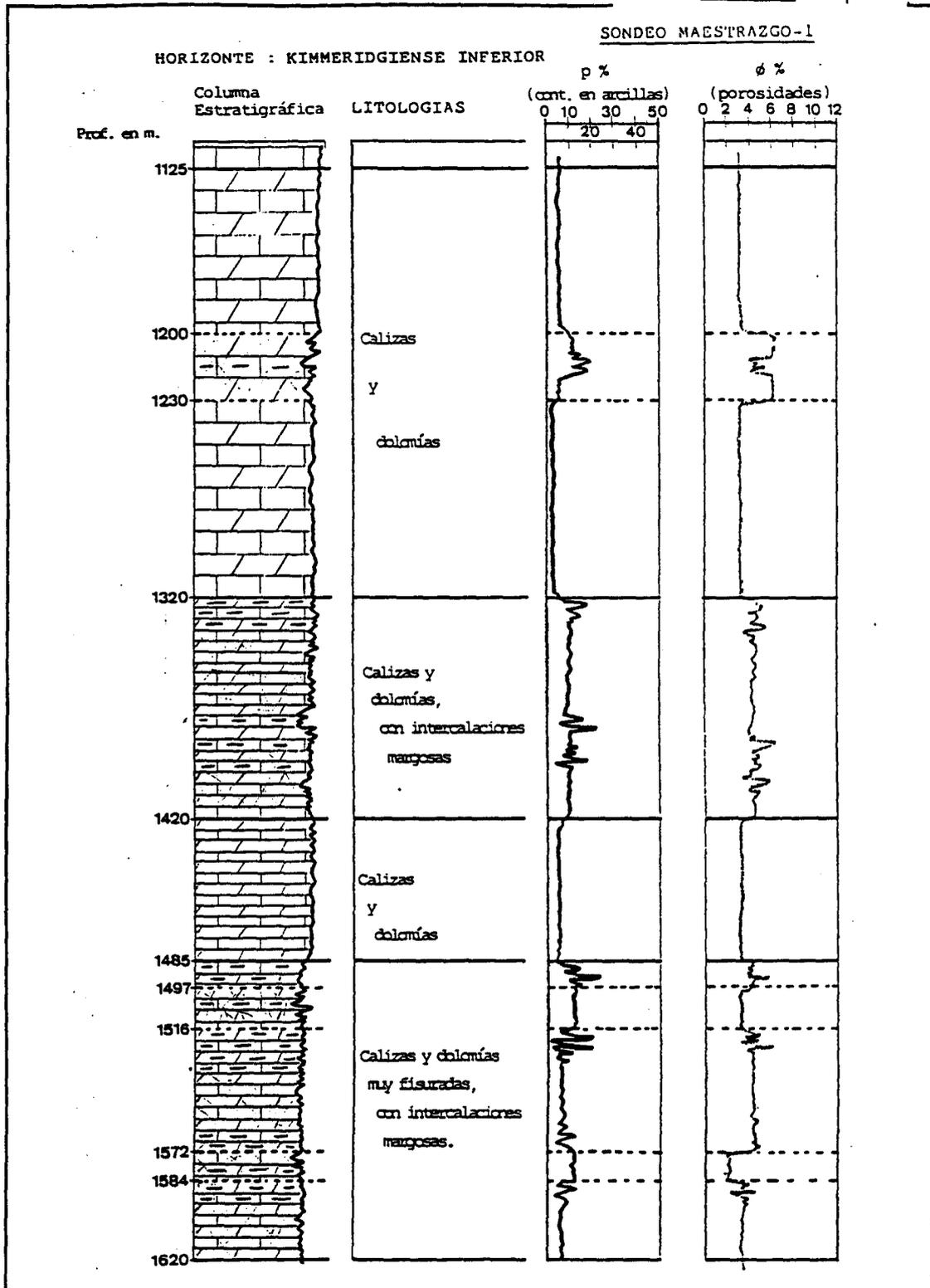


FIGURA 42, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del PORTLANDIENSE.



**FIGURA 43, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del KIMMERIDGIENSE SUPERIOR.**



**FIGURA 44, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del KIMMERIDGIENSE INFERIOR.**

- El Dogger se muestra como un tramo carbonatado muy puro, con contenidos en arcillas prácticamente nulos (< 5%) y porosidades del 5% -ver figura 45-. Se trata de un nivel de calizas y dolomías, que en la zona del sondeo Salsadella-1 presentan una gran porosidad (tramos Bathoniense y Bajociense), de 125 mts. de espesor.
- Similares características presenta el tramo de techo del Lias superior. Se trata de un paquete de calizas y dolomías de 47 mts. de espesor (ver figura 45) que aparecería en la línea de costa a unos 2200 mts. de profundidad.
- El tramo de base del Lias inferior está constituido (ver figura 45) por un nivel de calizas dolomíticas de 78 mts. de espesor, con contenidos en arcillas menores del 5% y porosidades del 7%. Este nivel aparecería a una profundidad aproximada de 2200-2300 mts. en la línea de costa.
- El Lias inferior es un potente paquete con alternancia de calizas-dolomíticas y dolomías calcáreas limpias, con margocalizas dolomíticas y calizas dolomíticas margosas.

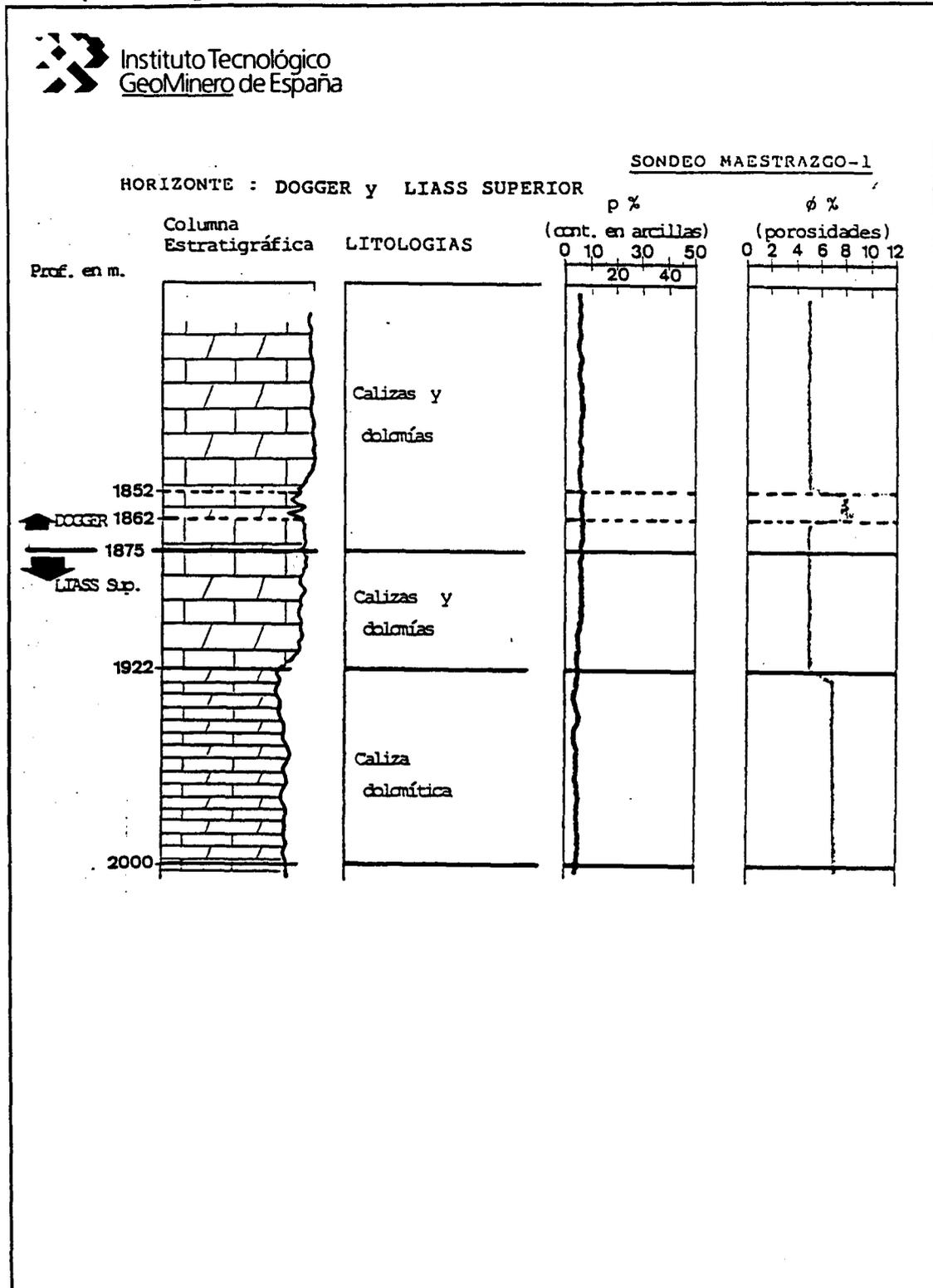
El tramo más inferior, que da paso al Rethiense, presenta una fracturación muy importante (ver figura 46) con desarrollo de cavernas, no siendo posible calcular porosidades en este tramo.

En conjunto, se trata de un tramo de gran potencia con alternancias de tramos margosos y de tramos limpios con un contenido medio en arcillas del 5% y porosidad media del 5%.

Atendiendo, exclusivamente, a las características de almacén destacan varios tramos. Uno de los tramos se sitúa entre los 2036 y los 2133 mts. Se trata de una caliza dolomitizada con laminaciones margosas y desarrollo de cavernas. Un segundo tramo corresponde a los 2217 a 2255 mts., se trata de una caliza dolomítica margosa con un 10% de arcillas y porosidades del 8%. Similares características presenta el tramo comprendido entre los 2272 y 2327 mts., aunque algo más margoso. Un último tramo de dolomías calcáreas, entre los 2327 y 2373 mts., con escasa cantidad en arcillas (< 5%) y porosidades del 10%.

- A muro del Lias inferior se sitúa el Rethiense, nivel de tránsito del Jurásico al Triásico. Se trata de un nivel de dolomías y anhidritas (carniolas) muy oquerosas. El estudio de detalle de este nivel indica la existencia de un tramo en contacto con el Lias inferior, de anhidritas y arcillas con dolomías, de nula porosidad; un tramo de dolomías con porosidades del 2% y contenidos en arcillas del 5-10%; otro tramo de anhidritas y arcillas; un cuarto

de dolomías con porosidades del 6%; y un último tramo de anhidritas y arcillas con dolomías que dan paso al Keuper (ver figura 47).



**FIGURA 45, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del DOGGER-LIAS SUPERIOR.**

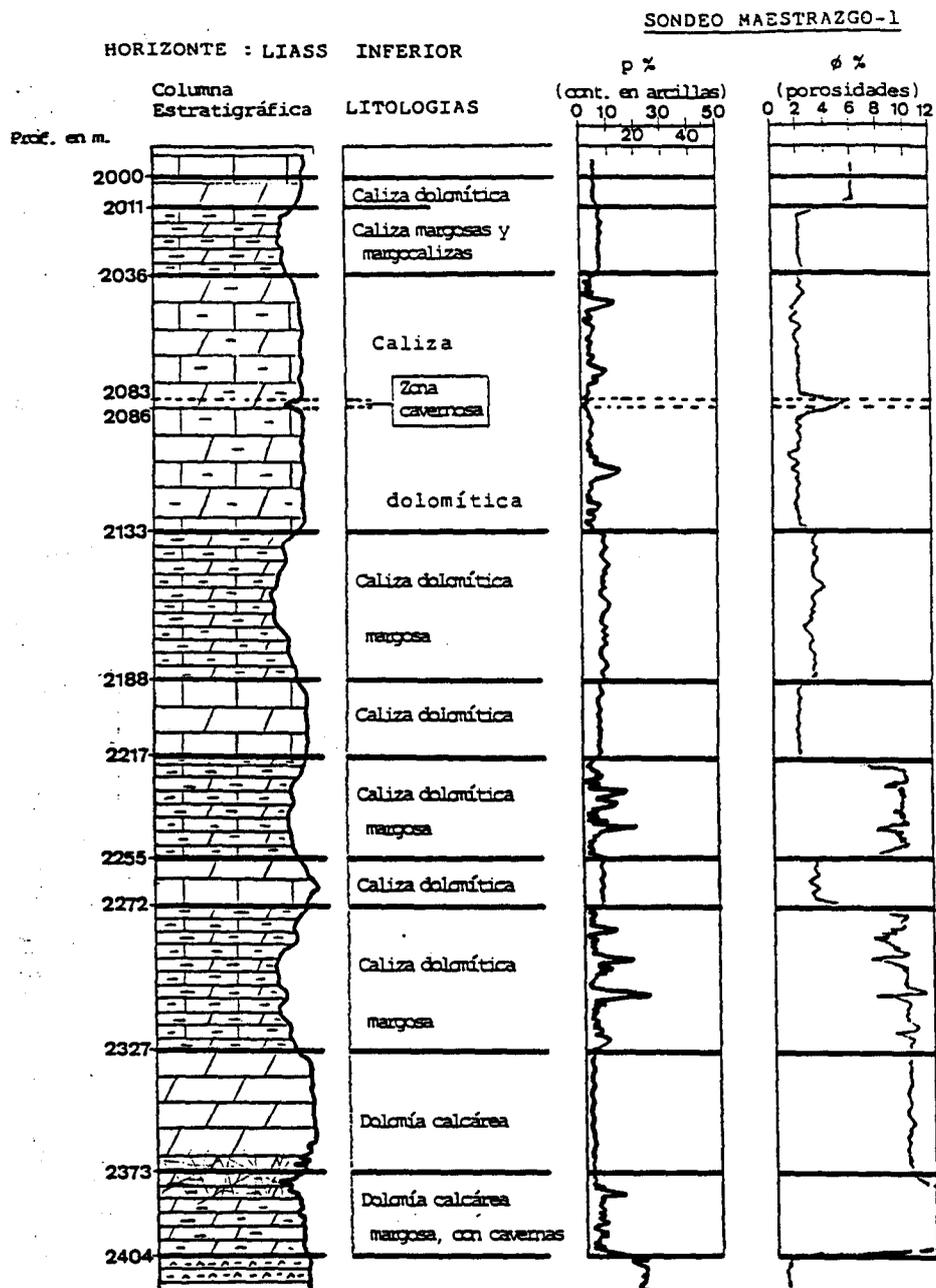


FIGURA 46, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del LIAS INFERIOR.

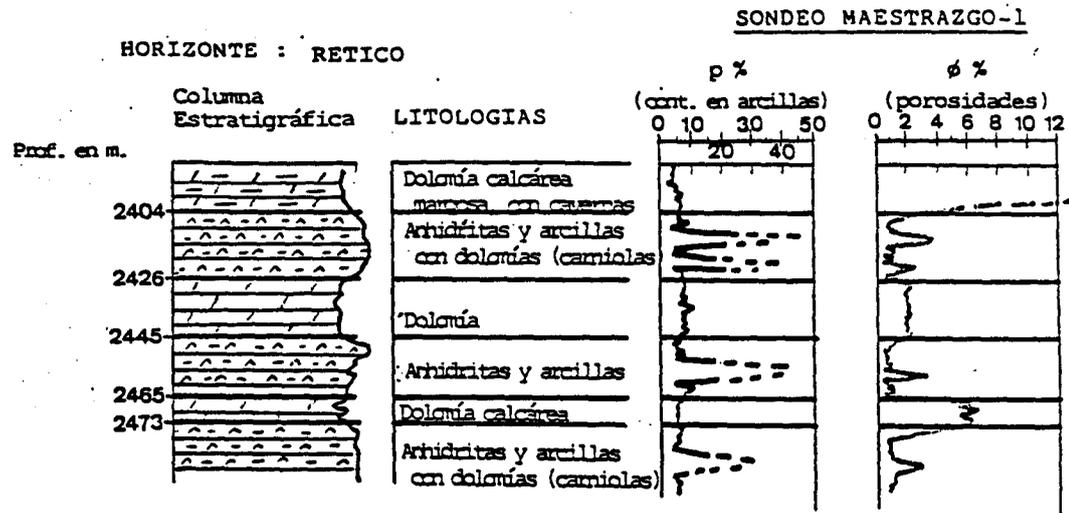
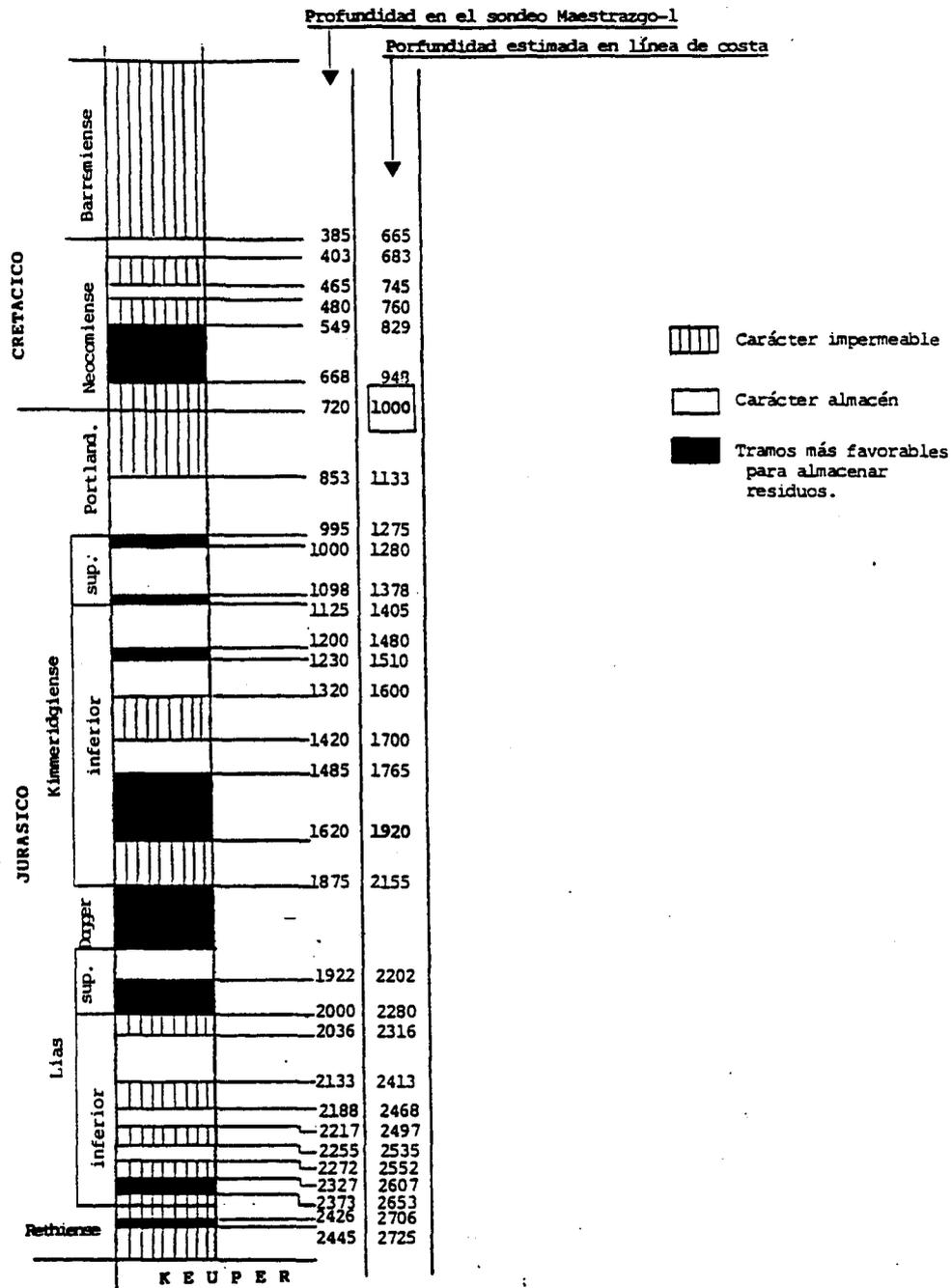


FIGURA 47, Contenido en arcillas -p- y porosidad real aproximada -φ- del RETHIENSE.

La revisión de las pruebas de DST en el megaciclo jurásico indican la existencia de aguas más o menos dulces hasta el techo rethiense (más de 2.000 mts.)

Este hecho es debido a que estos materiales han sufrido lavado por acción de las aguas meteóricas en función de la existencia de afloramientos de estos niveles jurásicos en el borde sur de este área.

Se ha elaborado un diagrama simple (figura 48) en el que resumir toda la información obtenida de este estudio de detalle, de modo que llegamos a establecer que tramos son los más impermeables (carácter margoso o salino), los que presentan cierto carácter almacén, en cuanto al escaso o prácticamente nulo contenido en arcillas y relativa importante porosidad, y los que presentan mejores condiciones para almacenar residuos. A esta información se le ha añadido el dato de las profundidades a las que se encuentran estos tramos en el sondeo Maestrazgo-1, y la profundidad que se estima se encuentran estos niveles en la línea de costa.



**FIGURA 48, Tramos definidos para el Jurásico en el AREA DE VINAROS, características y profundidades.**

ESTUDIO DE DETALLE DEL MESOZOICO EN EL AREA DE VINAROSZ

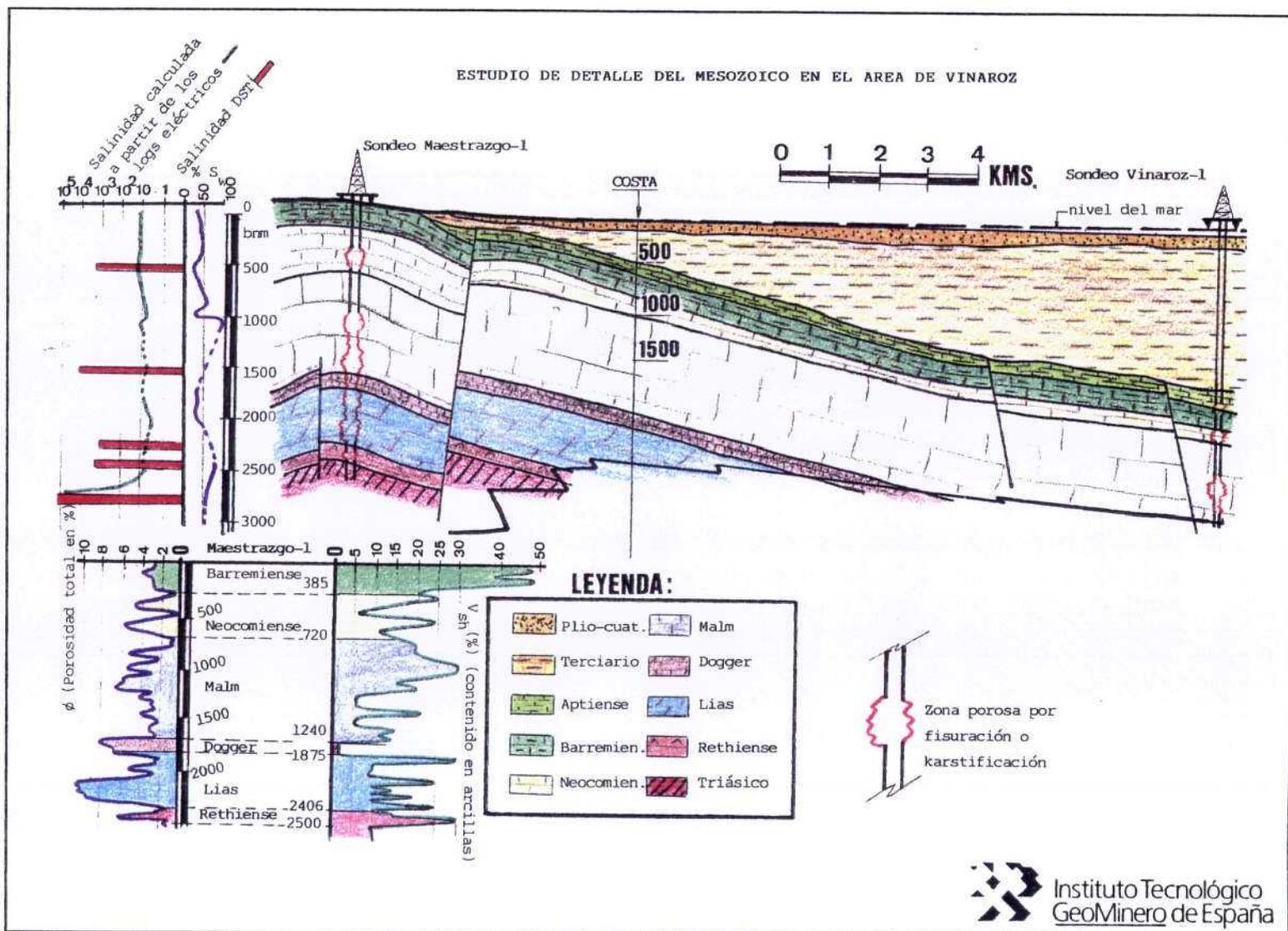


FIGURA 49, Lámina resumen para el estudio de detalle realizado en los megaciclós Cretácico y Jurásicos en el AREA DE VINAROS.

## 6. RESUMEN DEL ESTUDIO DEL SUBSUELO. SELECCION DE AREAS CON POSIBILIDADES. SOLUCIONES PROPUESTAS.

### 6.1 Introducción

El análisis detallado de la información y documentación geológica existente, especialmente de investigación de hidrocarburos, ha permitido seleccionar para su estudio dos áreas relativamente extensas de la provincia de Castellón. Estas dos áreas han sido denominadas en el presente informe área de Vinarós y área de la Plana de Castellón.

La primera ocupa la mitad norte de la provincia, aunque las posibilidades de utilización de almacenes profundos se concretan al área costera, ya que es ahí donde convergen condiciones geológicas y necesidades de eliminación de residuos.

La segunda área seleccionada se concreta en la unidad morfológica conocida como la Plana de Castellón, siendo también desde el punto de vista geológico y de generación de residuos la zona costera la más interesante.

La accidentada tectónica, con estructura compresiva-distensiva compleja, que origina un modelo de alternancia de fosas y horsts, desaconseja tomar en consideración las áreas interesantes de la provincia de Castellón como objetivo de futuras operaciones de inyección. Precisamente este modelo estructural pone en comunicación las formaciones permeables profundas con otras más someras, que por sus características pueden contener importantes recursos hídricos. La selección y estudio de detalle de una estructura o punto de inyección en las áreas interiores de la provincia, requeriría la aplicación de técnicas de prospección muy caras ( sísmica y sondeos profundos).

Por otra parte, hay que señalar que estas áreas interiores son las que menos concentración urbana e industrial presentan actualmente, por lo que su interés es menor.

### 6.2 Selección de almacenes

Como resultado del estudio de subsuelo realizado, es posible seleccionar las siguientes formaciones permeables como posibles almacenes para la inyección de residuos:

- \* Areniscas del Buntsandstein: formas lenticulares de areniscas englobadas en potentes paquetes arcillosos que actuarían de formación confinante. Su porosidad es muy variable de una zona a otra. Está presente tanto en la mitad Norte como en la Sur. El conocimiento que se tiene de este almacén, desde el punto de vista de características hidrogeológicas, es que, si bien, superficialmente se puede

comportar como buen acuífero, en profundidad deja de serlo, tanto por la mayor compactación de las areniscas, como por la presencia de una matriz arcillosa en los lentejones. Esta arcilla puede ser, por otra parte, uno de los mayores impedimentos o dificultades a la hora de realizar una inyección de residuo.

- \* Dolomías del Muschelkalk inferior (M1): Este nivel de carbonatos, principalmente dolomías con alguna intercalación margosa y de brechas dolomíticas, presenta muy buenas características hidrogeológicas en aquellas zonas en que por su poca profundidad constituyen acuíferos explotables (principalmente áreas interiores de la mitad Sur -Sierra del Espadán y adyacentes-). Este almacén se encuentra confinado por un importante paquete margoso-evaporítico (M2).

El estudio de los sondeos profundos en la zona Norte, indica que estas dolomías son muy compactas, con escasa porosidad y permeabilidad, siendo en principio poco aconsejable su selección como objetivo almacén de inyección.

Sin embargo en la zona Sur (Plana de Castellón) los datos existentes indican una importante permeabilidad en esta formación. No obstante estos datos están referidos a acuíferos poco profundos y debe ser confirmados mediante sondeos que corten este almacén en zonas en que se encuentre a mayor profundidad.

- \* Dolomías del Muschelkalk superior (M3): Formación carbonatada, constituida por dolomías, en algunas ocasiones margosas con escasos niveles de calizas. Su mayor potencia la alcanza en la mitad Sur de la provincia donde puede alcanzar los 150 metros.

En profundidad suele estar confinado por una potente formación impermeable (Keuper) que se compone de dos series evaporíticas, con una serie detrítica entre ambas (arcillas versicolores, sales, anhidritas, etc..).

De características hidrogeológicas similares a la formación almacén anterior, se encuentra, asimismo, muy compactada en la mitad Norte, como pone demuestra el estudio de sondeos.

- \* Formaciones carbonatadas jurásicas: En todo el ciclo jurásico se presentan abundantes y muy potentes paquetes carbonatados (calizas y dolomías) que alternan con importantes niveles margosos-arcillosos.

Son especialmente destacables los niveles de carnioles del Rethiense (o Rético), las calizas y dolomías del Dogger y Malm, y dentro de este último, sobre todo las de edad Kimmeridgiense.

Estas formaciones se encuentran presentes en toda la provincia, pero sólo pueden considerarse objetivo almacén de residuos en las áreas costeras de la mitad Norte, ya que, tanto en las áreas interiores de esta mitad, como en toda la mitad Sur, se encuentran aflorantes o muy poco superficiales, afectadas por una tectónica compleja y constituyendo acuíferos de agua dulce.

- \* Formaciones calcáreas del Cretácico: Tanto en el Cretácico Superior como en el Inferior (Aptense y Neocomiense, respectivamente) existen importantes formaciones permeables constituidas principalmente por calizas. En el caso del cretácico inferior, estas formaciones se encuentran generalmente confinadas por importantes paquetes margosos de gran extensión. En el primer caso (cretácico superior) el nivel calcáreo cierra el ciclo, por lo que las formaciones confinantes hay que buscarlas en los materiales arcillosos que constituyen el Terciario detrítico.

Estos almacenes cretácicos se encuentran generalmente a poca profundidad, conteniendo agua escasamente salada, lo que constituye un serio inconveniente desde el punto de vista de la inyección. están siendo explotados como recursos hídricos, tanto en la Plana de Castellón. como en las áreas costeras de la mitad Norte (Planas de Vinarós-Peñíscola y Oropesa-Torreblanca).

Por ello, en principio, debe ser descartados estos materiales como objetivos de una posible inyección.

### 6.3 Conclusiones

Resumiendo lo expuesto en anteriores apartados, y concretando sobre las formaciones con posibilidades reales de constituir almacenes para eliminar residuos, podemos concluir:

- 1) Sólo parece viable llevar a cabo operaciones de inyección de residuos en almacenes geológicos profundos asociados a áreas costeras de la provincia de Castellón.
- 2) En la mitad Sur de la provincia -Plana de Castellón-, sólo se podría pensar en inyectar residuos en las formaciones dolomíticas de los tramos inferior y superior del Muschelkalk (M1 y M3). Dentro de estas formaciones habría que seleccionar las áreas en que contengan agua salada, que serán las muy próximas a la costa, ya que a 10-15 kms. de la costa, en la zona de Betxi, existen sondeos de agua que explotan este acuífero a profundidades de 200-400 metros.

En la línea de costa se puede prever que la formación almacén se encuentre entre 650-850 metros (ver figura 37). Se disponen de muy pocos datos sobre este

almacén en profundidad. En el sondeo marino Golfo de Valencia B-1, se estimaron pérdidas de 36 m<sup>3</sup>/h a nivel del Muschelkalk, que se cortó a 1200-1250 metros. La salinidad del fluido de formación se estima en 35.000 ppm, según el estudio de las diagrfías.

- 3) En la mitad Norte de la provincia se encuentran las Planas costeras de Vinarós-Peñíscola y Oropesa-Torreblanca.

Las formaciones almacén seleccionadas se reducen a los diferentes tramos carbonatados del Jurásico, que deben encontrarse, los niveles más permeables, según los estudios y extrapolaciones realizados durante el presente estudio, a profundidades superiores a los 1700 metros:

Malm.....	1750-1920 metros
Dogger.....	2150-2200 metros
Lias.....	2600-2650 metros
Rhetiense.....	2700-2725 metros

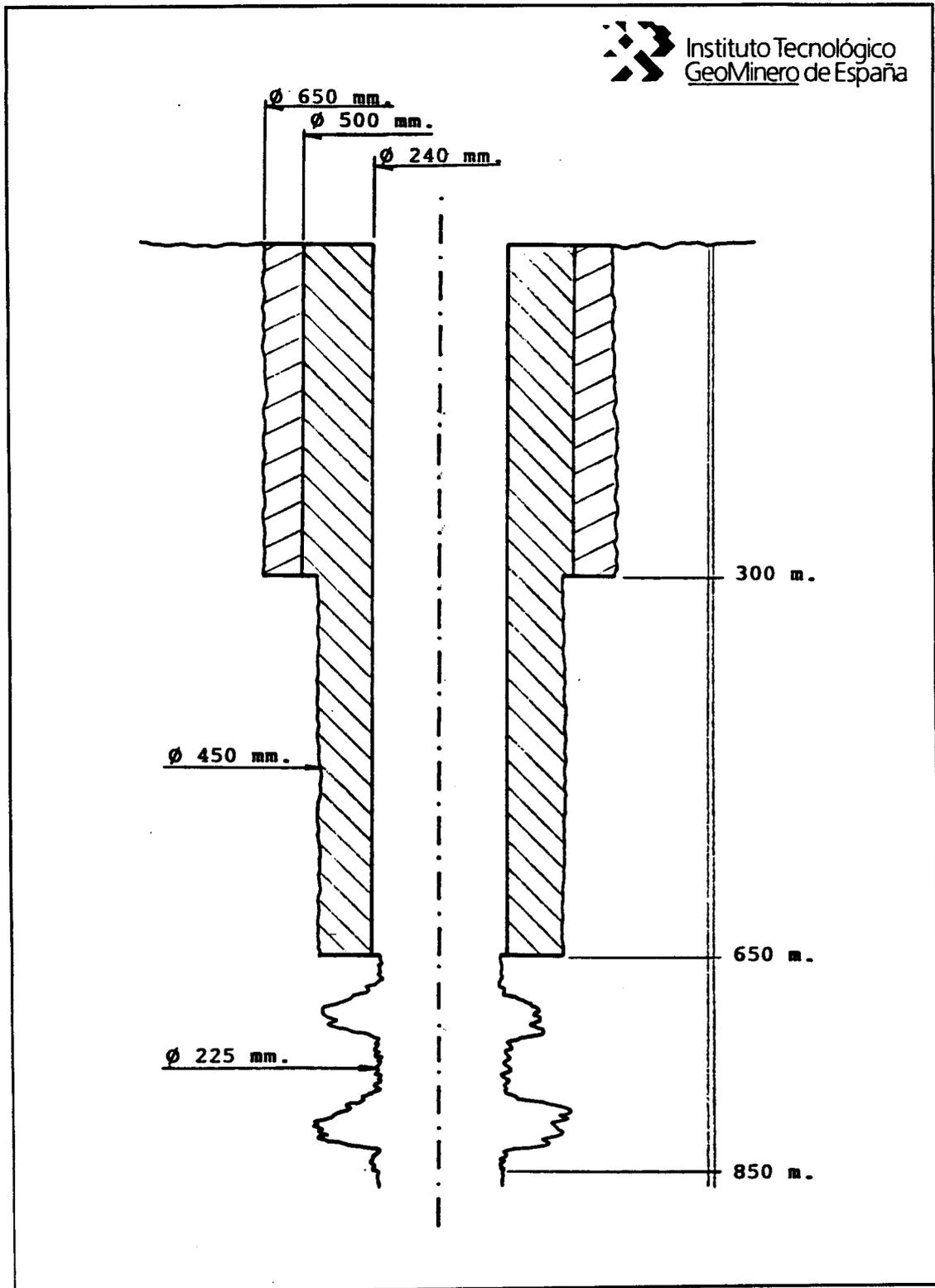
Estas profundidades están deducidas a partir de los datos del sondeo Maestrazgo-1, así como de los perfiles sísmicos de la concesión marina Vinarós y el sondeo marino Vinaroz-1 (ver figura 49). Los tramos seleccionados presentan una elevada permeabilidad, con desarrollos cavernosos, donde se detectaron importantes pérdidas de circulación durante la perforación. La salinidad del agua contenida en todos ellos debe ser alta (superior a 20.000 ppm).

Todos los tramos están confinados por la presencia de formaciones margosas tanto en el mismo Jurásico como en el Cretácico.

#### 6.4 Propuesta de soluciones

Considerando todos los datos expuestos en capítulos anteriores de este informe, y las conclusiones presentadas en el apartado anterior, se van a describir en el presente apartado las soluciones que se proponen caso que se estime viable la posibilidad de eliminar residuos líquidos mediante la inyección en formaciones profundas de la provincia de Castellón.

En dichas soluciones se describirán someramente las investigaciones preliminares que se recomienda realizar, así como la previsión de un posible sondeo de inyección con presupuesto estimado.



**Figura 50, Sondeo de inyección propuesto para la zona Sur de la provincia de Castellón de la Plana.**

A continuación se presenta un presupuesto estimado del sondeo propuesto. El tipo de máquina a utilizar es similar a una M-2500 o L-2500:

Concepto	Cantidad (Millones de Ptas.)
Plataforma (a)	10
Mob. y Demob. (b)	15
(*) Perforación (c)	17.5
Triconos (d)	6
Tuberías (e)	8.5
Cementaciones (f)	10
Diagrafías (g)	5
Lodos (h)	3
Accesorios entubación (i)	2
Ingeniería (Dirección Técnica + Ensayos) (j)	18
<b>SUMA.....</b>	<b>95</b>
<b>Imprevistos (k).....</b>	<b>10</b>
<b>TOTAL.....</b>	<b>105</b>

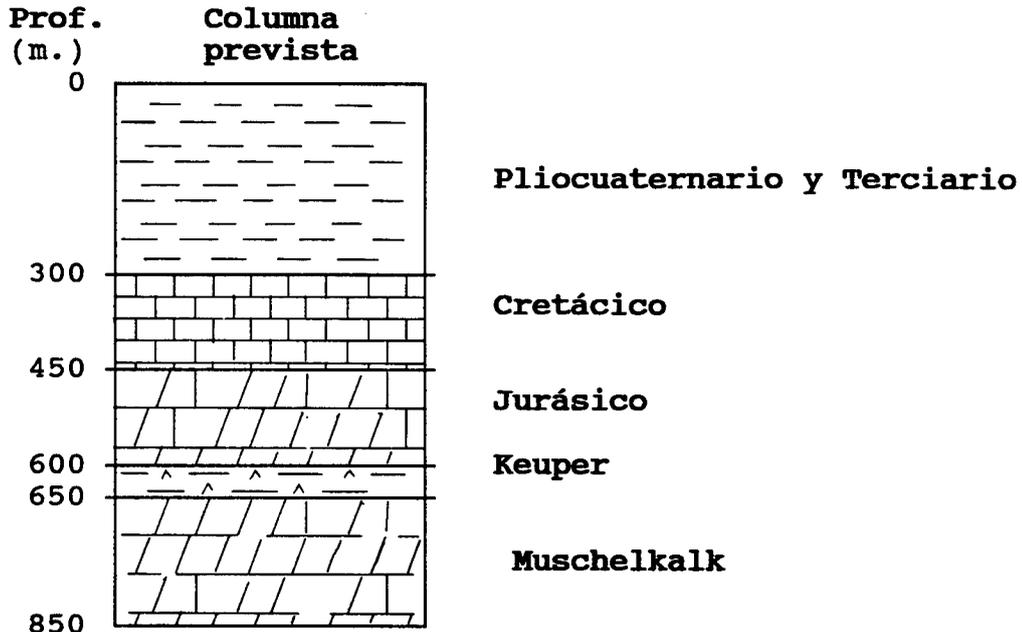
(\*) Perforación: 50 días x 350000 Pts/día

Este presupuesto podría verse incrementado sustancialmente si la profundidad del almacén supera los 1000 metros.

#### 6.4.1 Zona Sur. Plana de Castellón.

Dentro de las áreas más costeras de la Plana de Castellón, hasta Chilches, las zonas, en principio, más favorables serían las septentrionales, entre Burriana y Castellón de la Plana, donde el almacén se encontraría más profundo.

El corte geológico previsto podría concretarse en:



Para un caso concreto habrá que llevar a cabo una prospección sísmica preliminar que permitiera fijar con más precisión la profundidad de las diferentes capas en las proximidades del punto o área deseada.

Una vez propuesto un modelo de inyección, con datos más precisos de profundidades que los descritos anteriormente, y antes de acometer la construcción de un sondeo de dimensiones adecuadas, se debería realizar un sondeo de reconocimiento que alcanzará el almacén en diámetros de 100-150 mm., que permita recoger testigos, así como la ejecución de pruebas de producción (test de formación -DST-), que ofreciese datos de permeabilidades.

Confirmada, pues, la profundidad del almacén (650-850 metros) se propone el siguiente programa de sondeo:

<b>PERFORACION:</b>		
Profundidad (m.)	Diámetros (mm.)	
0 - 300	650	
300 - 650	450	
650 - 850	225	

<b>ENTUBACION:</b>		
Profundidad (metros)	Diámetro exterior (mm.)	Espesor (mm.)
0 - 300	500	12
0 - 650	240	10-11

Ambas tuberías cementadas hasta superficie.

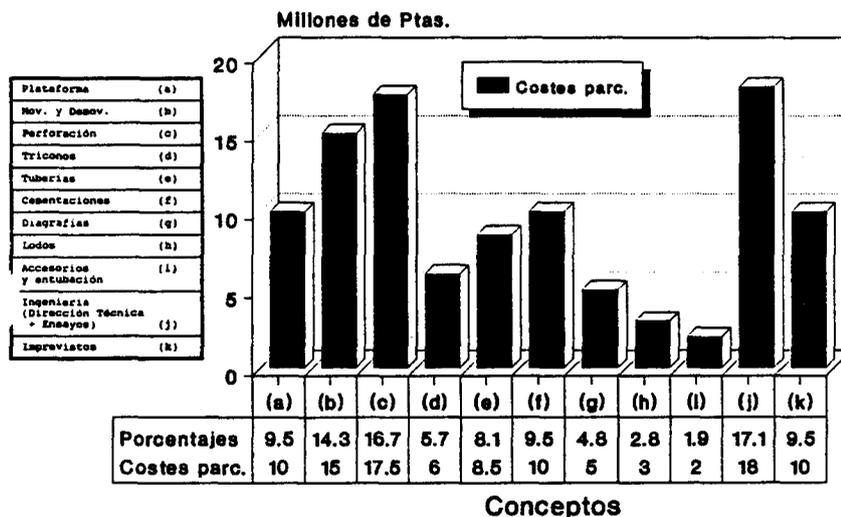
El almacén se podría dejar en open-hole (ver figura 50).

Habría que tomar testigos del almacén para los ensayos de compatibilidad con los residuos a inyectar.

Una vez finalizado el sondeo y siguiendo las normas habituales en este tipo de perforación se llevarían a cabo operaciones de desarrollo (air-lift, acidificación, etc.) si los datos obtenidos en el primer ensayo así lo indicaran.

Por último se realizaría un ensayo de producción-inyección para estimar la capacidad del sondeo.

**PRESUPUESTO EJECUCION SONDEO INYECCION**  
(Zona SUR provincia de Castellón)



Cálculo estimativos



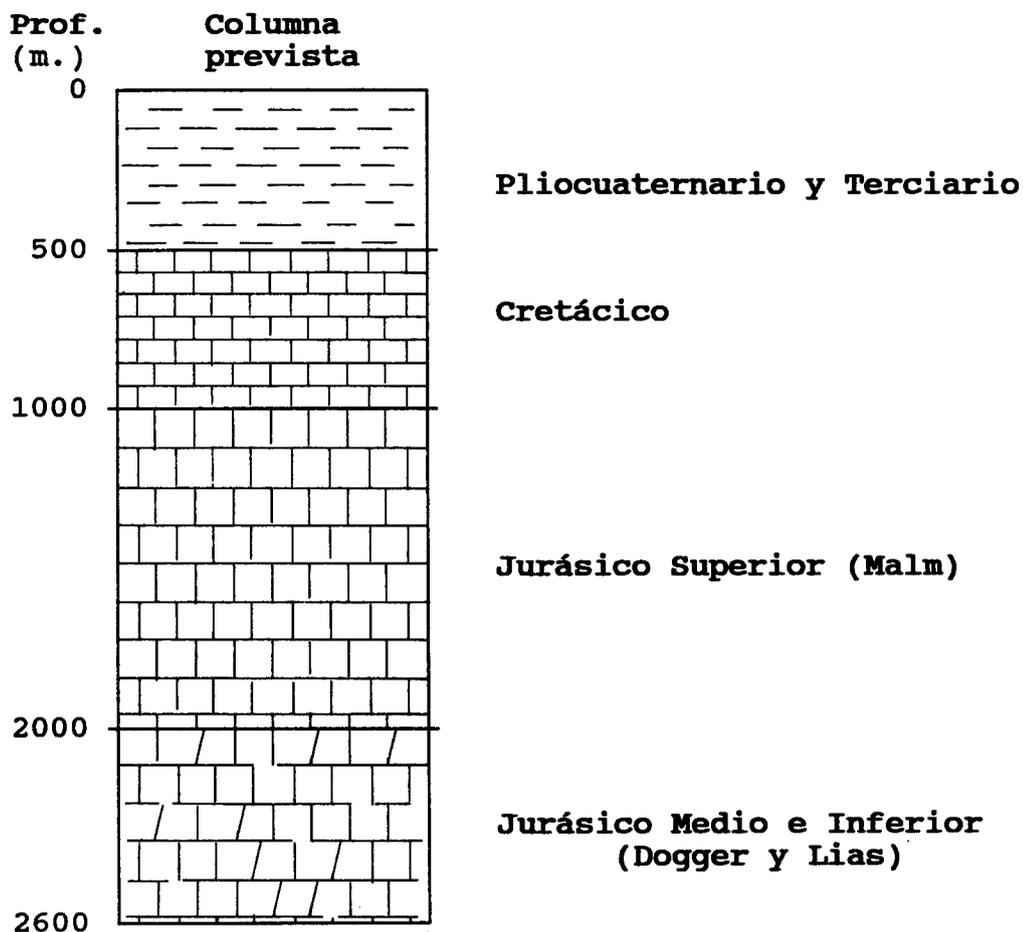
Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**Figura 51, Presupuesto ejecución del sondeo de inyección en la zona Sur de Castellón.**

#### 6.4.2 Zona Norte. Area de Vinarós-Peñiscola-Oropesa

Comprende las concentraciones urbanas próximas a la costa. Los datos disponibles (sísmica, sondeos profundos) se refieren a la zona más septentrional (Vinarós-Benicarló).

El corte geológico previsto se puede concretar en:



Dadas las profundidades a las que se encuentran los almacenes, se recomienda, siguiendo las normas establecidas, llevar a cabo un estudio preliminar de prospección sísmica, no siendo recomendable la ejecución de un sondeo de reconocimiento previo, pues este comportaría un presupuesto muy elevado.

A la vista de los datos disponibles de los sondeos Maestrazgo-1 y Vinaroz-1, se seleccionaría como zona de inyección los paquetes cavernosos y fracturados del Malm, que de confirmarse las profundidades previstas estarían a 1700-1950 metros. Esta sería la zona más transmisiva, y por tanto, de mejores condiciones para la inyección. No obstante no habría que despreciar ora zona más alta -1480-1510 metros- de elevada permeabilidad (la perforación del propio sondeo de inyección lo indicaría).

Se propone, en principio, el siguiente programa para la ejecución del sondeo de inyección:

<b>PERFORACION:</b>		
Profundidad (m.)	Diámetros (mm.)	
0 - 400	500	
400 - 1400	325	
1400 - 1950	225	

<b>ENTUBACION:</b>		
Profundidad (metros)	Diámetro exterior(mm.)	Espesor (mm.)
0 - 400	350	12
0 - 1400	240	10

Ambas tuberías cementadas hasta la superficie. El almacén se podría dejar en open-hole.

Habría que tomar testigos del almacén para posteriores ensayos de compatibilidad con el residuo a inyectar.

A la finalización del sondeo se realizarán los mismos ensayos que en el sondeo propuesto para la zona Sur.

A continuación se presenta un presupuesto estimativo del sondeo de inyección. El tipo de máquina a utilizar sería similar a la GD-800 con capacidad de 500000 a 700000 libras.

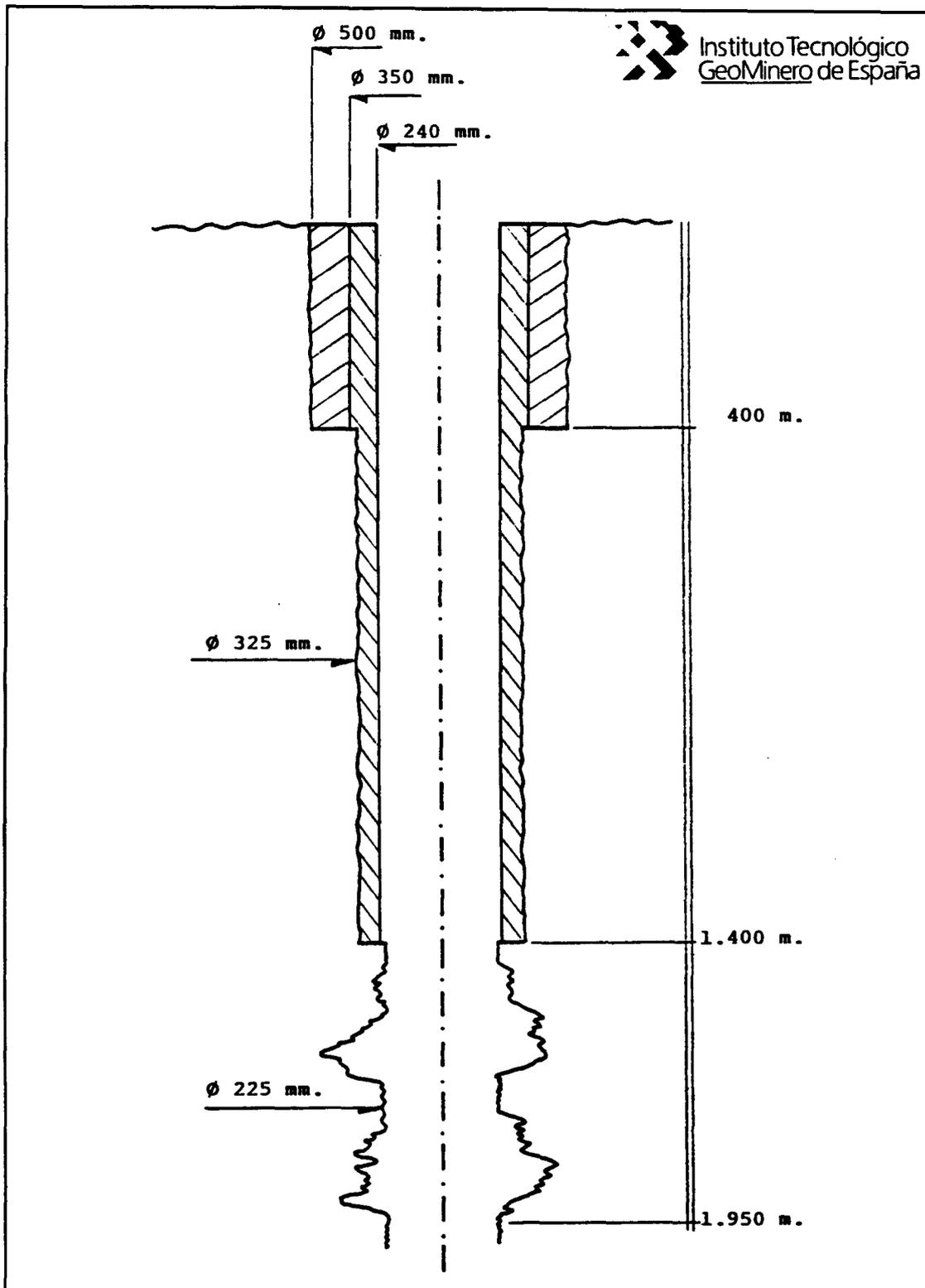


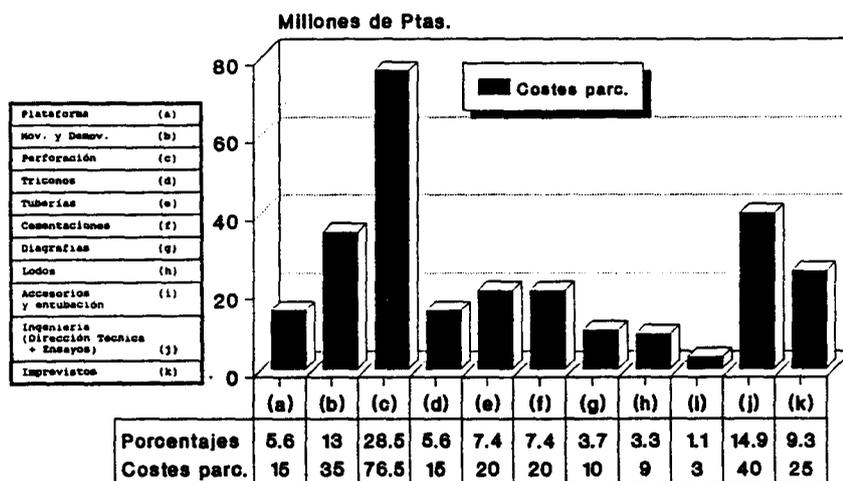
Figura 52, Sondeo de inyección propuesto para la zona Norte de la provincia de Castellón de la Plana.

(\*)

Concepto	Cantidad (Millones de Ptas.)
Plataforma (a)	15
Mob. y Demob. (b)	35
Perforación (c)	76
Triconos (d)	15
Tuberías (e)	20
Cementaciones (f)	20
Diagrafías (g)	10
Lodos (h)	9
Accesorios entubación (i)	3
Ingeniería (Dirección Técnica + Ensayos) (j)	40
<b>SUMA.....</b>	<b>243</b>
<b>Imprevistos (k).....</b>	<b>25</b>
<b>TOTAL.....</b>	<b>268</b>

(\*) Perforación: 80 días x 950000 Pts/día

**PRESUPUESTO EJECUCION SONDEO INYECCION**  
(Zona NORTE provincia de Castellón)



Cálculo estimativos

Conceptos



**Figura 53, Presupuesto ejecución del sondeo de inyección en la zona Norte de Castellón.**

## 7. RESIDUOS LIQUIDOS EN LA PROVINCIA DE CASTELLON

En este apartado se ha recopilado toda la información existente al objeto de cuantificar y caracterizar los residuos líquidos en la provincia de Castellón.

Esta fase del proyecto se ha visto muy dificultada por la escasez, ambigüedad y dispersión de los datos disponibles.

### 7.1 Residuos líquidos urbanos

#### 7.1.1 Estimación de volúmenes a inyectar

En base a los datos de las fichas municipales recogidas en el Atlas Hidrogeológico de Castellón, se han estimado los volúmenes de residuos líquidos urbanos generados en las zonas costeras de la provincia de Castellón.

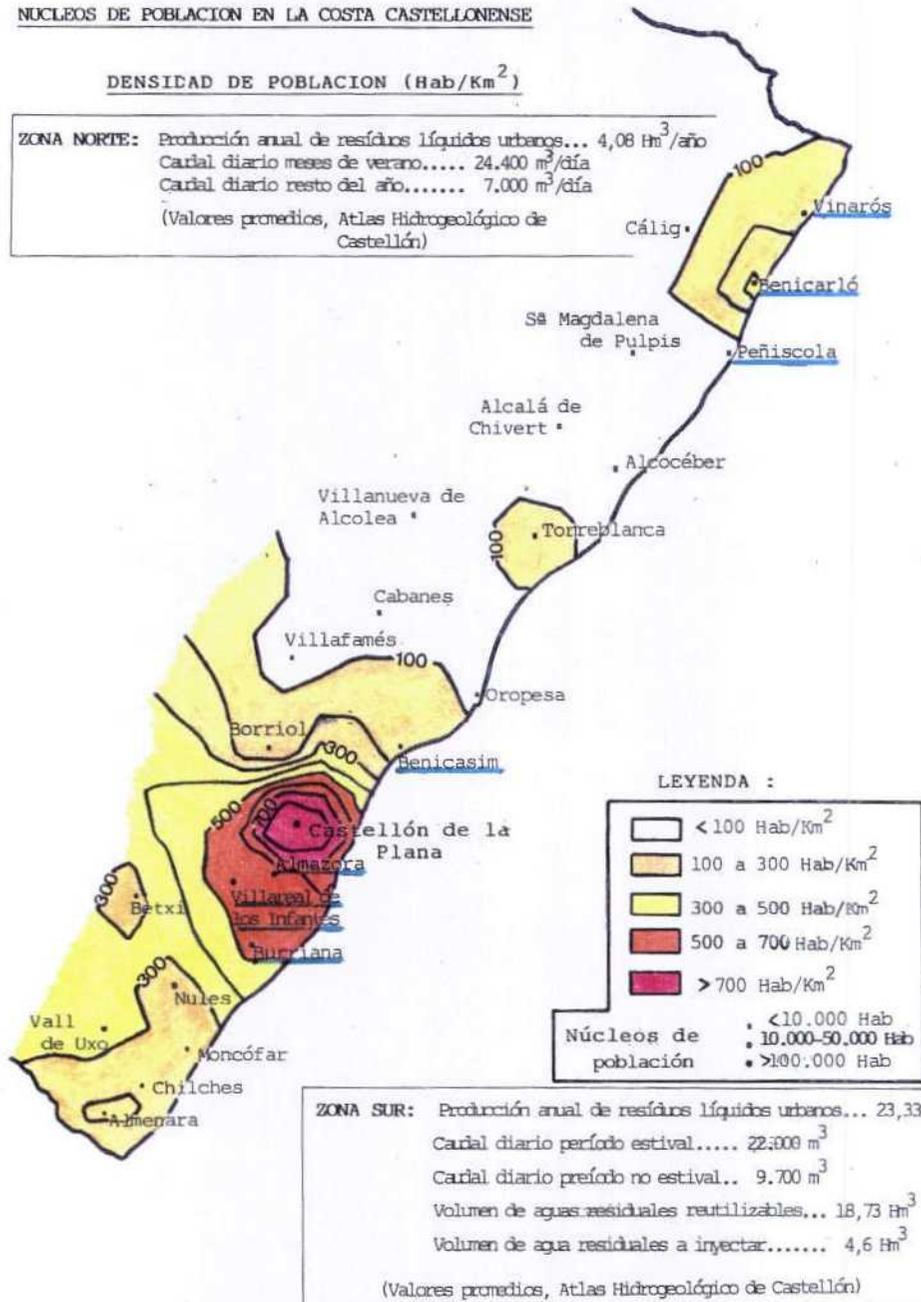
En la figura 54 se han representado los principales núcleos de población de la costa castellonense, realizándose un esquema de la densidad de población. Los datos tenidos en cuenta corresponden a las poblaciones de hecho municipales del censo de 1986. En esta figura se observa que es la zona próxima a Castellón la más densamente poblada, y por tanto el área que potencialmente generará más residuos líquidos. Hay que tener en cuenta que esta zona ve multiplicada su población en los meses de verano como consecuencia de la afluencia de turistas a las costas. Se ha tenido en cuenta este hecho para calcular el volumen de residuos anual generado en cada una de las zonas escogidas por su posibilidades para eliminar los residuos líquidos mediante inyección en estructuras profundas.

Como se observa en la figura 54, en lo que respecta a la zona Norte, que incluye, entre otros, los municipios de Vinaroz,, Benicarló y Peñíscola, se estima una producción anual de residuos líquidos urbanos de  $4,08 \text{ Hm}^3$ , siendo el caudal diario en los meses de verano de  $24.400 \text{ m}^3$  y en el resto del año de  $7.000 \text{ m}^3$ . Para la zona Sur, la más densamente poblada, que incluiría las poblaciones de Benicasim, Almazora, Villareal, Burriana y Castellón de la Plana, se estima una producción anual de residuos líquidos de  $23,33 \text{ Hm}^3$ , para un caudal diario en los meses de verano de  $22.000 \text{ m}^3$ , y de  $9.700 \text{ m}^3$  durante el resto del año. En esta zona Sur parte de las aguas residuales se reutilizan, teóricamente de los  $23,33 \text{ Hm}^3$ , un volumen de  $18,73 \text{ Hm}^3$  se reutiliza, el resto  $4,6 \text{ Hm}^3$  sería susceptible de ser eliminada por inyección en estructuras profundas.

**NUCLEOS DE POBLACION EN LA COSTA CASTELLONENSE**

**DENSIDAD DE POBLACION (Hab/Km<sup>2</sup>)**

**ZONA NORTE:** Producción anual de residuos líquidos urbanos... 4,08 Hm<sup>3</sup>/año  
 Caudal diario meses de verano..... 24.400 m<sup>3</sup>/día  
 Caudal diario resto del año..... 7.000 m<sup>3</sup>/día  
 (Valores promedios, Atlas Hidrogeológico de Castellón)



**LEYENDA :**

	< 100 Hab/Km <sup>2</sup>
	100 a 300 Hab/Km <sup>2</sup>
	300 a 500 Hab/Km <sup>2</sup>
	500 a 700 Hab/Km <sup>2</sup>
	> 700 Hab/Km <sup>2</sup>
<b>Núcleos de población</b>	
	< 10.000 Hab
	10.000-50.000 Hab
	> 100.000 Hab

**ZONA SUR:** Producción anual de residuos líquidos urbanos... 23,33 Hm<sup>3</sup>  
 Caudal diario período estival..... 22.000 m<sup>3</sup>  
 Caudal diario período no estival.. 9.700 m<sup>3</sup>  
 Volumen de aguas residuales reutilizables... 18,73 Hm<sup>3</sup>  
 Volumen de agua residuales a inyectar..... 4,6 Hm<sup>3</sup>  
 (Valores promedios, Atlas Hidrogeológico de Castellón)

**Figura 54, Núcleos de población en la costa castellonense. Densidad de Población. Producción de residuos líquidos.**

En la figura 55 se ha intentado plasmar la producción de aguas residuales urbanas en los principales núcleos de población de la costa castellonense, diferenciando entre zona norte y sur.

En esta misma figura se han estimado las producciones de aguas residuales en litros/habitante/día, las producciones media diaria y punta diaria, para las distintas poblaciones.

Asimismo se ha esquematizado el tratamiento que reciben estas aguas residuales, destaca el hecho que en la zona norte no son tratadas y eliminadas en el mar, mediante emisarios o directamente.

En la zona sur, son tratadas en su mayor parte y reutilizadas, al menos teóricamente, con lo que aunque los volúmenes producidos son mayores los caudales de inyección serían menores que en la zona norte.

De la figura 55 se obtiene como conclusión más importante, la más acuciante necesidad de abordar el tema de la eliminación de residuos líquidos urbanos en la zona norte, desprovista de infraestructura para depuración y reutilización. Siendo este problema menos acuciante en la zona sur.

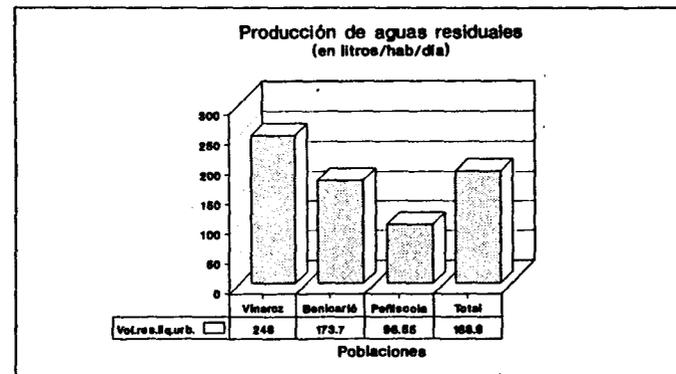
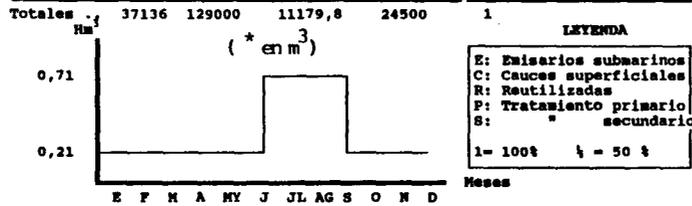
Figura 55, Producción de aguas residuales urbanas en los principales núcleos de población de la costa castellonense. Zona Norte-Zona Sur.

167

PRODUCCION DE AGUAS RESIDUALES URBANAS EN LOS PRINCIPALES  
NÚCLEOS DE POBLACION DE LA COSTA CASTELLONENSE

ZONA NORTE

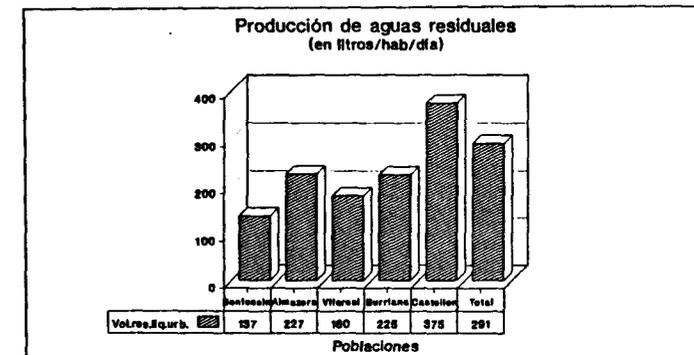
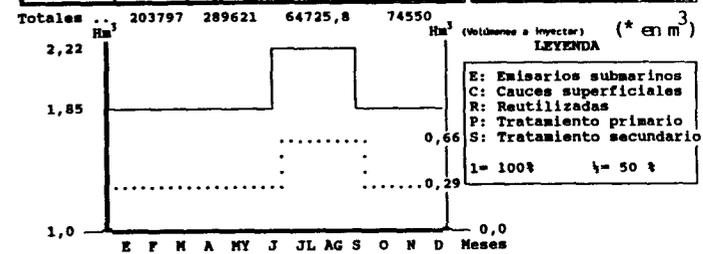
Núcleo de población	Población		Producción media diaria *	Producción punta diaria *	% DE AGUAS RESIDUALES								
	No estival	Estival			No trat.	Tratadas		E C R		P S			
VINAROS	17575	54000	6520	15000	1								
BENICARLO	17061	25000	3262,5	4500	1								
PERISCOLA	2500	50000	1397,3	5000	1								
Totales	37136	129000	11179,8	24500	1								



Fuente: Atlas Hidrogeológico de Castellón de la Plana.

ZONA SUR

Núcleo de población	Población		Producción media diaria *	Producción punta diaria *	% DE AGUAS RESIDUALES								
	No estival	Estival			No trat.	Tratadas		E C R		P S			
BENICASIM	3985	85000	3279,3	12000	1								
ALMAZORA	15608	15608	3543	3600					1	½	½		
VILAREAL	39013	39013	7015	7100					1	½	½		
BURRIANA	25191	30000	5848,5	6750									
CASTELLON	120000	120000	45040	45100					1				1



Fuente: Atlas Hidrogeológico de Castellón de la Plana.

### 7.1.2 Métodos de eliminación usuales

En la figura 56 se ha intentado esquematizar el estado actual de la infraestructura para la eliminación de residuos líquidos urbanos e industriales en la costa castellonense, tomada esta información del "ESTUDIO DE ACTUALIZACION DEL INVENTARIO DE ZONAS LITORALES DEL MEDITERRANEO ESPAÑOL MAS CONTAMINADAS (FICHAS MUNICIPALES) - AMBIO, S.A.".

De la observación de la figura 56 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

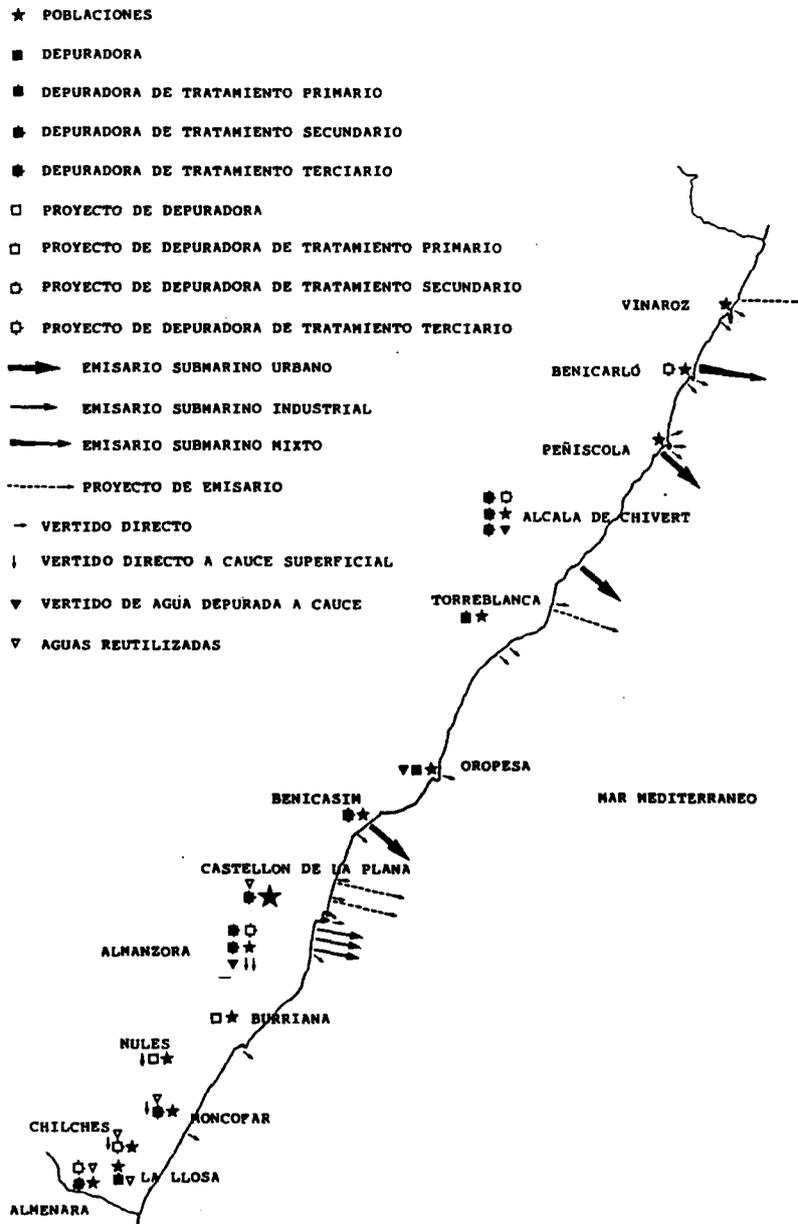
- \* En la zona norte la eliminación de residuos en las zonas costeras se realiza mediante emisarios submarinos en las costas correspondientes a los municipios de Benicarló y Peñíscola, mientras que en la zona de Vinaroz, existe un proyecto de emisario. Existen varios puntos en los que se vierten directamente en la costa. Concretamente en la Playa del Riu, junto a la desembocadura del Río Cervol, y según el estudio de actualización del inventario de zona litorales del mediterráneo español más contaminadas, se produce un vertido directo de las aguas residuales urbanas, no siendo utilizada la zona habitualmente para baños. Es en este mismo punto donde se prevee un proyecto de emisario submarino. En Benicarló existe un emisario submarino mixto (aguas residuales urbanas e industriales), si bien junto al Parador, zona Sur del Puerto -"Colonia Europa"-, y según el estudio de actualización del inventario de zona litorales del mediterráneo español más contaminadas, el colector normalmente vierte directamente en la costa, ya que los conductos están rotos, afectando en los meses de verano a las zonas de baños -ver fotos de la figura 57, tomadas del proyecto anteriormente citado de la empresa AMBIO,S.A.-.

En Peñíscola existe un emisario submarino que vierte al mar los residuos a 1 km. de la costa. Si bien también existen puntos de vertido directo.

En lo referente a depuración de aguas residuales sólo en Benicarló existe un proyecto para la realización de una estación depuradora de tratamiento terciario.

- \* En la zona sur existe una mayor infraestructura para la depuración de aguas residuales, existiendo en el área de influencia de Castellón un total de 3 estaciones de depuración, y dos proyectos, uno en Burriana y otro en Almazora. La eliminación de aguas residuales se efectúa mediante vertido en cauces y emisarios submarinos, o bien mediante vertido directo en la costa.

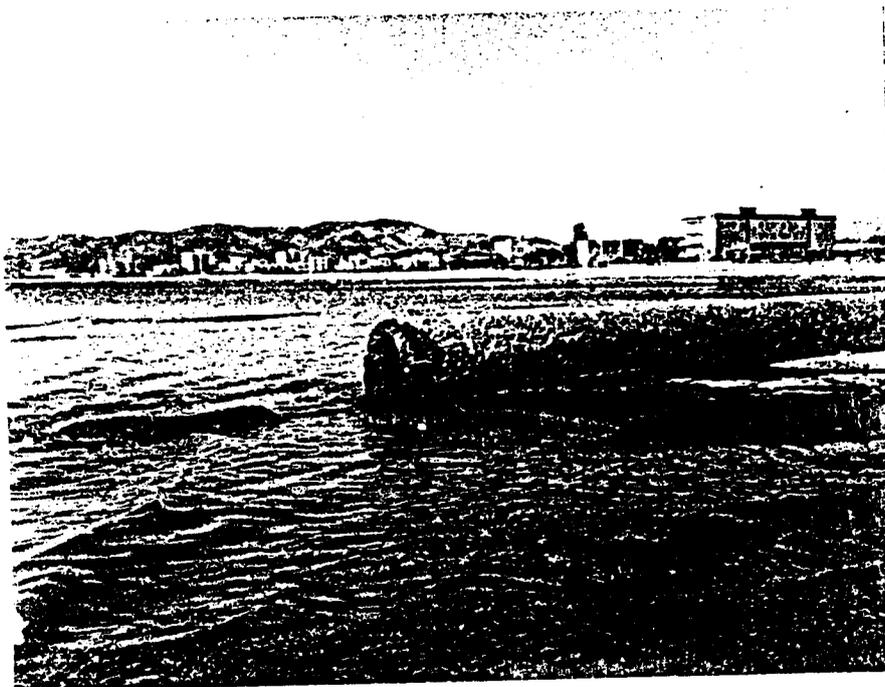
**ESTADO ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA PARA LA ELIMINACION DE RESIDUOS  
LIQUIDOS URBANOS E INDUSTRIALES EN LA COSTA CASTELLONENSE**



ESTUDIO DE ACTUALIZACION DEL INVENTARIO DE ZONAS LITORALES DEL  
MEDITERRANEO ESPAÑOL MAS CONTAMINADAS  
(FICHAS MUNICIPALES) - AMBIO, S.A.



**Figura 56, Estado actual de la infraestructura para la eliminación de residuos líquidos urbanos e industriales en la costa castellanense.**



**Figura 57, fotocopias de fotos existentes en el "ESTUDIO DE ACTUALIZACION DEL INVENTARIO DE ZONAS LITORALES DEL MEDITERRANEO ESPAÑOL MAS CONTAMINADAS (FICHAS MUNICIPALES) AMBIO, S.A.".**

Concretamente, y según el estudio de actualización del inventario de zona litorales del mediterráneo español más contaminadas, en el municipio de Castellón en las Playa El Palmeral -Acequias Autilles y Rajalacena- se vierte directamente sobre la arena, afectando a más de 500 metros desde la desembocadura de estas acequias, por otra parte, en muy mal estado, existiendo signos aparentes de contaminación de las arena y el agua, siempre según se desprende del estudio anteriormente citado.



**Figura 58, fotocopias de fotos existentes en el "ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE ZONAS LITORALES DEL MEDITERRANEO ESPAÑOL MAS CONTAMINADAS (FICHAS MUNICIPALES) AMBIO, S.A.".**

Existen varios puntos de vertidos directos a la costa y proyectos de emisarios, como puede observarse en la figura 56.

### **7.1.3 Características de los vertidos**

La caracterización de los vertidos ha sido realizada en base a la consideración de la zona norte como una zona de densidad de población media, por lo que se puede estimar que la composición media del residuo líquido urbano correspondería a la siguiente tabla:

ZONA NORTE Aguas residuales no depuradas..... 4,08 Ha<sup>2</sup>

CARGA CONTAMINANTE

	ppm	Tn/año
Sólidos totales	700	2.856
Sólidos disueltos	500	2.040
Sólidos en suspensión	200	816
Materia sedimentable(ml/l)	10	40,8 l.
DBO	200	816
DCO	500	2.040
N total	40	163,2
P total	10	40,8
Cloruros	50	204
Carbonatos *	100	408
Aceites y grasas	100	408

\* Estos valores se pueden ver modificados en función de la concentración total del agua de aceptación.

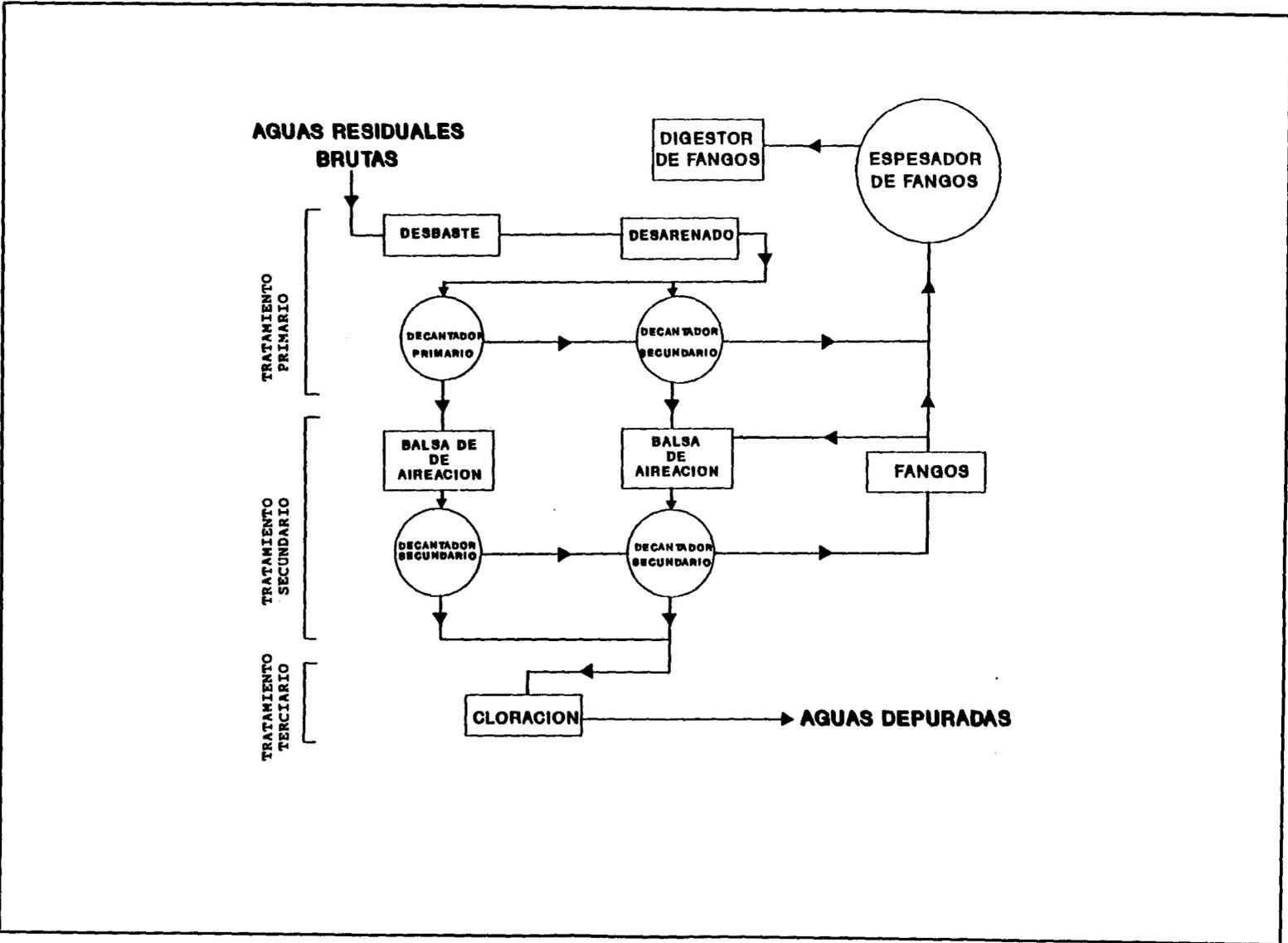
**Figura 58, Aguas residuales urbanas. Caracterización. Zona Norte.**

Para la zona Sur se han distinguido 2 efluentes, uno correspondiente a aguas residuales urbanas no depuradas en zonas densamente pobladas, y otro correspondiente al efluente de la estación de depuración de Castellón de la Plana.

Esta Planta de Depuración permite llegar hasta una fase terciaria, presenta el siguiente esquema de trabajo que aparece en la figura 59.

Las características -carga contaminante- de los efluentes residuales urbanos anteriormente citados, se expresan en la figura 60.

Figura 59, Esquema de funcionamiento de la Estación Depuradora de Castellón de la Plana.



ZONA SUR	Agua residuales no depuradas.....	4,6 Hm <sup>3</sup>
	Agua depuradas reutilizables.....	18,73 Hm <sup>3</sup>

CARGA CONTAMINANTE

	ppm	Tn/año
Sólidos totales	1.200	5.520
Sólidos disueltos	850	3.910
Sólidos en suspensión	350	1.610
Materia sedimentable(ml/l)	20	92 l.
DBO	300	1.380
DQO	1.000	4.600
N total	85	391
P total	20	92
Cloruros <sup>1</sup>	100	460
Carbonatos <sup>2</sup>	200	920
Aceites y grasas	180	690

<sup>1</sup> Estos valores se pueden ver modificados en función de la concentración total del agua de aportación.

Conductividad	1.610 µS/cm.	
pH	7,5	
	ppm	Tn/año
Sólidos en suspensión	36	674,28
DBO	22	412,06
DQO	68	1.273,64
Nitratos	161	3.015,53
Carbonatos	493	9.233,89
Cloruros	176	3.296,48
Na	97	1.816,81
K	14	262,22
Ca	120	2.247,60
Mg	34	636,82

Estos valores corresponden a la central de depuración de Castellón de la Plana.

Figura 60, Aguas residuales urbanas. Caracterización. Zona Sur.

## 7.2 Residuos líquidos industriales

### 7.1.2 Tipos de industrias y localización

Las industrias existentes en el litoral castellonense susceptible de producir un residuo importante, tanto por su volumen como por su nocividad para el medio natural, pueden agruparse en los siguientes sectores:

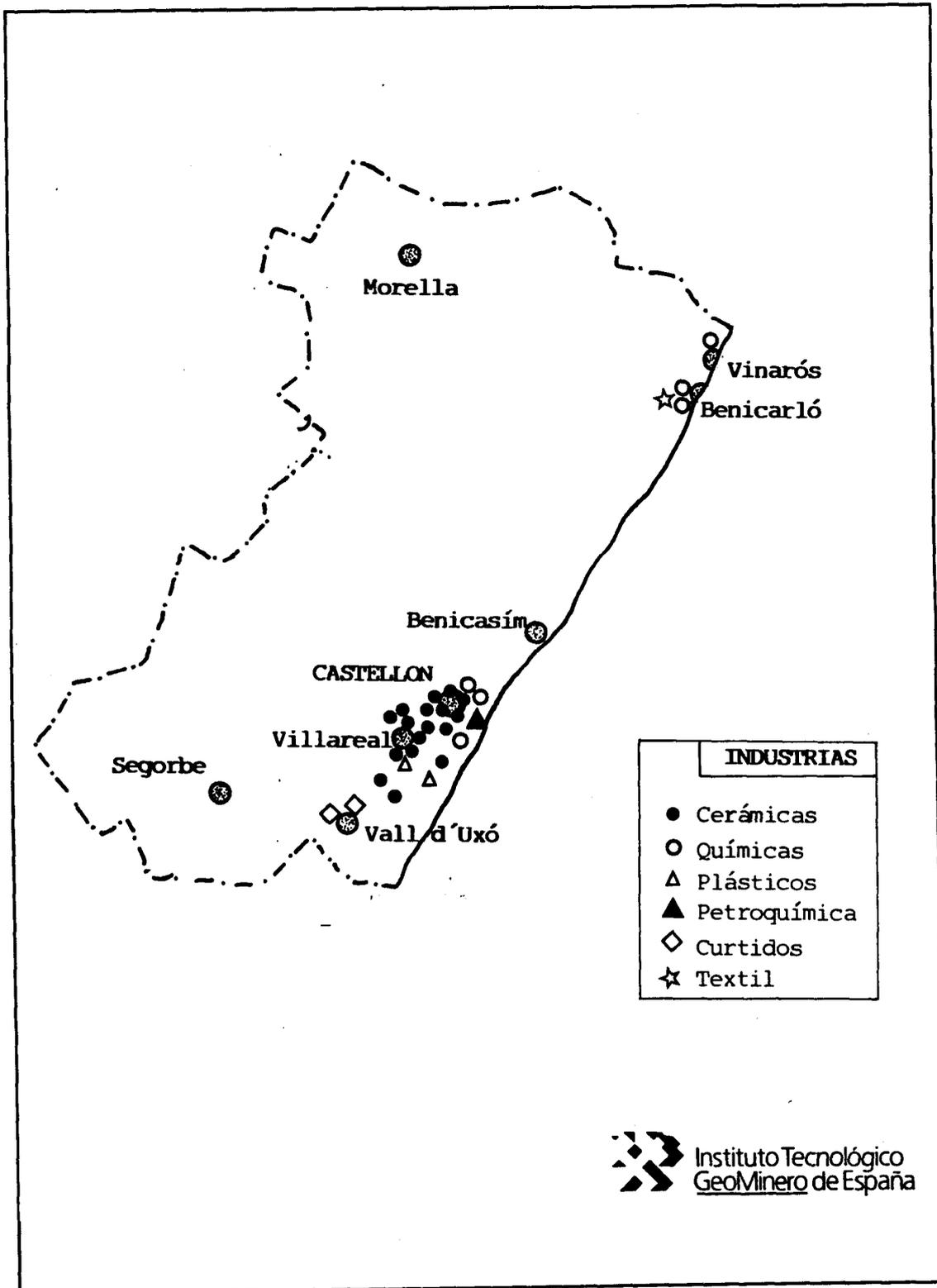
- \* Cerámicas (18)
- \* Químicas (6)
- \* Textiles (1)
- \* Petroquímicas (1)
- \* Plásticos (2)
- \* Curtidos (2)

Siendo la industrias cerámicas las de mayor implantación, seguidas de las químicas y petroquímicas.

La distribución espacial de estas industrias aparece en la figura 61.

En el estudio de compatibilidad hubiera sido necesario un conocimiento más exhaustivo de los efluentes de estas industrias, tanto cuantitativamente como cualitativamente, en el espacio y el tiempo. Ante las dificultades que hemos encontrado para poder obtener esta información, hemos tenido que tomar datos generales y medios del INVENTARIO NACIONAL DE ACTIVIDADES INDUSTRIALES CONTAMINADORAS DE LAS AGUAS. X

Ante la dificultad de conocer los efluentes de la industria química, por la complejidad de esta, hemos tenido que apartar del estudio de compatibilidad estas industrias.



 Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**Figura 61, Localización de industrias potencialmente más contaminantes en el litoral castellonense.**

### 7.2.2 Métodos de eliminación usuales

La situación queda reflejada en la figura 56, donde se representaron los métodos de eliminación, tanto de las aguas residuales urbanas como las industriales.

Las conclusiones a que podríamos llegar serían similares a las expuestas en el apartado 7.1.2.

Si bien, para los efluentes industriales no conocemos si las propias industrias efectúan algún tipo de tratamiento.

Lo que está claro es que es que ante una posible inyección de residuos industriales los datos sobre estos deberían ser más exhaustivos y detallados.

### 7.2.3 Características de los vertidos

A continuación pasamos a caracterizar los residuos de las industrias finalmente escogidas.

Recordar que estos residuos son generales, y por tanto, no responden a la realidad de las industrias realmente instaladas y en funcionamiento en esta área.

#### \* Industria textil (Acabado de la lana)

Características de un residuo medio	
pH	9-12
DBO	4000 (ppm)
DQO	6000 (ppm)
Aceites y grasas	3300 (ppm)

#### \* Industria Petroquímica (Planta de destilación)

Características de un residuo medio	
DBO	111 (ppm)
DQO	247 (ppm)
Fenoles	0.64 (ppm)
Amoniaco	8.26 (ppm)

Sulfuros	10.3 (ppm)
Cromo total	0.77(ppm)
Cromo hexavalente	0.35(ppm)
Aceites y grasas	49 (ppm)

**\* Industria cerámica**

La caracterización de estos residuos aparece en la tabla siguiente:

	TRATAM. FIS. DECANTAC.		TRATAM. FISICO-QUIMIC	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
pH	7.0	7.7	5.1	5.4
Cond. (us/cm)	860	1613	1018	2560
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	203	879	50	415
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	78	370	7	500
Cl <sup>-</sup>	42	149	99	621
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0.5	80	<0.5	181
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0.01	7.3	<0.01	19.4
Na <sup>+</sup>	45	84.9	50	427
K <sup>+</sup>	4	11	3	14
Ca <sup>++</sup>	112	241	78	194
Mg <sup>++</sup>	18	54	10	71
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<0.1	1.75	<0.01	17.9
SiO <sub>2</sub>	11.4	27.8	2.4	29.4
B	4.1	22	1.2	23
F <sup>-</sup>	<0.5	6	<0.5	4

Concentraciones en mg/l

	TRATAM. FIS. DECANTAC.			TRATAM. FISICO-QUIMICO		
	MIN.	MAX.	MEDIO	MIN.	MAX.	MEDIO
Cu	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Zn	20	5100	300	10	20700	6803
Cd	<5	19	12	<5	20	10
Cr	<5	11	<5	<5	8	<5
Fe	<200	220	<200	<200	1014	251
Mn	<10	38	<10	<10	400	100
Pb	<25	1075	160	<25	332	90
Al	<50	618	102	<50	1134	162
Li	<50	100	54	<50	180	62
Co	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ni	<10	<10	<10	<10	19	<10
Ti	<5	101	<5	<5	9	<5
V	<5	32	10	<5	73	<5
Zr	<100	<100	<100	<100	<100	<100

Concentraciones en ug/l

## 8. ESTUDIOS DE COMPATIBILIDAD DE LOS RESIDUOS CON LAS ROCAS ALMACEN

### 8.1 Objetivos de los estudios de compatibilidad

Con estos estudios de compatibilidad se pretende investigar la inyectabilidad del residuos o residuos en la formación almacén, en relación a la compatibilidad, facilidad colmatante, y otras propiedades que determinen su aptitud para ser inyectados en dicha formación geológica.

A continuación aparece un cuadro donde se especifican que factores deben considerarse en la evaluación de la aptitud de los residuos para su inyección mediante sondeos profundos.

- A. Volumen
- B. Características físicas
  - B.1 Densidad
  - B.2 Viscosidad
  - B.3 Temperatura
  - B.4 Contenido de sólidos en suspensión
  - B.5 Contenidos de gases
- C. Características químicas
  - C.1 Constituyentes disueltos
  - C.2 pH
  - C.3 Estabilidad química
  - C.4 Reactividad
    - \* Con los componentes del sistema
    - \* Con el fluido nativo de la formación
    - \* Con los minerales de la formación
  - C.5 Toxicidad
- D. Características biológicas

Tabla tomada del Seminario "La inyección en sondeos profundos. Una alternativa en la lucha contra la contaminación"-Problemática de la inyección de residuos industriales en sondeos profundos (José Sánchez Guzmán).

El residuo ha de ser física y químicamente compatible con todos los materiales del sondeo, y como es lógico, con la formación almacén y el fluido contenido en ella.

En esta primera fase de evaluación de posibilidades, no se tendrán en cuenta todos los factores de inyectabilidad relacionados con el sondeo (perforación, materiales para tuberías, etc.), pues sería objeto de un proyecto particular de inyección. Nos centraremos en la evaluación y estimación de qué

fenómenos acompañarían a la inyección del residuo en su interacción con la roca almacén y el fluido contenido en ella. Se hace imprescindible, por tanto, un conocimiento exhaustivo de las propiedades del residuo y del conjunto fluido-roca de la formación almacén.

Resulta muy importante la realización de estos ensayos de compatibilidad, no sólo para la estimación del movimiento del fluido, sino para la evaluación de las condiciones de productividad del sondeo de inyección, al objeto de evitar procesos que incomodarían las operaciones de inyección o incluso implicarían la no operatividad de mismo.

Por otra parte, y aunque de menor importancia, estos estudios presentan el interés de evaluar que posibles reacciones pudieran producirse entre el residuo y la roca de cobertera, ya que, aunque se trataría de un material impermeable que ofreciese las suficientes garantías de estanquidad, podría aportar al reaccionar con el residuo algunos constituyentes nocivos a la formación almacén.

## 8.2 Caracterización de la formación almacén

En base a los datos ofrecidos por los sondeos de petróleo se han caracterizado los tramos almacén que, en función de todo el estudio precedente, se entiende son los niveles más interesantes como soporte de las operaciones de inyección.

Se ha diferenciado entre ZONA NORTE o AREA DE VINAROSZ y ZONA SUR o AREA DE LA PLANA, ya que las rocas almacén presentan características diferentes.

Características de la roca almacén en la ZONA NORTE	
Cobertera	-----> Margas
Almacén	-----> Calizas y dolomías (Jurásico) Proporción de dolomías siempre inferior al 50%
Contenido en arcillas inferior al 15%, normalmente 5%	
Contenido en hidrocarburos 65-280 ppm	
Agua de formación: Salinidad 10.000-20.000 ppm (Cl <sup>-</sup> ) Densidad 1.01 g/cc	
Temperatura de la formación 120°F(49°C)	

	Características de la roca almacén en la ZONA SUR
Cobertera	-----> Margas y yesos (Keuper-Muschelkalk II)
Almacén	-----> Dolomías (Muschelkalk)
Contenido en arcillas inferior al 10%	
Agua de formación: Salinidad 40.000-45.000 ppm (Cl <sup>-</sup> ) Densidad 1.02 g/cc	
Temperatura de la formación 54°C	

### 8.3 Estudio de compatibilidad

Este informe ha sido elaborado en base a parámetros y condiciones estimadas o supuestas. Las conclusiones que se exponen tiene, tan sólo, carácter hipotético y orientativo, por tanto, no deben ser utilizadas para el diseño de un proyecto real de inyección de residuos, lo cual exigiría un estudio de detalle más profundo, en base a datos más estrictos y exactos.

Atendiendo al espíritu de este proyecto, este estudio de compatibilidad, realizado sobre los escasos datos de residuos existentes y las caracterización de las formaciones almacén anteriormente expuesta, sólo es válido tenerlo en cuenta en una estimación inicial de las posibilidades de inyección, apuntándose importantes datos que deberán ser objeto de un estudio más detallado en fases posteriores.

#### Características físicas y químicas del almacén

Las dos formaciones seleccionadas como posible almacén para el residuo inyectado son calizas y dolomías (Zona Norte) o dolomías (Zona Sur), con importantes fracturación y contenidos en arcillas menores del 10%. Estas características imponen una serie de condicionantes a los procesos de interacción con el residuo:

- \* El pH de la mezcla debe oscilar entre 6 y 8 unidades de pH, como consecuencia del efecto tampón ejercido por el equilibrio carbonato-hidrogenocarbonato-CO<sub>2</sub>.
- \* Los mecanismos de adsorción sobre arcillas no presentarán eficacias elevadas, ya que su proporción es baja y, sobre todo, debido al hecho de que la permeabilidad sea preferentemente por fracturación y no por porosidad.
- \* La fracturación de la roca almacén permite suponer que los problemas de colmatación no van a ser graves, al menos hasta ciertos niveles acumulados de inyección.

Por otra parte dicha fracturación conlleva bajos tiempos de retención de los contaminantes solubles, que podrán desplazarse con facilidad a partir del punto de introducción, acompañando al flujo de agua.

- \* Las temperaturas reinantes en las formaciones (49°C y 52°C, respectivamente) permiten, en principio, el desarrollo de la actividad microbiológica.

### Actividad Microbiológica

Los residuos que se inyectarán en la Zona Norte provienen de industrias cerámicas y textiles (de acabado de lana). Los valores de D.B.O., especialmente elevados en el segundo caso, junto al ambiente y temperatura existentes en la formación permiten suponer que va a existir moderada o intensa actividad bacteriana en el fluido de la mezcla.

Bajo las condiciones que cabe esperar en la formación es previsible que se consuma materia orgánica por medio de las bacterias desnitrificantes y reductoras de nitratos, así como por las reductoras de sulfatos, produciéndose una reducción de nitratos, sulfatos y de compuestos férricos y mangánicos de la formación, que resulta en la aparición de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SH}_2$ , S,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , ion amonio,  $\text{N}_2$  y  $\text{NO}_2^-$ .

Estas acciones suponen la presencia en el medio de cationes que pueden ser oxidados y dar lugar a hidróxidos insolubles, y la liberación de gases que, por oclusión en poros, pueden llevar aparejada una reducción de la permeabilidad. En la formación que nos ocupa, este peligro es menor debido a que la permeabilidad viene dada, principalmente, por fracturación.

Existe el peligro adicional de la formación de lodos bacterianos, originados por los propios microorganismos, que hacen de puente de unión (cementan) entre los granos finos inorgánicos, a los que se encuentran anclados, y la materia orgánica residual. Estos lodos, de consistencia coloidal, pueden reducir la permeabilidad, si bien este efecto es mucho más acentuado cuando la misma es por porosidad, y no por fracturación (caso que nos ocupa). De mayor importancia es la función de sustrato que tales lodos desempeñan para la actividad biológica, a la que confiere más inercia y mayor resistencia a las acciones depuradoras, aumentando, consecuentemente, su estabilidad.

En el caso de la Zona Sur, el aumento en el contenido de cloruros del residuo urbano tratado frente al residuo sin acondicionar permite suponer que se ha procedido, en el tratamiento, a una cloración con objeto de eliminar la actividad bacteriana. Si tal cloración ha sido exhaustiva, la práctica totalidad de los microorganismos pueden haber sido destruidos.

La introducción, sin embargo, de residuos urbanos no tratados y de otros provenientes de la industria petroquímica, ambos con valores moderadamente altos de D.B.O., permite conjeturar que, dadas las similares características de la formación respecto a las de la Zona Norte, se producirán procesos biológicos, y sus consecuencias serán parecidas a las ya expuestas.

### Reducción de la permeabilidad

#### a) Hinchamiento de arcillas.

Determinados tipos de arcillas sufren hinchamiento por entrada de moléculas de agua en posiciones interlaminares. El grado de hinchamiento depende, fundamentalmente, de:

- \* El tipo de arcilla.
- \* La naturaleza del fluido que entra en contacto con ella.

Respecto al primer punto se carece de información.

En cuanto al segundo aspecto, la salinidad de los fluidos de las dos formaciones consideradas permite suponer que el grado de hinchamiento no será alarmante, desde el punto de vista de reducción de la permeabilidad.

#### b) Precipitación.

Bajo las condiciones existentes en las dos formaciones objeto del estudio, y, aceptando la presencia de  $\text{SH}_2$  y  $\text{S}^{2-}$  en cantidades suficientes, cabe anticipar que se producirá precipitación de  $\text{Fe}^{2+}$ , así como de Ni, Co, Zn, Pb, As, etc... en forma de sulfuros insolubles.

Este proceso retira metales tóxicos y los problemas de colmatación que pudiera originar (formación de costras) no debieran revestir gravedad, especialmente por ser la permeabilidad de fracturación.

Si la inyección pudiese llegar a inducir un cambio de ambiente en la formación (por ejemplo, por introducción de un efluente con elevadas concentraciones de oxígeno disuelto), a los pH supuestos se produciría precipitación de hidróxidos de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Mn}^{3+}$ , lo cual supondría una reducción importante de la permeabilidad debido a la textura gelatinosa de los precipitados.

La presión parcial de  $\text{CO}_2$  parece ser lo suficientemente elevada, con la contribución de fenómenos anaeróbicos, como para que no se produzca precipitación tal de carbonatos que origine problemas de incrustaciones.

### c) Complejos y sustancias tensoactivas.

Los residuos urbanos no depurados de la Zona Sur pueden incorporar detergentes y otras sustancias tensoactivas en proporciones importantes, acompañadas de proteínas más o menos degradables. De ser este el caso, es previsible la aparición de espumas en el punto de inyección, con la consecuente reducción de la permeabilidad y los problemas que esto acarrea.

No es fácil prever si la temperatura de la formación es lo suficiente elevada como para romper las burbujas por calentamiento y dilatación del gas en ellas ocluido.

La presencia en el residuo de la industria petroquímica de fenoles y compuestos fenólicos policondensados y, más que probablemente, de otras sustancias orgánicas de elevado peso molecular, permiten prever una reducción de la permeabilidad, cuya intensidad dependerá de las cantidades inyectadas. Ello es debido, aparte de a la generación, de nuevo, de espumas; a la formación de complejos con los elementos traza inyectados o presente en el acuífero, los cuales, además, provocan una disminución de la adsorción de los cationes metálicos sobre las arcillas, pudiendo, ellos mismos obturar las posiciones de intercambio. Debe mencionarse, de nuevo, que estos hechos no deben suponer un problema de excesiva gravedad, si se asume que la permeabilidad es, esencialmente, por fracturación.

La información correspondiente a los residuos de la Zona Sur no permite plantear hipótesis respecto a este aspecto.

### Aceites y grasas

Los contenidos en aceites y grasas del residuo correspondiente a la Zona Norte, en especial del de la industria de acabado de lana, son francamente elevados.

Aún sin conocer la naturaleza exacta de estas sustancias, cabe señalar que tendrán una degradabilidad muy baja, permaneciendo en el acuífero durante tiempos muy prolongados.

En principio, su propagación va a ser reducida, acumulándose en la zona adyacente al punto de inyección (la extensión de la contaminación dependerá de la tensión superficial y viscosidad de cada uno de los compuestos presentes en el residuo).

A pesar de que la formación que podría acoger estos residuos presenta, ya de por sí, concentraciones importantes de hidrocarburos, la elevada cantidad de los mismos que se incorpora procedente, esencialmente, de la industria textil, da pie a suponer que se presentarán problemas asociados a la elevada viscosidad de estas sustancias.

Cabe señalar que un efecto colateral de estos compuestos será la retirada del medio, en forma de complejos organometálicos, de algunos cationes metálicos, especialmente V y Ni.

En la Zona sur no parece previsible que se produzcan dificultades graves, ya que, tan sólo los residuos urbanos sin depurar presentan concentraciones algo elevadas de aceites y grasas, pero la cantidad inyectada de la misma, frente a la de los residuos que le acompañan es pequeña.

#### Colmatación por finos

Las concentraciones de sólidos en suspensión introducidas con el residuo de la Zona Norte y con aguas sin depurar de la Zona sur son elevadas, si bien el peligro aparejado de disminución de la permeabilidad es menor en el caso de rocas fisuradas, como son las dos formaciones del estudio.

El problema podría complicarse si tales sólidos vienen acompañados de lodos del sondeo de inyección y si, durante la misma, se movilizan limos o arcillas de la formación.

#### Sustancias tóxicas

Parece claro que, al menos en la Zona Sur se introducirían sustancias tóxicas lo que impone que, independientemente de las interacciones químicas que puedan producirse, las características de la formación deben asegurar su estanquidad e imposibilidad de conexión con acuíferos explotados o explotables.

Los residuos de la industria petroquímica incorporar, además de otros contaminantes no especificados en la información disponible, fenoles y cromo hexavalente.

Los fenoles, clorofenoles y bifenoles, además de su carácter tóxico, son compuestos difícilmente oxidables y poco absorbibles. Su biodegradabilidad es complicada debido a sus propiedades bacteriostáticas y bactericidas; y por todo ello, es prudente suponer que podrán desplazarse dentro de la formación sin perder sus características perjudiciales.

El cromo hexavalente, en forma de ion dicromato, pero especialmente en forma de ion cromato, es muy tóxico y particularmente peligroso por su persistencia. Aunque bajo las condiciones que se esperan en la mezcla quepa suponer que parte de este cromo hexavalente pasará a  $Cr^{2+}$ , esta acción no adquiere toda la intensidad que debiera debido a las características inhibitorias de los procesos bacterianos que presenta el anión cromato.

#### 8.4 Recomendaciones e información suplementaria

No se ha querido caer en el error, con los estudios de compatibilidad, de realizarlos por separado para cada residuo de los escogidos, ya que este trabajo, contemplado en el proyecto resulta orientativo, y no exento de especulación dada la precariedad de datos de que se ha dispuesto, al objeto de no validar lo que sería una inyección real de cualquiera de los residuos aquí estudiados bajo el pretexto de este estudio.

Se reitera la necesidad de profundizar en estos estudios previa la realización de una operación de inyección, por la importancia que estos presentan, pues sus conclusiones condicionan las estimaciones que sobre la inyectabilidad del residuos pudieran formularse.

Si se desea llevar a cabo un estudio real de inyección de residuos debe recabarse, como mínimo, los siguientes parámetros, tanto del residuo a inyectar como de la roca almacén o receptora:

##### Datos necesarios sobre el residuo

- Temperatura y estabilidad térmica
- Viscosidad, densidad y pH.
- Contenido en metales.
- Compuestos orgánicos y su descripción por familias.
- Presencia de detergentes o sustancias tensoactivas.
- Presencia de pesticidas y productos farmacéuticos.
- Oxígeno disuelto.
- Descripción del proceso de depuración, si ha existido.
- Sustancias radiactivas.
- Demanda de oxígeno.

##### Datos necesarios de la formación almacén

- Volumen total y útil de la formación.
- pH y salinidad del agua intersticial.
- Parámetros hidráulicos (permeabilidad, etc..).
- Tipos de arcillas presentes y proporción de cada una.
- Mineralizaciones.
- Aniones y cationes en disolución.

A parte de los estudios de compatibilidad ligados a reacciones fisicoquímicas que pudieran producirse al introducir un agente extraño en un medio estable, existen una serie de problemas que influyen en sobremanera en la inyectabilidad del residuo, y que habrá que tener muy en cuenta en un futuro proyecto de inyección, que están relacionados con la

perforación del sondeo y el desarrollo de la operación, de manera que se prevean todas las posibles causas de mal funcionamiento y puedan ser adoptados métodos de construcción que garanticen que la formación no va a ser dañada.

## 9. MODELIZACION

Objeto de otro proyecto más de detalle, sería la estimación y modelización del movimiento del fluido en la roca almacén, función de las relaciones fisicoquímicas entre residuo inyectado-fluido de la roca almacén, de los parámetros hidráulicos de la formación almacén, y en el caso de formaciones con porosidad secundaria, como es el caso que nos ocupa, la microtectónica asociada al macizo, que condiciona las direcciones preferenciales de drenaje, y por tanto, de movimiento de fluidos en su seno.

Habría que pensar en un conocimiento de los parámetros hidráulicos de la formación almacén, lo cual sería factible a partir de ensayos tipo DST, ya existentes en los sondeos de petróleo utilizados en este estudio, o realizables en los sondeos de inyección; en un estudio de microtectónica, que se realizaría en superficie, extrapolando datos, función del grado de homotecia del macizo; en una estimación de que posiciones relativas que ocuparían fluido intersticial y residuo inyectado, así como las posibles reacciones que se pudieran desarrollar entre ambos y que condicionaran el movimiento de los fluidos (colmatación, solubilización, oclusiones, etc.); y unas condiciones determinadas de perforación y acabado del sondeo de inyección y ciertas condiciones de operatividad (presión de inyección). Todos estos ensayos, estudios y valoraciones permitirían modelizar y evaluar el movimiento del fluido en la roca almacén.

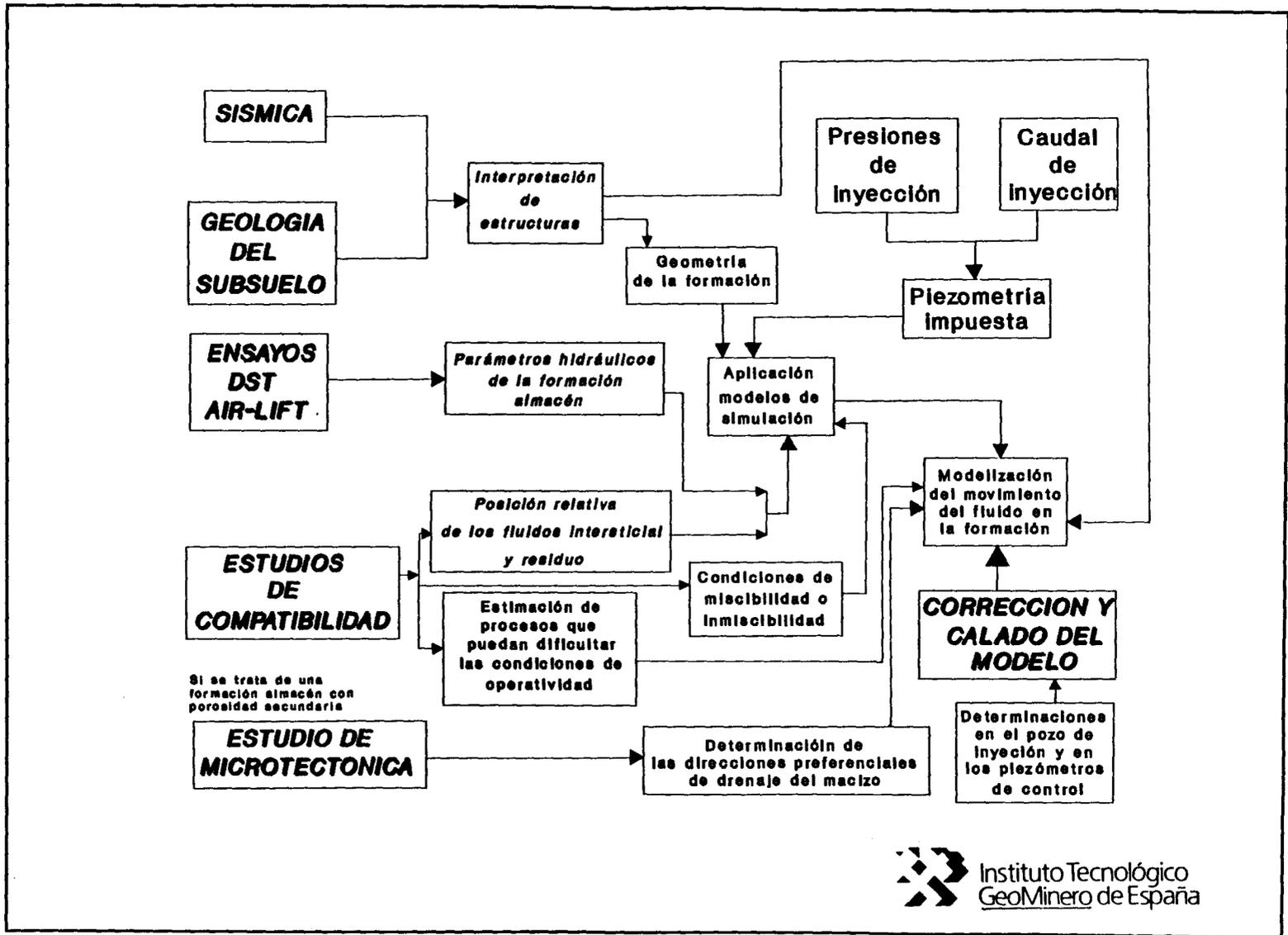
A modo de resumen se ha querido plasmar en la figura 62, a modo de organigrama de trabajo, todos los condicionantes y etapas que habría que tener en cuenta para modelizar el movimiento del residuo en la formación almacén.

Esta modelización, cuya realización previa a las operaciones de inyección resulta económica, ya que permitiría simular ciertos comportamientos relacionados con la distribución espacial del residuo una vez inyectado, se estructuraría en cuatro o cinco apartados, según las características de la formación receptora. Estos apartados serían:

**\* Conocimiento de la geometría de la formación almacén.**

El conocimiento detallado de la geometría del soporte físico no estaría económicamente explicado. No es factible conocer y modelizar la geometría del almacén como ocurre con los acuíferos, donde la existencia de gran cantidad de captaciones proporcionan una información suficiente. En el

Figura 62, Esquema de trabajo en la modelización del movimiento de un fluido inyectado en una formación geológica profunda.



caso de la inyección no estaría justificada la realización de sondeos para conocer con detalle la geometría. Será en base a la información que se obtenga de la estratigrafía asociada a los sondeos de petróleo existentes en el área y al sondeo de inyección, así como a la interpretación de los perfiles sísmicos existentes o que se realicen durante las operaciones previas a la inyección, como se intentará interpretar la estructura geológica soporte de la inyección.

**\* Parámetros hidráulicos de la formación almacén.**

En base a la información aportada por ensayos tipo DST o AIR-LIFT existentes en sondeos de petróleo o realizados sobre el sondeo de inyección, se podrá estimar el valor de permeabilidad asociado a la formación almacén. Este dato es vital en cualquier intento de modelizar el movimiento del fluido en la formación almacén.

**\* Resultados de los estudios de compatibilidad.**

Estos resultados tienen una importancia triple:

- conocimiento de las posiciones relativas que ocuparían el residuo y el fluido natural en la formación,
- estimación sobre la existencia o no de procesos que puedan dificultar las condiciones de operatividad (precipitaciones, colmataciones,...), y
- estimación de condiciones de miscibilidad o inmiscibilidad de los fluidos.

**\* Estudios de piezometría.**

La presión de inyección y el caudal inyectado someten a la formación a unas condiciones que modifican la "piezometría" asociada a la formación almacén.

No podemos hablar de piezometría asociada a una formación permeable profunda de igual manera de como se hace para una formación más somera, si bien el concepto general es el mismo, el movimiento del fluido en esta formación se va a realizar en base a un gradiente hidráulico creado como consecuencia de una presión y un caudal de inyección.

Estos datos permitirían evaluar esta "piezometría" impuesta a la formación almacén, básica en los modelos de simulación de movimiento de fluidos.

**\* Estudios de microtectónica**

En el caso de que el almacén presente porosidad secundaria sería interesante realizar un estudio sobre la microtectónica del macizo, al objeto de conocer las direcciones

preferenciales de drenaje que han quedado impresas como consecuencia de la tectonización a que se ha visto sometido.

La conjunción de todos los datos sobre parámetros hidráulicos, datos de los estudios de compatibilidad, de la "piezometría" impuesta por la operación de inyección y de la geometría de la formación, permitirían aplicar un modelo de simulación. Estos modelos podrían ser similares a los utilizados en el estudio de los fenómenos de intrusión marina, puesto que implican la existencia de dos fluidos de diferentes características puestos en contacto en un mismo medio. En este caso y dada la parquedad de información de que se dispondrá, sería razonable la aplicación de un modelo simple, no sin ciertas modificaciones impuestas por la condiciones especiales que impone unas condiciones de gran profundidad.

Por otra parte, las determinaciones periódicas que se realicen tanto en el pozo de inyección como en los piezómetros de control permitirán corregir y calar el modelo.

### MOVIMIENTO DE FLUIDOS INYECTADOS EN FORMACIONES PROFUNDAS

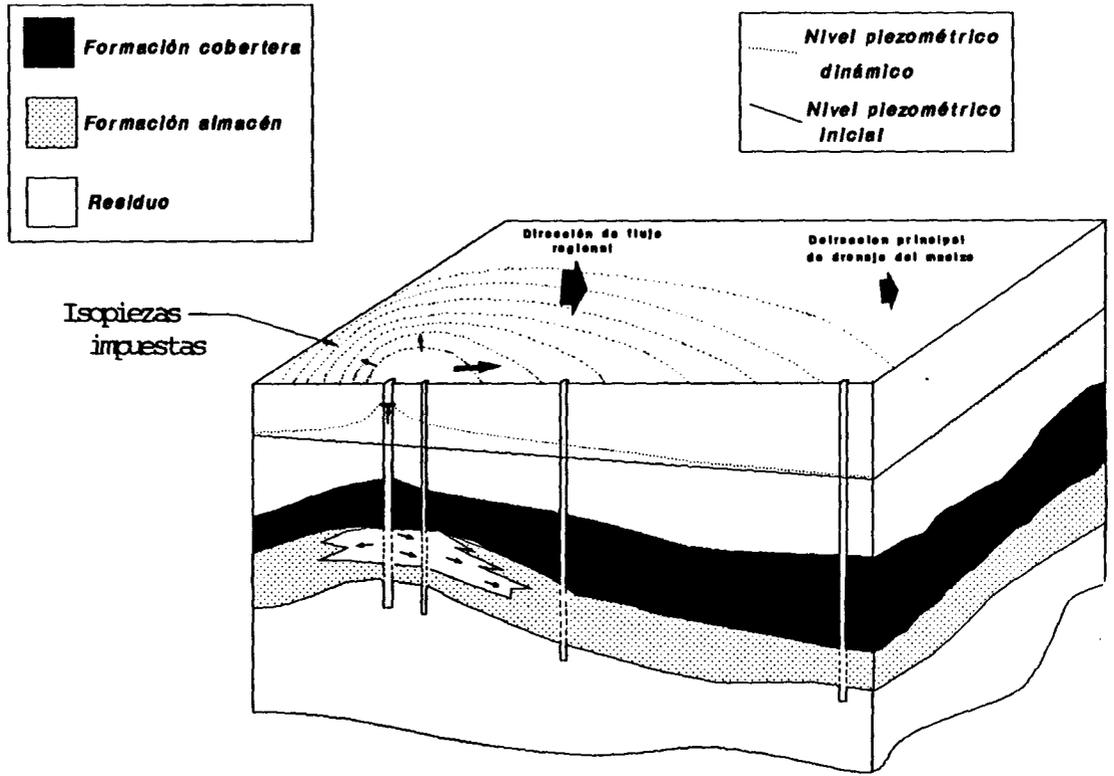


Figura 63, Movimiento de fluidos inyectados en formaciones permeables por fisuración profundas.

## 10. CONCLUSIONES

Se van a repetir resumidas, ciertas conclusiones que ya han sido expuestas a lo largo de todo el estudio.

### 10.1 Sumario de datos obtenidos de la geología del subsuelo

El análisis detallado de la información y documentación geológica existente, especialmente de investigación de hidrocarburos, ha permitido seleccionar para su estudio dos áreas relativamente extensas de la provincia de Castellón. Estas dos áreas han sido denominadas en el presente informe área de Vinarós y área de la Plana de Castellón.

La primera ocupa la mitad norte de la provincia, aunque las posibilidades de utilización de almacenes profundos se concretan al área costera, ya que es ahí donde convergen condiciones geológicas y necesidades de eliminación de residuos.

La segunda área seleccionada se concreta en la unidad morfológica conocida como la Plana de Castellón, siendo también desde el punto de vista geológico y de generación de residuos la zona costera la más interesante.

Por otra parte, hay que señalar que estas áreas interiores son las que menos concentración urbana e industrial presentan actualmente, por lo que su interés es menor.

En base a la información aportada por este estudio, y concretando sobre las formaciones con posibilidades reales de constituir almacenes para eliminar residuos, podemos concluir:

- 1) Sólo parece viable llevar a cabo operaciones de inyección de residuos en almacenes geológicos profundos asociados a áreas costeras de la provincia de Castellón.
- 2) En la mitad Sur de la provincia -Plana de Castellón-, sólo se podría pensar en inyectar residuos en las formaciones dolomíticas de los tramos inferior y superior del Muschelkalk (M1 y M3). Dentro de estas formaciones habría que seleccionar las áreas en que contengan agua salada, que serán las muy próximas a la costa, ya que a 10-15 kms. de la costa, en la zona de Betxi, existen sondeos de agua que explotan este acuífero a profundidades de 200-400 metros.

En la línea de costa se puede prever que la formación almacén se encuentre entre 650-850 metros. Se disponen de muy pocos datos sobre este almacén en profundidad. En el sondeo marino Golfo de Valencia B-1, se estimaron pérdidas de  $36 \text{ m}^3/\text{h}$  a nivel del Muschelkalk, que se cortó a 1200-1250 metros. La salinidad del fluido de formación se estima en 35.000 ppm, según el estudio de

las diagrafías.

- 3) En la mitad Norte de la provincia se encuentran las Planas costeras de Vinarós-Peñíscola y Oropesa-Torreblanca.

Las formaciones almacén seleccionadas se reducen a los diferentes tramos carbonatados del Jurásico, que deben encontrarse, los niveles más permeables, según los estudios y extrapolaciones realizados durante el presente estudio, a profundidades superiores a los 1700 metros:

Malm.....	1750-1920 metros
Dogger.....	2150-2200 metros
Lias.....	2600-2650 metros
Rhetiense.....	2700-2725 metros

Estas profundidades están deducidas a partir de los datos del sondeo Maestrazgo-1, así como de los perfiles sísmicos de la concesión marina Vinarós y el sondeo marino Vinaroz-1 (ver figura 49). Los tramos seleccionados presentan una elevada permeabilidad, con desarrollos cavernosos, donde se detectaron importantes pérdidas de circulación durante la perforación. La salinidad del agua contenida en todos ellos debe ser alta (superior a 20.000 ppm).

Todos los tramos están confinados por la presencia de formaciones margosas tanto en el mismo Jurásico como en el Cretácico.

Considerando todos los datos expuestos en capítulos anteriores de este informe, y las conclusiones presentadas en los párrafos anteriores, se describen a continuación las soluciones que se proponen caso que se estime viable la posibilidad de eliminar residuos líquidos mediante la inyección en formaciones profundas de la provincia de Castellón.

En dichas soluciones se describirán someramente las investigaciones preliminares que se recomienda realizar, así como la previsión de un posible sondeo de inyección con presupuesto estimado.

Las diferentes características que presentan las zonas norte y sur de la provincia de Castellón, según se ha puesto de manifiesto en todo el proyecto, permiten que estas reciban un tratamiento diferente.

## Propuesta de soluciones ZONA SUR

Dentro de las áreas más costeras de la Plana de Castellón, hasta Chilches, las zonas, en principio, más favorables serían las septentrionales, entre Burriana y Castellón de la Plana, donde el almacén se encontraría más profundo (unos 650 metros).

Para un caso concreto habrá que llevar a cabo una prospección sísmica preliminar que permitiera fijar con más precisión la profundidad de las diferentes capas en las proximidades del punto o área deseada.

Una vez propuesto un modelo de inyección, con datos más precisos de profundidades que los descritos anteriormente, y antes de acometer la construcción de un sondeo de dimensiones adecuadas, se debería realizar un sondeo de reconocimiento que alcanzará el almacén en diámetros de 100-150 mm., que permita recoger testigos, así como la ejecución de pruebas de producción (test de formación -DST-), que ofreciese datos de permeabilidades.

Confirmada, pues, la profundidad del almacén (650-850 metros) se propone el siguiente programa de sondeo:

<b>PERFORACION:</b>		
Profundidad (m.)	Diámetros (mm.)	
0 - 300	650	
300 - 650	450	
650 - 850	225	

<b>ENTUBACION:</b>		
Profundidad (metros)	Diámetro exterior (mm.)	Espesor (mm.)
0 - 300	500	12
0 - 650	240	10-11

Ambas tuberías cementadas hasta superficie.

El almacén se podría dejar en open-hole (ver figura 50).

Habría que tomar testigos del almacén para los ensayos de compatibilidad con los residuos a inyectar.

Una vez finalizado el sondeo y siguiendo las normas habituales en este tipo de perforación se llevarían a cabo

operaciones de desarrollo (air-lift, acidificación, etc.) si los datos obtenidos en el primer ensayo así lo indicaran.

Por último se realizaría un ensayo de producción-inyección para estimar la capacidad del sondeo.

El sondeo propuesto supondría un coste aproximado de 105 Millones de pesetas.

Este presupuesto podría verse incrementado sustancialmente si la profundidad del almacén supera los 1000 metros.

#### Propuesta de soluciones ZONA NORTE

Comprende las concentraciones urbanas próximas a la costa. Los datos disponibles (sísmica, sondeos profundos) se refieren a la zona más septentrional (Vinarós-Benicarló).

El estudio geológico efectuado permite situar los niveles almacén por debajo de los 100 metros.

Dadas las profundidades a las que se encuentran los almacenes, se recomienda, siguiendo las normas establecidas, llevar a cabo un estudio preliminar de prospección sísmica, no siendo recomendable la ejecución de un sondeo de reconocimiento previo, pues este comportaría un presupuesto muy elevado.

A la vista de los datos disponibles de los sondeos Maestrazgo-1 y Vinaroz-1, se seleccionaría como zona de inyección los paquetes cavernosos y fracturados del Malm, que de confirmarse las profundidades previstas estarían a 1700-1950 metros. Esta sería la zona más transmisiva, y por tanto, de mejores condiciones para la inyección. No obstante no habría que despreciar otra zona más alta -1480-1510 metros-de elevada permeabilidad (la perforación del propio sondeo de inyección lo indicaría).

Se propone, en principio, el siguiente programa para la ejecución del sondeo de inyección:

<b>PERFORACION:</b>		
Profundidad (m.)	Diámetros (mm.)	
0 - 400	500	
400 - 1400	325	
1400 - 1950	225	

<b>ENTUBACION:</b>		
Profundidad (metros)	Diámetro exterior (mm.)	Espesor (mm.)
0 - 400	350	12
0 - 1400	240	10

Ambas tuberías cementadas hasta la superficie. El almacén se podría dejar en open-hole.

Habría que tomar testigos del almacén para posteriores ensayos de compatibilidad con el residuo a inyectar.

A la finalización del sondeo se realizarán los mismos ensayos que en el sondeo propuesto para la zona Sur.

El presupuesto estimativo del sondeo de inyección sería de 268 Millones de pesetas.

## 10.2 Conclusiones de los estudios de compatibilidad

Las dos formaciones seleccionadas como posible almacén para el residuo inyectado son calizas y dolomías (Zona Norte) o dolomías (Zona Sur), con importantes fracturación y contenidos en arcillas menores del 10%. Estas características imponen una serie de condicionantes a los procesos de interacción con el residuo:

- \* El pH de la mezcla debe oscilar entre 6 y 8 unidades de pH, como consecuencia del efecto tampón ejercido por el equilibrio carbonato-hidrogenocarbonato-CO<sub>2</sub>.
- \* Los mecanismos de adsorción sobre arcillas no se desarrollarán excesivamente elevadas, ya que su proporción es baja y, sobre todo, debido al hecho de que la permeabilidad sea preferentemente por fracturación y no por porosidad.

\* La fracturación de la roca almacén permite suponer que los problemas de colmatación no van a ser graves, al menos para los niveles de inyección esperados.

Por otra parte dicha fracturación conlleva bajos tiempos de retención de los contaminantes solubles, que podrán desplazarse con facilidad a partir del punto de introducción, acompañando al flujo de agua.

\* Las temperaturas reinantes en las formaciones (49°C y 52°C, respectivamente) permiten, en principio, el desarrollo de la actividad microbiológica.