

PROYECTO

REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA EXISTENTE EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS (DOÑANA)



INFORME FINAL TOMO 2 NUEVOS ENSAYOS GEOFÍSICOS

Juan Luís Plata
Felix Manuel Rubio
Julián Coronel
Carmen Rey
Mónica Arias

Área de Geofísica del IGME

Tres Cantos
2007



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



Instituto Geológico
y Minero de España



PROYECTO

**REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA
EXISTENTE EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS
(DOÑANA)**

**INFORME FINAL
TOMO 2**

NUEVOS ENSAYOS GEOFÍSICOS

Autores informes IGME:

Juan L. Plata, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.

jl.plata@igme.es

Felix M. Rubio, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.

Julián Coronel, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.

Carmen Rey, Área de Geofísica del IGME. La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.

Mónica Arias, Becaria Formación del IGME (periodo 2001-2002)

Pedro Sánchez, Realización de Prácticas Profesionales de la UPM en el IGME (2004)

Marcos Maneiro, Realización de Prácticas Profesionales de la UCM en el IGME (2005)

Carlos Mediavilla, Oficina del IGME en Sevilla

Asistencias Técnicas y Convenios:

International Geophysical Technology (IGT): **Angel Granda**

Análisis y Gestión del Subsuelo (AGS): **Enrique Aracil**

Universidad Politécnica de Cartagena: **Marisol Manzano**

**Área de Geofísica del IGME
Tres Cantos
2007**

Relación de participantes en cada actividad

0. Introducción y antecedentes (J. Plata)

I Recopilación de la información (J. Plata, F. Rubio, C. Mediavilla, M. Manzano)

II Preparación de datos en forma digital (J. Coronel, F. Rubio, J. Plata, M. Arias)

III Análisis de la información

III.1 Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules (**J. Plata**)

III.2 Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sísmica de reflexión (**J. Plata, P. Sánchez, M. Maneiro**)

III.3 Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970 (**F. Rubio, C. Rey, M. Arias, J. Plata**)

III.4 Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce- agua salada (**J. Plata**)

IV Realización de nuevos ensayos de metodología geofísica

IV.1 Introducción (**J. Plata, M. Manzano, C. Mediavilla, F. Rubio**)

IV.2 Testificación geofísica de sondeos mecánicos

IV.2.2 Nueva campaña de testificación realizada en 2002 (**IGT, J. Plata, C. Mediavilla**)

IV.2.3 Campaña de testificación de 2005 (**AGS, J. Plata, C. Mediavilla**)

IV.3 Ensayos previos por métodos eléctricos (**IGT, F. Rubio, J. Plata**)

IV.4 Perfiles de sísmica de reflexión (**IGT, J. Plata**)

IV.5 Trabajos complementarios realizados por el IGME en las diferentes zonas (**F. Rubio**).

Integración de resultados (**J. Plata**)

V Resumen y Conclusiones (J. Plata)

Redacción final del Informe y diseño de material gráfico: J. Plata

INDICE REDUCIDO

TOMO 1

0. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

I RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA

I.1 Introducción histórica de la documentación analizada

I.2 Descripción del contenido de los informes parciales del periodo 1967-1976

I.3 Descripción del contenido de los informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982

I.4 Descripción del contenido de los informes recopilados posteriores al Proyecto Guadalquivir

I.5 Datos de campañas de sismica de reflexión

I.6 Sondeos de prospección de hidrocarburos

II PREPARACIÓN DE DATOS EN FORMA DIGITAL

II.1 Tipos de documentos digitales generados

II.2 Información procedente de informes parciales hasta 1976

II.3 Procedente de informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982

II.5 Datos de campañas de sismica de reflexión. "Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España", 1990, Ref. 29036.

II.6 Base de datos de SEV

II.7 Adaptación de la base de sondeos mecánicos

II.8 Cuadro general de ficheros generados

Anexo Digital II-a (DocuEscanDigita)

Anexo Digital II-b (BaseDatosSEV)

Anexo Digital II-c (BaseDatosSondeos)

III ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

III.1 Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules

III.2 Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sismica de reflexión

III.3 Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970

III.4 Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce- agua salada

Anexo III-2.8

Anexo Digital III-1 (Margas azules)

Anexo Digital III-2 (Margas azules Sísmica)

Anexo Digital III-3 (Revisión de SEV)

Anexo Digital III-4 (Interfase)

TOMO 2

IV REALIZACIÓN DE NUEVOS ENSAYOS DE METODOLOGÍA GEOFÍSICA

IV.1 Introducción

IV.2 Testificación geofísica de sondeos mecánicos

IV.3 Ensayos previos por métodos eléctricos

IV.4 Perfiles de sísmica de reflexión

IV.5 Trabajos complementarios realizados por el IGME en las diferentes zonas. Integración de resultados.

Anexo Digital IV-2 (Testificación)

Anexo IV-2- a: Informe de testificación realizada por IGT

Anexo IV-2- b: Informe de testificación realizada por AGS

Anexo Digital IV-3 (Eléctricos)

Anexo IV-3 Informe de trabajos presentado por IGT

Anexo Digital IV-4 (Sísmica)

Anexo IV-4 Informe de la campaña sísmica realizada por IGT

Anexo Digital IV-5 (Datos de campo IGME)

V RESUMEN Y CONCLUSIONES

Al final del tomo:

- **Índice general extendido, con indicación de nº de página**
- **Referencia de los Anexos en soporte papel**
- **Referencia de Publicaciones efectuadas**
- **DVD con Anexos Digitales (contraportada trasera del tomo 2)**

Abstract

Trabajo realizado para revisar la información geofísica existente, con el objetivo de verificar la cartografía de 1982 de cotas del techo de las margas azules del Mioceno. Se pretende además establecer una metodología geofísica para resolver problemas estratigráficos de definición del tránsito Mioceno - Pleistoceno – Holoceno y determinación de la posición de la interfase agua dulce - agua salada.

Se han recopilado 18 trabajos de índole geofísica efectuados en el acuífero desde 1967 a 1995, con más de 895 SEV y 460 sondeos mecánicos. La digitalización de la información ha dado lugar a la creación de más de 749 nuevos ficheros digitales. Tras su análisis, se demuestra que el mapa de 1982 ni ha sido obtenido a través de mediciones geofísicas, ni intenta reproducir la cota de las margas azules, habiéndose obtenido un nuevo mapa con la información sísmica disponible. Se valida la interpretación de los SEV de 1968-1970, verificando que no hay relación entre fácies geoelectricas y unidades estratigráficas. Se consideran útiles los diversos trazados existentes de la interfase agua dulce- agua salada, aunque se advierte que es posible que en la zona de Marismas exista más de una superficie de interfase.

En 7 zonas seleccionadas se han medido 4 perfiles de sísmica de reflexión (7.8 km), 25 SEDT, 17 SEV y 9 Perfiles Eléctricos (33 km). Además se han testificado 44 sondeos (4315 m) con Gamma Natural, temperatura y conductividad del agua, resistividad de la formación por inducción, radiación gamma espectral, y velocidad de ondas sísmicas (por down hole). Los resultados son analizados de forma integrada para cada zona, presentando esquemas geológicos interpretativos para la resolución de los problemas planteados. El método de Perfiles Eléctricos se manifiesta como el más adecuado, dada su mejor resolución, aunque puede verse limitado en la profundidad de investigación y ser no resolutivo cuando la salinidad del agua distorsiona fuertemente la resistividad de las rocas; el empleo conjunto con la sísmica de alta resolución palia ambas limitaciones: profundidad y geometría. Las testificaciones son imprescindibles para apoya a la interpretación de los datos de superficie.

MEMORIA TOMO 2

IV REALIZACIÓN DE NUEVOS ENSAYOS DE METODOLOGÍA GEOFÍSICA

IV.1 Introducción

IV.1.1 Objetivos y alcance de los ensayos

Los trabajos del presente Proyecto están encaminados a la consecución del objetivo último de las actuales investigaciones en la zona del acuífero Almonte-Marismas, que pretenden mejorar los modelos conceptual y numérico del acuífero, y aumentar así la fiabilidad de las simulaciones y predicciones de este último. Como ya se expuso en el capítulo 0 “Introducción y antecedentes”, los objetivos concretos son:

- 1- Revisar la información geofísica existente, obtenida en el marco de estudios geológicos, hidrogeológicos y de prospección de hidrocarburos, que permita mejorar el conocimiento de la profundidad del techo del Mioceno en toda el área cubierta por el acuífero Almonte-Marismas, y localizar las principales estructuras que puedan existir a escala 1/100.000.
- 2- Mediante la anterior revisión de la información geofísica previa, así como mediante la toma de nuevos datos si fuera necesario, definir la posición de la interfase agua dulce - agua salada en la zona suroriental de la barra litoral, a escala 1/50.000.
- 3- En áreas restringidas, y en particular en la zona sur de la barra litoral, establecer una metodología geofísica que permita ayudar a resolver problemas estratigráficos de definición del tránsito Mioceno - Pleistoceno – Holoceno, es decir: determinar la distribución espacial de la cota del tránsito entre el relleno pleistoceno-holoceno de la marisma (gravas, arenas, limos y arcillas), los limos margosos del techo del Mioceno y las arenas de la barra de costa. Es por tanto necesario abordar el problema de diferenciar, tanto estratigráfica como geofísicamente, las margas grises y arcillas de la marisma de las margas miocenas, y aunque los objetivos de este Proyecto se limitan a la diferenciación geofísica, es evidente que previamente tiene que establecerse la estratigráfica.

Los dos primeros puntos han sido tratados en los precedentes capítulos del presente Informe, estando dedicado el capítulo IV a las nuevas campañas geofísicas efectuadas fundamentalmente para el tercer objetivo.

El problema planteado tiene por lo tanto dos vertientes técnico-científicas confluentes: existe por una parte un problema de índole estratigráfica, de tal forma que los límites entre los materiales del acuífero y sus unidades limítrofes puedan ser claramente establecidos, en especial, la diferenciación entre las margas limosas del techo del Mioceno y los limos margosos de los pisos superiores (Pleistoceno-Holoceno); por otra parte, para poder abordar este problema con técnicas geofísicas es necesario

disponer de un criterio de diferenciación a nivel petrofísico, siendo preciso determinar la diferencia no sólo ya entre los aludidos niveles litológicos, sino además las debidas a la presencia y distribución de agua salada. Con el estado de conocimientos actuales, los temas propuestos no parecen tener fácil solución estratigráfica ni geofísica, por lo que las acciones emprendidas deben entenderse como ensayos de desarrollo metodológico. Los materiales involucrados en el acuífero Almonte-Marismas adolecen, en principio, de grandes contrastes de sus propiedades petrofísicas. Tanto las situaciones geométricas planteadas, como la pobre diferenciación petrofísica y estratigráfica existente, hacen necesario efectuar una serie de pruebas de diversos métodos geofísicos en áreas donde las diferentes temáticas propuestas se encuentren bien conocidas y controladas, a fin de poder definir la mejor, si es que existe, metodología para su resolución. Es necesario además tener en cuenta la disponibilidad de sondeos mecánicos con las necesarias testificaciones geofísicas y con una descripción geológica y estratigráfica detallada, a fin de efectuar una correcta parametrización de las medidas tomadas sobre la superficie. Para ello, se han seleccionado unas áreas con suficiente control geológico para detectar la frontera entre arenas de la barra costera y las formaciones de marisma, donde se han llevado a cabo varios experimentos de campo. Una vez interpretados los resultados de estas campañas, podrá procederse a elaborar una propuesta de la metodología geofísica a utilizar en cada caso.

IV.1.2 Planificación de los ensayos

Para la selección de las zonas de ensayo se realizó en el mes de julio 2001 una visita previa para reconocimiento sobre el terreno de las áreas donde podrían llevarse a cabo trabajos geofísicos en el interior del Parque y áreas limítrofes. El grupo participante en el reconocimiento fue:

Marisol Manzano (UP de Cartagena), hidrogeóloga del proyecto
Carlos Mediavilla (IGME, Oficina de Sevilla), hidrogeólogo del proyecto
Miguel Ángel Bravo (Estación Biológica de Doñana), biólogo del Parque
Juan Luis Plata y Félix Rubio (IGME Área de Geofísica), geofísicos del proyecto

Las zonas visitadas fueron (Figura 163):

Zona 1 Zona de Vetalegua

En esta zona, de contacto entre marisma y las dunas de arena, se encuentra el sondeo mecánico S-57 (Nº Inventario 114360018, coordenadas X=198416 Y=4089658 y 196 m de profundidad). El objetivo propuesto sería delimitar mediante geofísica de superficie la extensión de las aguas salobres bajo la marisma y el manto eólico, definiendo la profundidad y forma de la interfaz.

Zona 2 Zona Corral de la Mata

En ella se encuentra el sondeo mecánico del mismo nombre, de 290 m de profundidad, realizado recientemente por el IGME y entubado en PVC. Se trataría de realizar una testificación de dicho sondeo para ver la posibilidad de la determinación de niveles de arcillas entre arenas. La zona es de

muy mal acceso, vegetación muy densa y próxima a dunas de fuertes desniveles, por lo que no será posible efectuar trabajos de superficie.

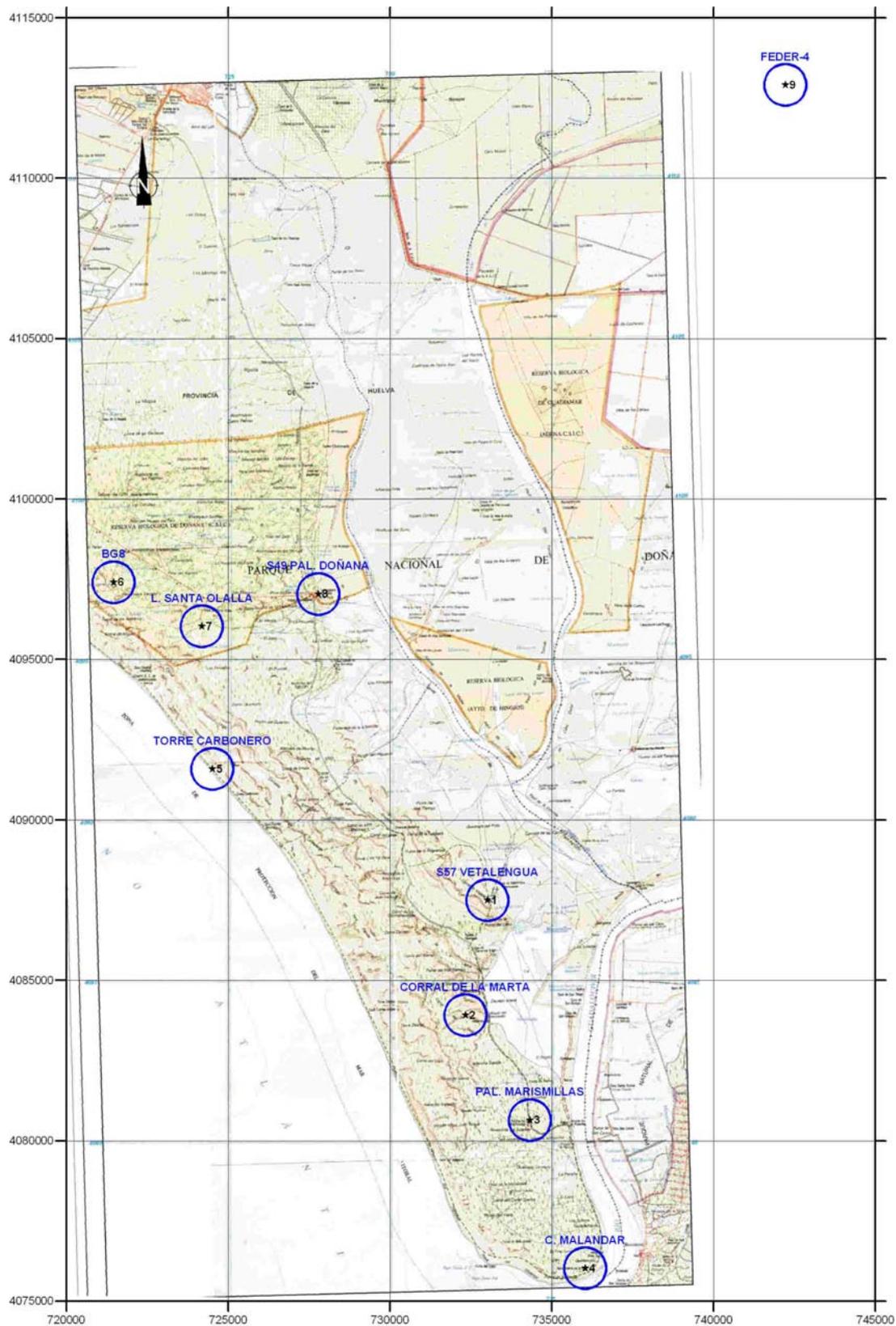


Fig. 163. Selección de zonas para realización de ensayos metodológicos de geofísica. Coordenadas UTM29

Zona 3 Palacio de Las Marismillas

En esta zona se encuentra el sondeo mecánico S-59 y S-60 (Nº Inventario 114360020, coordenadas X=199293 Y=4082736 y 298 m de profundidad). Se pretende delimitar por geofísica de superficie el contacto de las aguas salobres entre la posición del sondeo y las dunas de arena situadas al suroeste, que contienen con agua dulce procedente de la recarga local de lluvia.

Zona 4 Sondeo del Malandar

Se encuentra junto a un sondeo perforado por el IGME en 2001, próximo al antiguo cuartel de la Guardia Civil. Sondeo entubado con PVC y con salinidad en profundidad, aunque en estos momentos (2001) pueda estar colmatado de agua dulce. Se trataría igualmente de ensayar la identificación de la interfaz, aunque la zona presenta grandes dificultades logísticas para realizar geofísica de superficie.

Zona 5 Sondeo de Torrecarbonero

Sondeo mecánico realizado por el IGME en 2001, junto a la playa. Se plantea como posible realización de su testificación.

Zona 6 BG 8

Junto al sondeo mecánico BG8, de 70 m de profundidad. Está situado en plena zona de dunas, pudiendo utilizarse solamente el camino de acceso para la realización de trabajos de superficie, con la intención de verificar la presencia de las margas azules reflejadas en la columna del sondeo. Posible testificación.

Zona 7 Sondeo Santa Olalla

Junto al sondeo mecánico realizado por el IGME en 2001, de 319 m de profundidad y con entubación de PVC. Posibles ensayos de superficie además de la testificación, aunque se trata de un área de muy densa vegetación.

Zona 8 Palacio de Doñana

En ella se encuentra el sondeo mecánico S-49 (Nº Inventario 114310016, de coordenadas X=187504 Y=4100276 y 191 m de profundidad), entubado en PVC con 90 mm, por lo que podrían hacerse testificaciones especiales. Zona de contacto entre las dunas y la marisma, con facilidad de trabajos de superficie a lo largo del camino de acceso.

Zona 9 Feder 4

Sondeo de reciente realización de unos 200 m de profundidad y entubado en PVC. Se encuentra situado en la zona regable, donde la sobreexplotación puede hacer avanzar la salinidad.

De todas las zonas visitadas se realizaron campañas de campo de geofísica de superficie solamente en algunas de ellas, indicadas mas adelante en el presente informe. La campaña de testificación de

sondeos se efectuó en algunos de los sondeos visitados en estas zonas y en otros sondeos que por su situación, características y accesibilidad se consideraron de interés.

IV.1.3 Trabajos realizados

Los trabajos efectuados han sido los siguientes:

1- Testificación geofísica de sondeos

Se ha llevado a cabo una primera campaña en septiembre de 2002, de 13 sondeos. Para todos ellos (1700 m de testificación) se ha registrado la radiación gamma natural (GN), conductividad y temperatura del fluido (C,T); en 6 sondeos se midieron además la resistividad de la formación por inducción (RI) y en otros cinco la radiación gamma espectral (GE). Mediciones Down-Hole (DH) para determinación de la velocidad de las formaciones se hicieron en tres sondeos. Estos trabajos fueron llevados a cabo mediante contratación de asistencia técnica con la compañía IGT, y se sintetizan en la siguiente tabla:

| Nombre del sondeo | profundidad | Parámetros |
|------------------------|-------------|-----------------|
| Vetaluenga S-57 | 190 | GE,GN,RI,C,T |
| Pal.Marismillas S-59 | 289 | GE,GN,RI,C,T,DH |
| Palacio de Doñana S-49 | 191 | GE,GN,RI,C,T,DH |
| Feder 4 | 200 | GN,RI,C,T,DH |
| Los Caracoles S-15 | 165 | GE,GN,RI,C,T |
| Casa Bombas S2 | 185 | GE,GN,RI,C,T |
| AM-12 | 152 | GN,C;T |
| M-6-6 | 196,5 | GN,C;T |
| M-1-1(Parque Nacional) | 148,9 | GN,C;T |
| Lucio Mari Lopez | 155 | GN,C;T |
| AM-3 | 108 | GN,C;T |
| AM-4 | 122 | GN,C;T |
| BG-8 BG- 8Sur | 300 | GN,C;T |

Testificaciones de la campaña de 2002

Una segunda campaña tuvo lugar abril-mayo y diciembre de 2005, donde se registraron unos 2600 m en 29 sondeos, midiéndose la radiación gamma natural (GN) y la resistividad de la formación por inducción (RI) en todos ellos; también se midieron la conductividad y temperatura del fluido (C,T), aunque sólo con valor relativo (en general para la campaña). Estos trabajos se llevaron a cabo mediante asistencia técnica con la compañía AGS, y se resumen en la siguiente tabla:

| Nombre del sondeo | Prof. Testif | Nombre del sondeo | Prof. Testif |
|---------------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| Ctra. Mazagón km 38 (Asperillo) | 111,25 | Vetalengua | 180,62 |
| Guardia Civil Matalascañas | 133,75 | El Pescante | 141,8 |
| Laguna de Sta. Olalla | 96,35 | Matalascañas Sulfasaurus | 137,8 |
| Torre Carbonero | 165,7 | La Mogeja | 78,4 |
| Corral de la Marta | 156,4 | La Marmoleja 2 | 87,5 |
| Cuartel Malandar | 50,6 | Feder 1 Bis | 68 |
| El Abalarío | 92 | Rocina Nº 4 | 87,5 |
| El Alamillo | 117,4 | Rocina Nº 3 | 88 |
| Los Mimbrales | 88,5 | Laguna de la Anguila 1 | 63,5 |
| Depuradora El Rocio | 96,6 | Sector III-1 | 41 |
| Pichiricha o Matasgordas | 111,51 | Cabezudos 1 | 58 |
| El Raposo | 91,3 | Arroyo Cañada 1 | 45 |
| La Juncosilla o Portachuelo | 64,2 | Bodegones 1 | 38 |
| Partido Resina | 74,8 | Hatovilla (Parcela III) | 33,5 |
| | | El Sequero | 30,5 |

Testificaciones de la campaña de 2005

2- Trabajos de Sísmica de reflexión.

Campaña realizada en octubre de 2002, por asistencia técnica con la compañía IGT. Tras verificación de la fuente de energía más adecuada, se realizaron unos 7800 m de perfil de sísmica de reflexión en los siguientes lugares:

| Nombre del perfil | Sondeo próximo | Longitud de perfil |
|-------------------|--------------------------|--------------------|
| Doñana-1 | S-2 Casa Bombas y M-6-5 | 2826 |
| Doñana-2 | BG-8 | 1002 |
| Doñana-3 | S-49 Palacio Doñana | 942 |
| Doñana-4 | S-59 Palacio Marismillas | 3054 |

Campaña de sísmica de reflexión de 2002

Algunos de los perfiles de sísmica de reflexión fueron realizados en la misma posición que algunos perfiles eléctricos, con el objetivo de estudiar la posibilidad de definir la geometría de los horizontes petrofísicos por un método no afectado por la conductividad que produce la salinización.

3- Ensayos previos de métodos eléctricos

Se efectuaron en diciembre de 2001, a fin de verificar el alcance de diferentes métodos geoelectrónicos en diversos entornos. Se realizó mediante asistencia técnica con la compañía IGT, midiéndose los siguientes datos:

- zona de Vetalengua, junto a sondeo S-57: se midieron 1300 m de tomografía eléctrica, y 3 Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT)

- *zona de Marismillas*, junto a sondeo S-59: se efectuó un perfil de 1700 m formado por 18 SEDT
- *zona de Santa Olalla*, junto a sondeo del mismo nombre: se midió un SEDT
- *zona del Palacio de Doñana*, junto a sondeo S-49: se efectuaron 3 SEDT

4- Trabajos complementarios realizados directamente por el IGME

- **Trabajos realizados en la campaña de 2001:**

Zona de Vetalengua (sondeo mecánico S-57):

- 3 SEV (AB de 800, 1000 y 2000 m)
- Perfil eléctrico de 1.5 km, con dispositivo Wenner.

Zona de Palacio de Marismillas (entorno del sondeo mecánico S-59):

- 9 SEV (AB de 200 a 500 m)

Zona de Palacio de Doñana (entorno del sondeo mecánico S-49):

- 3 SEV (AB de 1600 y 2000 m)
- Perfil eléctrico de 1.5 km, con dispositivo Wenner

Zona de Santa Olalla:

- 1 SEV de AB=620 m

- **Trabajos realizados en la campaña de 2002:**

Zona de Vetalengua:

- Repetición y prolongación del perfil eléctrico efectuado por IGT en 2001, buscando explicación a las diferencias encontradas entre los instrumentos Lund e IGT (parámetros de medición). Fue trazado en dirección Este-Oeste, con una longitud de 1 km hacia el Este a partir del S-57 y de 2 km hacia la marisma, con una longitud total de 2700 m con el dispositivo Wenner, 1200 m con el dispositivo Schlumberger y 1200 m con el dispositivo Dipolo-Dipolo

Zona de Palacio de Marismillas:

- Perfil eléctrico de 3 km (1 km hacia el NE a partir del S-59, y de 2 km hacia el SO), con dispositivo Wenner, con el objetivo de confirmar los resultados de los SEV de 2001 y la necesidad de utilizar métodos continuos de prospección.

Zona del Palacio de Doñana:

- Prolongación del perfil eléctrico realizado en 2001, con la misma extensión que el perfil sísmico; en total 5 km de perfil, con dispositivo Wenner.

Zona "Limite Norte Marisma":

- Perfiles eléctricos sobre los perfiles sísmicos, para verificación del comportamiento del método sobre el paso de frentes de interfase agua dulce- salada. En total 3.3 km con dispositivos Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo

Zona del Malandar (entorno del sondeo mecánico Cuartel de Malandar):

- Perfil eléctrico de 1.5 km a partir del sondeo, con dispositivo Wenner

Zona del Sondeo BG-8:

- realización de un SEV de AB=360, centrado en el BG-8, con extensión de alas según la dirección del perfil sísmico
- perfil eléctrico de 1.2 km, con dispositivo Wenner, con la misma dirección y longitud que el perfil sísmico

El siguiente cuadro resume los trabajos de geofísica de superficie efectuados (en amarillo, mediante asistencia técnica):

TRABAJOS DE GEOFISICA DE SUPERFICIE

| | Vetalengua | Marismillas | Malandar | BG8 | Palacio Doñana | Zona Norte(M-6-5) | Santa Olalla |
|--------------|--------------|-------------|----------|--------|----------------|-------------------|--------------|
| sísmica | | 3 km | | 1 km | 0,95 km | 2,8 km | |
| down hole | 190 m | | | | 190 m | 197 m | |
| SEDT | 3 | 18 | | | 3 | | 1 |
| P. eléctrico | 1,3 km | | | | | | |
| SEV | 3 | 9 | | 1 | 3 | | 1 |
| P. eléctrico | 1.5 + 2.7 km | 3 km | 1.5 km | 1.2 km | 1.5 + 5 km | 3.3 km | |

IV.2 Testificación geofísica de sondeos mecánicos

IV.2.1 Antecedentes

En el capítulo II del presente Informe (Preparación de datos en forma digital), apartado 7 “Adaptación de la base de sondeos mecánicos”, se reúne información sobre la existencia de un total de 2428 sondeos mecánicos efectuados en la zona de trabajo de este Proyecto (datos referidos a finales del año 2003). De éstos, sólo se tiene conocimiento de que exista información sobre su columna litológica de 1216 sondeos, reduciéndose a 806 con profundidad superior a los 20 m (Bases de datos **Basefinal.xls**). A través de los diversos participantes en este Proyecto, se ha podido averiguar que se ha efectuado algún tipo de registro de testificación geofísica en unos 145 sondeos (del orden de un 6% de los perforados), estando 64 de ellos testificados varias veces a lo largo de los años 1968-2003. Estas testificaciones fueron realizadas con diversos objetivos dentro de los Proyectos mencionados en el capítulo I (Recopilación de la información Geofísica) y actuaciones posteriores.

IV.2.1.1 Testificaciones con finalidad litológica

En el informe *Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559* se menciona la realización de testificaciones de Potencial Espontáneo, Resistencia Monoeléctrica, resistividad normal corta y larga N16” y N64” en los sondeos mecánicos BG-6 (34-1033) y BG-7 (35-1033). Además ha sido recuperada (Oficina del IGME en Sevilla) la testificación del sondeo BG-8 (37-1033) de esas mismas fechas. La situación de estos sondeos se indica en la Figura 168, y las características de su testificación se resumen en la tabla siguiente:

| Sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof. | FECHA | testificación | procedencia |
|--------|------------|-----------------|-------|-------|---------------|----------------------|
| BG-6 | 114310004 | | 210 | 1968 | PS,R,R16-64” | INFORM. PRAKLA 35559 |
| BG-7 | 114360006 | | 218 | 1968 | PS,R,R64-16” | INFORM. PRAKLA 35559 |
| BG-8 | 114310005 | Charco del Toro | 300 | 1968 | PS,R | INFORM. PRAKLA 35559 |

Estas testificaciones estaban orientadas a la obtención de información de resistividad de las formaciones para apoyo a la importante campaña de Sondeos Eléctricos Verticales llevada a cabo, y son casi exclusivamente las únicas que existen realizadas a pozo descubierto.

Se han digitalizado las testificaciones de los sondeos BG6 (PS, R, R16” y R64”Normal) y BG7 (PS, R, R6” lateral, R16” y R64”Normal), disponibles en el fichero **22Anexo70-77-testfBG6yBG7.xls** (Capítulo II, “Preparación de datos en forma digital”). En la Figura 164 se reproducen estos registros, junto a la información litológica. Tanto los registros de Potencial espontáneo como de resistencia matizan la litología: por ejemplo, en el BG6, es evidente que el tramo declarado de arcillas entre los 25 y 50 m tiene importantes intercalaciones de arenas entre los 30 y los 40 m, como indican tanto los

registros de PS como de R; también es dudoso que el tramo declarado de arenas entre los 167-195 m, lo sea en realidad; así mismo, en el sondeo BG7 se aprecia que el tramo de arcillas entre los 94-196 m también debe tener varias intercalaciones de arenas, marcadas en este caso principalmente por el registro de PS, que apenas presenta deriva.

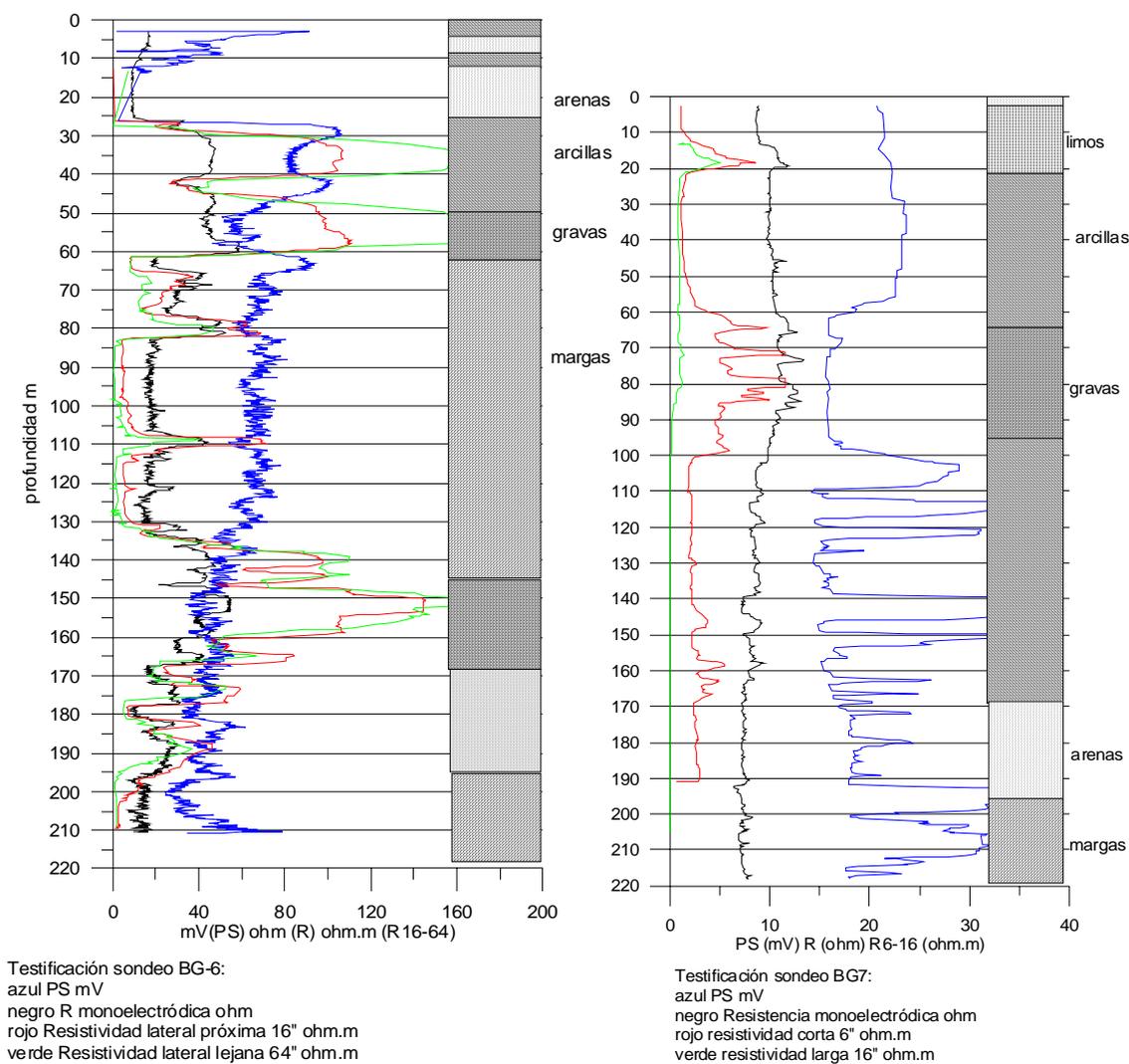


Fig. 164. Testificaciones realizadas en 1968 en los sondeos BG6 y BG7 [fichero 22Anexo70-77-testfBG6yBG7.xls]

Los valores medios de resistencia y de resistividad (referida a las mediciones más penetrativas), está recogida en la siguiente tabla:

| litología | BG-6 | | BG-7 | |
|-----------|-------|--------|--------|-------|
| | Ohm | Ohm.m | Ohm | Ohm.m |
| gravas | 40-45 | 50-160 | 12 | 8 |
| arenas | | | 8 | 3 |
| arcillas | 30 | 30 | 8 a 10 | 2 a 3 |
| margas | 20 | 2 | 8 | 2 |

Los valores en el sondeo BG-7 son muy inferiores a los del sondeo BG-6, y la razón es que el BG-7 está en una zona donde el agua de la formación es salada; esto produce además que apenas exista contraste de resistividad entre las diferentes litologías, y que la resistividad larga (la más penetrante en la formación) presente valores inferiores a 1 ohm.m, como puede apreciarse en las correspondientes curvas de la Figura 164. Cuando el agua es dulce, los valores obtenidos son superiores, permitiendo la resistividad diferenciar entre litologías.

Para el sondeo BG-8 no se ha dispuesto del documento adecuado para su digitalización, por lo que sólo se ha trabajado con una copia reproducida en papel. Se miden valores de resistencia monoelectrónica de 3.6 a 4.3 Ohm en las arenas y de 0.25 a 0.1 Ohm en las arcillas. Si el equipo de testificación y los lodos de perforación fueron los mismos que los utilizados en los sondeos BG-6 y BG-7, estos valores tan bajos serían indicativos de una gran salinidad; sin embargo, se mantiene una buena correlación entre las oscilaciones del registro de PS con el de R, por lo que en principio los valores de resistencia no están afectados, y el agua no debe de ser salada.

En el **Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538**, se efectuaron unas testificaciones con el objetivo de distinguir entre capas permeables e impermeables, y ayudar a la correlación geológica. De todos los sondeos del *Proyecto Guadalquivir* previstos para ser testificados por el equipo del IGME sólo se llegaron a medir cuatro, debido a las dificultades encontradas a causa del gran diámetro y la alta salinidad de los lodos. Estos sondeos son (su situación se indica en la Figura 168):

| sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof | fecha | testificación | procedencia |
|--------|------------|----------------|------|-------|---------------|---------------|
| JR-1 | P102 | Lucio del Lobo | 100 | 1974 | GN | informe 35538 |
| M-6-5 | 114230024 | | 186 | 1974 | GN | informe 35538 |
| M-8-14 | 114230049 | | 138 | 1974 | GN, PS, R | informe 35538 |
| AM-1 | 114220018 | | 130 | 1974 | GN,PS,R | informe 35538 |

Los documentos disponibles son copias en papel de mala calidad, en las que además no consta indicación de valores de la escala, por lo que esta información sólo tiene un valor cualitativo de variaciones relativas, no siendo útil para cuantificación de las resistividades. Se dispone de copias escaneadas en los ficheros:

- . Lucio del Lobo..... **27Lucio.cpt**
- . 114230024 (M-6-5..... **27M-6-5.cpt**
- . 114220018 (AM-1)..... **27AM-1.cpt**, (GN) y **27AM-1RPS.cpt** (PS,R)
- . 114230049 (M-8-14)...**27M-8-14RG.cpt**, (GN) y **27M-8-14.cpt** (PS,R)

que están disponibles en el anexo digital del capítulo II ("Preparación de datos en forma digital") del presente Informe. En la Figura 165 se dan algunos ejemplos de estos registros.

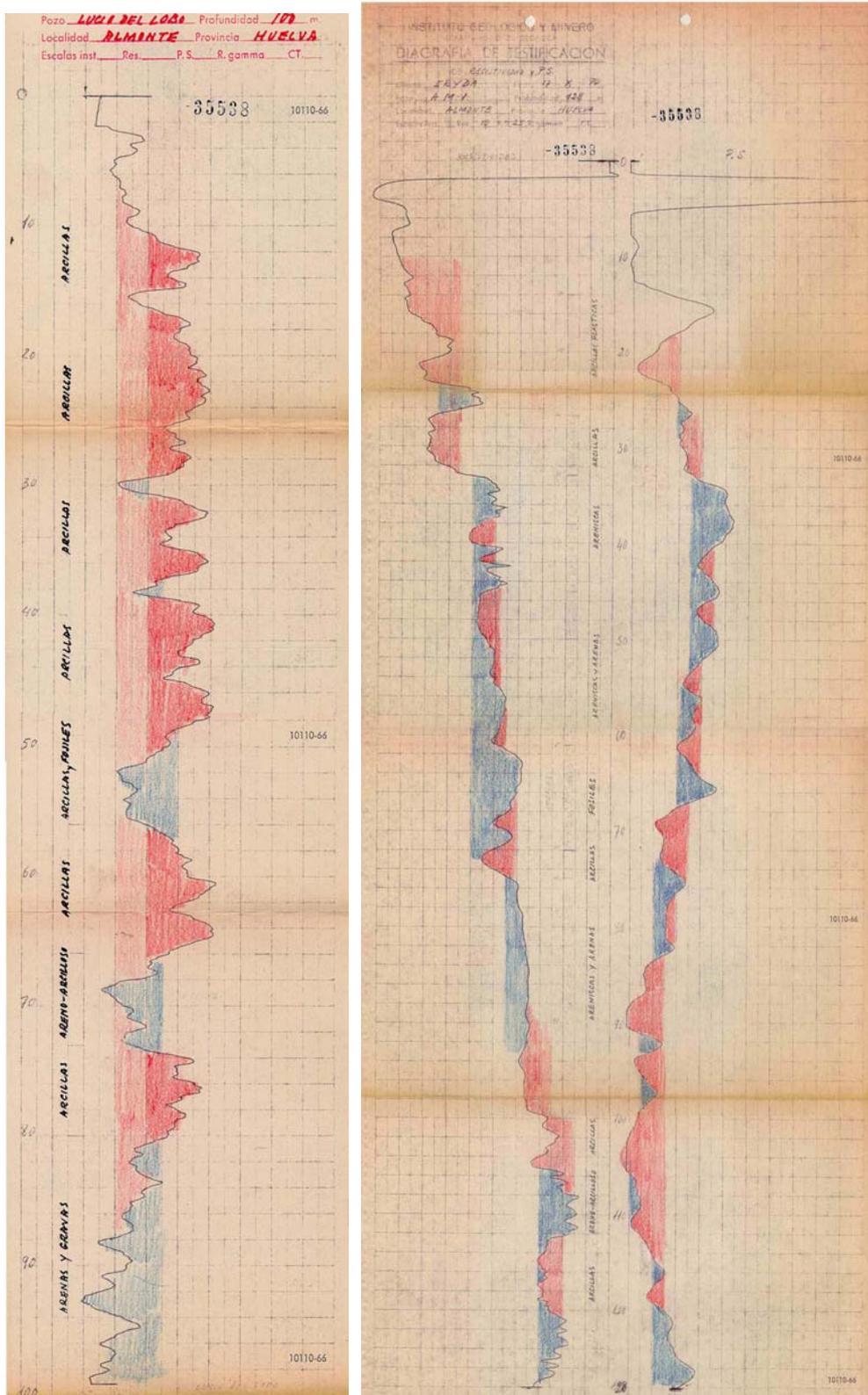


Fig. 165. Registro de gamma natural del sondeo Lucio del Lobo, y registros de PS y R del sondeo AM-1 efectuados en 1974. [ficheros 27Lucio.cpt, 27AM-1RPS.cpt]

En 1976, en el **Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.**, dedicado a los 462 sondeos mecánicos efectuados entre octubre de 1971 y marzo de 1976, se menciona que se comenzó testificando la mayoría de los sondeos, midiendo la resistividad y el potencial espontáneo con un equipo del Proyecto Guadalquivir. Se comprobó que hay una clara correlación entre los datos de las testificaciones y las características de permeabilidad esperada de las muestras de los terrenos atravesados (lo que corroboró la buena calidad de los datos obtenidos con el método de circulación inversa). A la vista de esto, en la zona de arenas dejaron de realizarse testificaciones, mientras que en el sector de Marismas se consideraron imprescindibles por tratarse de una formación distinta y esperar la aparición de un primer acuífero superior cargado de sales, y ser necesario determinar la interfase agua dulce-salada. Por averías del equipo (de IRYDA) sólo se hicieron 10 testificaciones, de las que en el mencionado informe se adjunta únicamente la del sondeo M-1-6 bis (situación indicada en la Figura 168), desconociéndose qué ha pasado con el resto. Este documento ha sido digitalizado, formando el fichero **32Sondeo M-1-6bis.xls**, reproducido gráficamente en la Figura 166.

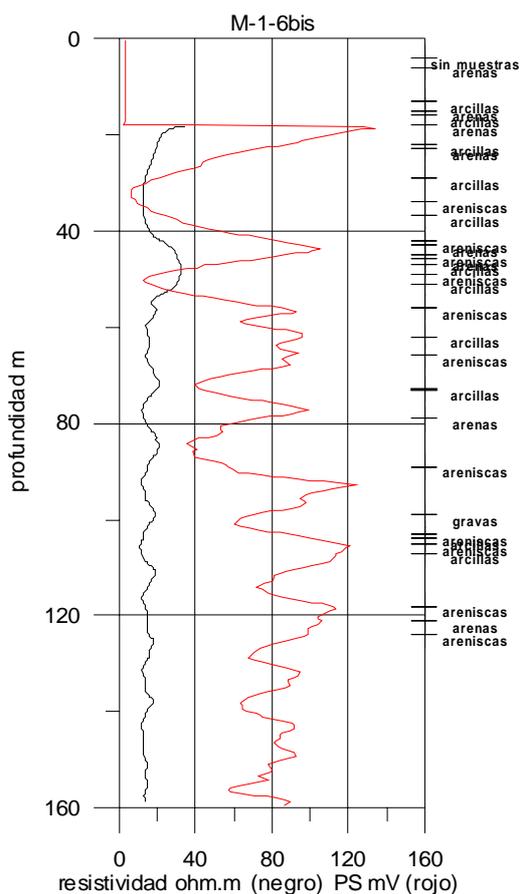
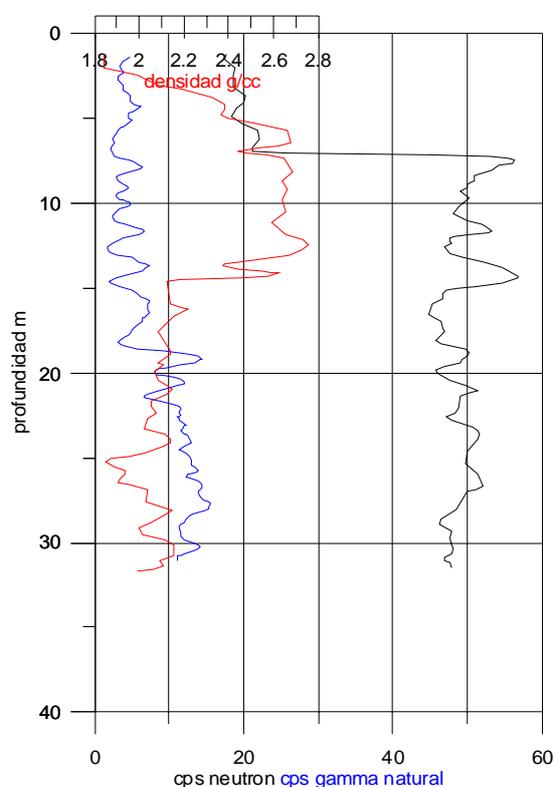


Fig. 166. Testificación del sondeo M6-1bis procedente del informe del IRYDA de 1976 [fichero 32Sondeo M-1-6bis.xls]

Lo más notable de este registro es la buena respuesta del Potencial Espontáneo, que marca claramente la línea de las arenas (valores bajos de PS) y de las arcillas (valores más altos), pero con

una pobre correspondencia con la definición de la columna litológica. El registro de resistividad sigue con fidelidad las indicaciones del PS, aumentando la resistividad en las arenas; no obstante, excepto la primera capa de arenas entorno de los 50 m de profundidad, que tiene más de 30 ohm.m, las demás capas no pasan de 20 ohm.m, situándose las arcillas entorno a los 12 ohm.m. Estos valores pueden ser característicos de formaciones acuíferas, con un agua algo salobre.

En 1992, en el trabajo **Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408**, cuyo objetivo era caracterizar una zona donde se llevaban a cabo estudios para balsas de depuración, mediante SEV y bloques de resistividad, se efectuó además la testificación de uno de los sondeos mecánicos realizados en esta área (el S-2), utilizando gamma natural, neutrón, gamma-gamma y diámetro del sondeo; los registros de estos parámetros han sido digitalizados en el fichero **45SONDEO-2.xls** y su representación gráfica se reproduce en la Figura 167.



Testificación del sondeo S-2 de Mazagón

Fig. 167. Testificación del sondeo S-2 de Mazagón en 1992: registros de gamma natural (azul), gamma-gamma o densidad (rojo) y neutrón o contenido en agua (negro). [fichero 45SONDEO-2.xls]

No se dispone ni de las coordenadas ni de la columna litológica del sondeo. Existe un buen contraste de densidad entre el tramo hasta los 15 m de profundidad, con 2.6 g/cm^3 y el resto, donde baja a 2.1 g/cm^3 , y tiene algún tramo con densidad inferior a 2 g/cm^3 . A partir de los 18 m aumenta el valor de la radiación gamma natural, de donde se deduce que se trata de arcillas, mientras que el tramo superior puede suponerse de arenas, dada la secuencia litológica de esta zona. El valor del registro de neutrón también disminuye a partir de esa profundidad, lo que corrobora que el tramo más

permeable, con mayor contenido en agua, es el superior. Este es el único registro de estos parámetros que conocemos en el acuífero. Es indudable que los registros basados en fenómenos de radiactividad son buenos indicadores litológicos e hidrogeológicos, sin presentar la dependencia con la salinidad del agua que acontece en los registros de resistividad. Sin embargo, para su ejecución es indispensable que el sondeo no esté entubado, y su costo de ejecución es superior, exigiendo el empleo de fuentes radiactivas.

Se ha podido disponer además de las digrafías efectuadas en 1999 en el sondeo Lucio Mari López, de Conductividad y temperatura del fluido de todo el sondeo (157 m), y de PS, Resistividad larga (64") y corta (16") desde el metro 80. La calidad de los documentos no permite su digitalización. Hasta los 100 m de profundidad el sondeo está cementado, por lo que los registros de PS y resistividad no son válidos. A partir de esa profundidad, la distinción de las líneas de "arenas" y "arcillas" en el registro de PS es muy buena, guardando una exacta correspondencia con el registro de resistividad. Las arcillas se miden en el registro largo con valores de 15 ohm.m, pasando a 45 ohm.m en los tramos potentes de cantos rodados o gravas. Esta resistividad se corresponde a materiales con agua dulce, aunque la calidad disponible del registro de conductividad del fluido no permite la lectura. La combinación de estos registros con el de gamma natural permite una buena identificación de los tramos, mejorando la descripción de la columna litológica disponible.

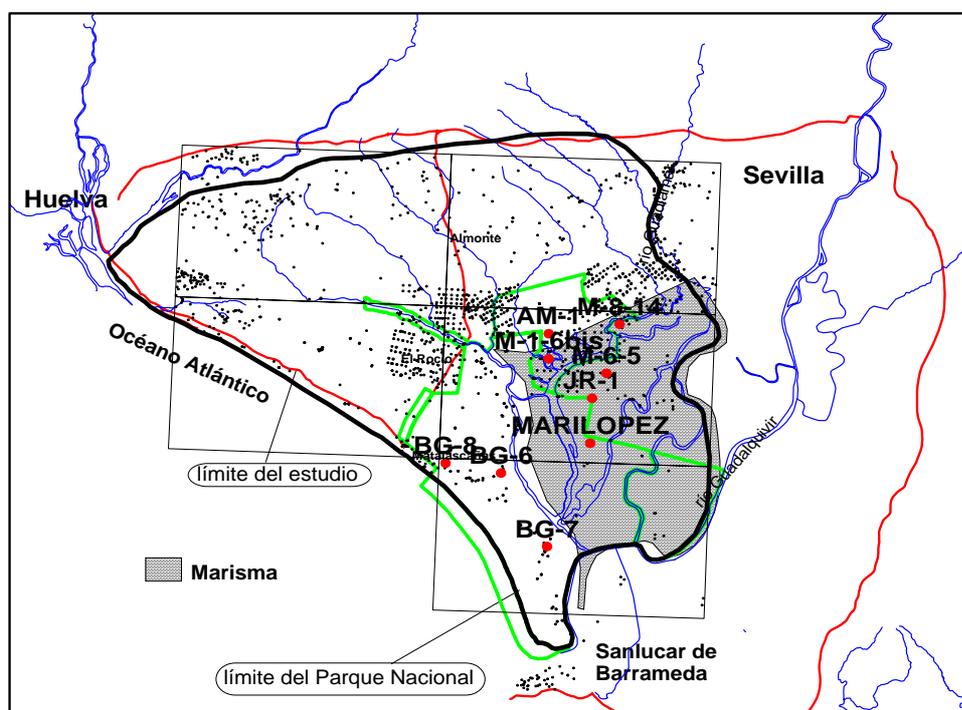


Fig. 168. Situación de los sondeos testificados en el periodo 1968-1992.[fichero antiguos.xls]

IV.2.1.2 Testificaciones para determinar la salinidad del agua

La campaña más numerosa de testificaciones que ha podido ser recuperada es la efectuada en 1995 en el **Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963**. Es un trabajo realizado en la zona nororiental del Parque Nacional de Doñana, sectores I y Marismas del Plan de Transformación Agraria, donde existen dos zonas de calidad de agua diferenciadas: en el acuífero libre y en la porción del mismo bajo los sedimentos impermeables de las marismas, donde pasa a ser semiconfinado, las aguas son de buena calidad y facies bicarbonatada cálcica (conductividad inferior a 1000 uS/cm) ; hacia el Sur y Sureste, a medida que aumenta el espesor de sedimentos confinantes de marismas, las aguas evolucionan bruscamente hacia facies cloruradas sódicas (más de 20.000 uS/cm), evidenciando la existencia de una zona de tránsito de agua dulce-agua salada, cuya situación está siendo desplazada hacia las zonas de explotación. En el mencionado trabajo, las testificaciones geofísicas tienen por objeto establecer un diagnóstico de la calidad de las aguas y la definición de la posición de la interfase. Se llevó a cabo una campaña de testificación de 31 sondeos, con dos equipos: 16 sondeos se efectuaron con un Century CompuLog III con medición continua de gamma natural, temperatura, incremento de temperatura y conductividad del fluido, y en los restantes las mediciones fueron efectuadas a intervalos discretos con un aparato Instran 30, con medición de conductividad y temperatura. Los sondeos testificados, cuya situación se indica en las Figuras 168 y 169, son:

| Nº registro | Denominación | id | profundidad test | Aparato |
|-------------|--------------|----|------------------|---------|
| 114170034 | I-2-5 | 35 | 65 | CC |
| 114180079 | I-6-2 | 36 | 65 | CC |
| 114220018 | AM-1 | 12 | 120 | CC |
| 114220045 | AM-5 | 51 | 87 | CC |
| 114230035 | AM-10 | 52 | 98 | CC |
| 114220013 | M-1-1 | 53 | 135 | CC |
| 114220025 | M-2-6 | 54 | 102 | CC |
| 114220037 | M-4-3 | 55 | 105 | CC |
| 114230030 | M-6-3 | 56 | 132 | CC |
| 114170069 | AM-13 | 57 | 110 | CC |
| 114230062 | M-7-6 | 58 | 82 | CC |
| 114210156 | Pichiricha-4 | 59 | 105 | CC |
| 114160018 | L.Anguila-1 | 60 | 65 | CC |
| 114220047 | Juncos-1 | 61 | 65 | CC |
| 114240021 | C. Bombas | 62 | 175 | CC |
| 114180096 | Pescante | 63 | 145 | CC |
| 114170034 | I-2-5 | 35 | 60 | INS |
| 114180079 | I-6-2 | 36 | 60 | INS |
| 114170110 | I-4-19 | 37 | 60 | INS |
| 114170120 | I-8-8 | 38 | 60 | INS |
| 114220017 | AM-3 | 39 | 80 | INS |
| 114170138 | AM-12 | 40 | 80 | INS |

| | | | | |
|-----------|----------------|----|-----|-----|
| 114220039 | M-1-5 | 41 | 65 | INS |
| 114220023 | M-2-3 | 42 | 65 | INS |
| 114260002 | M-2-7 | 24 | 65 | INS |
| 114220022 | M-3-4 | 43 | 55 | INS |
| 114260006 | M-4-5 | 44 | 80 | INS |
| 114220014 | M-4-7 | 45 | 95 | INS |
| 114230060 | M-5-5 | 46 | 60 | INS |
| 114230061 | M-6-8 | 47 | 140 | INS |
| 114170073 | M-8-4 | 48 | 65 | INS |
| 114270023 | Casa Lobo | 49 | 48 | INS |
| 114280006 | Lucio Cangrejo | 50 | 105 | INS |

El identificador id es el que permite la localización del sondeo en el plano de posición de la Figura 170.

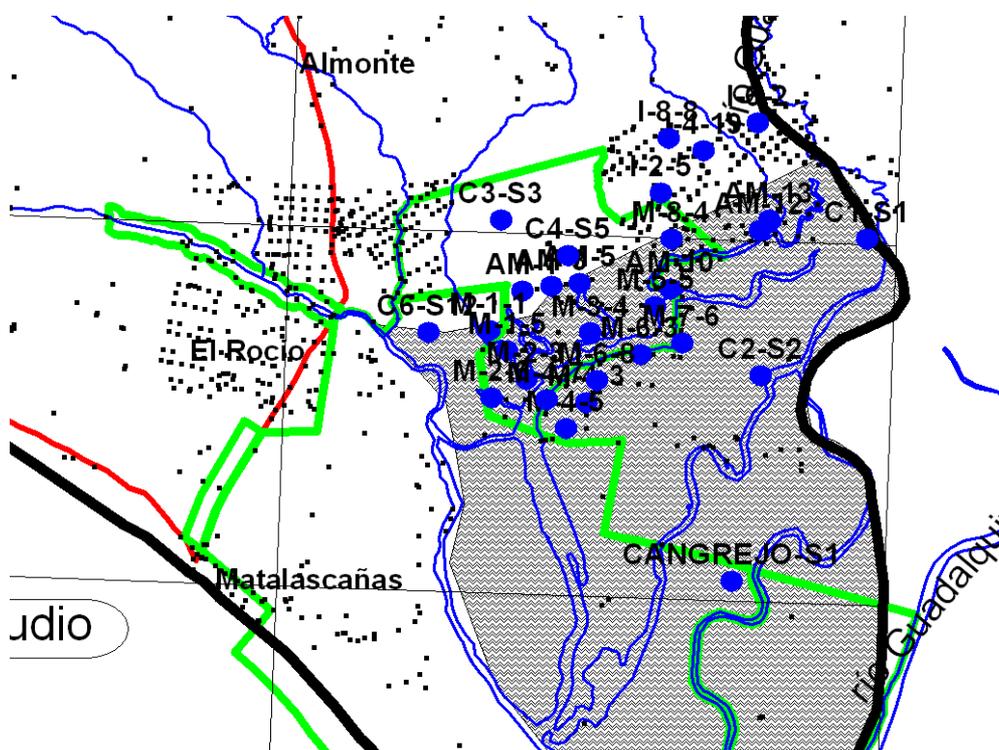


Fig. 169. Situación de los sondeos testificados (puntos azules) en la campaña de 1994-95, Informe Ref. 35.963 [fichero 35963.xls]

Los registros geofísicos y las columnas litológicas están recogidos en el Anexo del informe original Ref. 35.963, no disponiéndose de los registros digitales, que, al menos para la sonda Century, es muy probable que existieran en su día. Los resultados de este trabajo de testificación fueron ya expuestos en el capítulo III (“Análisis de la información”), apartado 4 “Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce- agua salada”.



Fig. 170. Posición de los sondeos testificados e indicación de las líneas de isoconductividad en 1994. [fichero 46Fig-5.tif]

En la información geofísica recopilada no existen más documentos con testificaciones geofísicas, pero se tiene conocimiento (comunicación de M. Manzano, UPC) de la existencia de nuevas testificaciones de conductividad y temperatura del fluido. Un grupo lo constituyen las efectuadas para la tesis doctoral de E. Romero en septiembre de 1993:

| sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof | FECHA | C/Tª |
|--------|------------|---------------------------|--------|----------|------|
| AM-11 | 114170049 | Sector AM, Almonte-Marism | 147 | 1-Sep-93 | X |
| AM-13 | 114170069 | Sector AM, Almonte-Marism | 121 | 1-Sep-93 | X |
| AM-14 | 114170060 | Dehesa de Pilas | 106 | 1-Sep-93 | X |
| AM-16 | 114180030 | Sector AM, Almonte-Marism | 116,75 | 1-Sep-93 | X |
| AM-17 | 114170061 | Sector AM, Almonte-Marism | 122 | 1-Sep-93 | X |
| I-5-20 | 114180051 | Sector I, Almonte-Marism. | 79 | 1-Sep-93 | X |
| I-6-10 | 114180070 | Sector I, Almonte-Marism. | 64,65 | 1-Sep-93 | X |
| M-1-1 | 114220013 | Sector M, Almonte-Marism | 148,9 | 1-Sep-93 | X |
| M-2-6 | 114220025 | Sector M, Almonte-Marism | 182 | 1-Sep-93 | X |
| M-4-3 | 114220037 | Sector M, Almonte-Marism | 187,9 | 1-Sep-93 | X |
| M-7-6 | 114230062 | Sector M, Almonte-Marism | 175,9 | 1-Sep-93 | X |

[Fichero Tesis.xls]

No se dispone de los registros. Su situación se indica en la Figura 171.

Otro grupo son las campañas realizadas de medición de temperatura y conductividad del fluido, por la UPC desde 1996 a 2000, en los siguientes sondeos (con repeticiones de varios de ellos en diversas fechas):

| sondeo | Nº Invent. | Toponimia |
|----------|------------|----------------------|
| ABALARIO | 104230003 | El Abalarío |
| BG-32 | 104220006 | El Arenosillo |
| C1-S1 | 114180096 | El Pescante |
| C10-S21 | 104240117 | El Alamillo |
| C10-S22 | 104240118 | El Alamillo |
| C10-S24 | 104240120 | El Alamillo |
| C11-S25 | 104170010 | Los Cabezudos |
| C11-S26 | 104170011 | Los Cabezudos |
| C11-S27 | 104170012 | Los Cabezudos |
| C11-S28 | 104170013 | Los Cabezudos |
| C12-S35 | 114150104 | Merco |
| C13-S31 | 114210158 | Sector-III |
| C13-S36 | 114210159 | Sector-III |
| C14-S32 | 104230011 | El Abalarío |
| C14-S33 | 104230012 | El Abalarío |
| C14-S34 | 104230013 | El Abalarío |
| C15-S37 | 114210160 | Depuradora El Rocío |
| C17-S41 | 104280052 | Guardia Civil Matala |
| C17-S42 | 104280053 | Guardia Civil Matala |
| C18-S44 | 104170014 | Los Bodegones |
| C18-S45 | 104170015 | Los Bodegones |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana |
| C19-S51 | 114310018 | Palacio Doñana |
| C2-S2 | 114240021 | Casa Bombas |
| C20-S46 | 104180031 | Arroyo de la Cañada |
| C21-S54 | 114170140 | Partido Resina |

| | | |
|--------------|-----------|--------------------------------|
| C21-S55 | 114170141 | Partido Resina |
| C22-S53 | 104280062 | Barrera Palacio Doñana |
| C4-S5 | 114220047 | La Juncosilla (o Portachuelo) |
| C4-S7 | 114220049 | La Juncosilla (o Portachuelo) |
| C5-S15 | 114270023 | Los Caracoles |
| C7-S13 | 114220050 | Chozas del Raposo |
| C8-S16 | 114250011 | La Mogea |
| C9-S19 | 104240115 | Los Mimbrales |
| CANGREJO-S1 | 114280005 | CHOZAS-LUCIO CANGREJO 1 |
| CANGREJO-S2 | 114280006 | CHOZAS-LUCIO CANGREJO 2 |
| CANGREJO-S3 | 114280007 | CHOZAS-LUCIO CANGREJO 3 |
| CASALOBO-S1 | 114270019 | CASA DEL LOBO 1 |
| CASALOBO-S2 | 114270020 | CASA DEL LOBO 2 |
| DULCE | P1010 | Laguna Dulce |
| L-2 | 104230015 | Lag. Los Ansares |
| L-3 | 104230016 | Lag. Rivetehilos |
| L-4A | 104230017 | Manantial Rivetehilos |
| L-5 | 104220023 | Lag. del Rio Oro |
| L-6 | 104220021 | Lag. N de la Vaca |
| L-7 | 104220022 | Lag. Moguer |
| M-7-1 | 114230039 | Sector M, Almonte-Marism |
| MARISM59-C24 | 114360020 | Palacio de Marismillas |
| MARISM60 | 114360021 | Palacio de Marismillas |
| P-2 | 104280031 | Matalascañas N-2 |
| P7 | P1089 | Abastecimiento de Matalascañas |
| P8 | P1091 | Abastecimiento de Matalascañas |
| SGOP1-S2 | 104280037 | CarreteraN Matalascañas |
| SGOP1-S3 | 104280038 | CarreteraN Matalascañas |
| SGOP11-S1 | 104240124 | Arroyo Rocina(Sacristán) |
| SGOP11-S2 | 104240125 | Arroyo Rocina(Sacristán) |
| SGOP11-S3 | 104240126 | Arroyo Rocina(Sacristán) |
| SGOP12-S1 | 104240122 | Arroyo Rocina(Mª del Puerto) |
| SGOP12-S2 | 104240123 | Arroyo Rocina(Mª del Puerto) |
| SGOP18-S1 | 114250018 | Pilar de la Algaida |
| SGOP24-S1 | 114310023 | Lucio Caballero |
| SGOP3-S2 | 104280047 | Pas. Marítimo Matalasc. |
| SGOP38-S1 | 114310024 | Laguna Santa Olalla |
| SGOP38-S2 | 114310025 | Laguna Santa Olalla |
| SGOP38-S4 | 114310027 | Laguna Santa Olalla |
| SGOP39-S1 | 114310028 | Laguna Dulce |
| SGOP4-S1 | 114210141 | Arroyo Rocina(Canariega) |
| SGOP4-S2 | 114210142 | Arroyo Rocina(Canariega) |
| SGOP4-S3 | 114210143 | Arroyo Rocina(Canariega) |
| SGOP40-S1 | 114310030 | Laguna de Las Pajas |
| SGOP40-S2 | 114310031 | Laguna de Las Pajas |
| SGOP41-S1 | 114310032 | Laguna de los Hemanillos |
| SGOP42-S1 | 114310020 | Laguna del Sopotón |
| SGOP42-S2 | 114310021 | Laguna del Sopotón |

| | | |
|-----------|-----------|---------------------------------|
| SGOP43-S1 | 114310033 | Laguna del Zahillo |
| SGOP44-S1 | 114310034 | Laguna Taraje |
| SGOP45-S1 | 114250025 | Laguna Acebuche |
| SGOP46-S1 | 114250026 | Laguna Ojillo |
| SGOP47-S1 | 114250027 | Laguna Navazo delToro |
| SGOP48-S1 | 114310035 | Laguna del Brezo |
| SGOP49-S1 | 114310036 | Laguna Charco del Toro |
| SGOP5-S1 | 104270006 | El Asperillo |
| SGOP5-S2 | 104270007 | El Asperillo |
| SGOP5-S3 | 104270008 | El Asperillo |
| SGOP5-S4 | 104270009 | El Asperillo |
| SGOP6-S1 | 104220018 | El Arenosillo |
| SGOP6-S2 | 104220019 | El Arenosillo |
| SGOP6-S3 | 104220020 | El Arenosillo |
| SGOP7-S2 | 114210146 | Hato Villa |
| SGOP8-S3 | 114250015 | Don Ignacio |
| SGOP9-S1 | 104280064 | Pequeña Holanda |
| SGOP9-S2 | 104280065 | Pequeña Holanda |
| SGOP9-S2 | 104280065 | Pequeña Holanda |
| SGOP9-S3 | 104280066 | Pequeña Holanda |
| TEJAR-S3 | P128 | Finca El Tejar; sondeo nitratos |
| TEJAR-S4 | P108 | Finca El Tejar; sondeo nitratos |
| VETA56 | 114360017 | Vetalengua |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua |
| MALANDAR | | Cuartel de Malandar |

[fichero UPC.xls]

Su situación se indica en la Figura 171. Se ha dispuesto de copias de los siguientes registros:

| sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof | FECHA |
|--------------|------------|------------------------|------|-----------|
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 15-Mar-99 |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 24-Nov-00 |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 11-Jun-96 |
| MARISM59-C24 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 6-May-97 |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 21-Oct-99 |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 1-Mar-00 |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 6-May-97 |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 21-Oct-99 |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 6-May-97 |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 1-Mar-00 |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 1-Mar-00 |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 21-Oct-99 |
| MALANDAR | | Cuartel de Malandar | | 01-mar-00 |

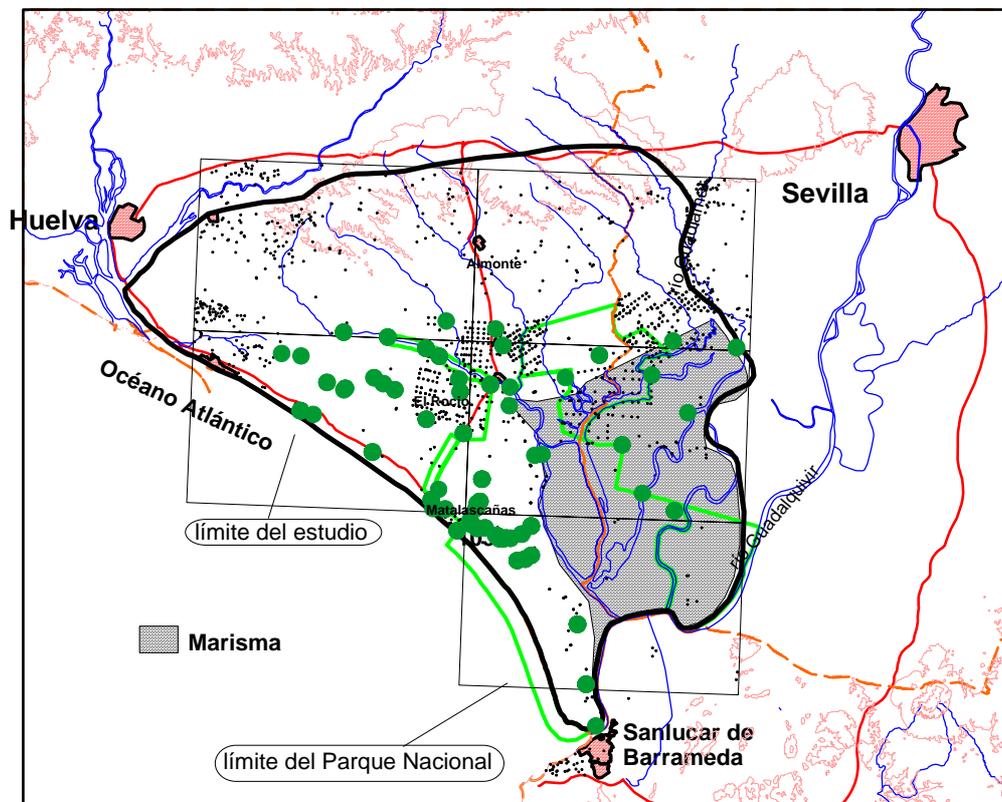
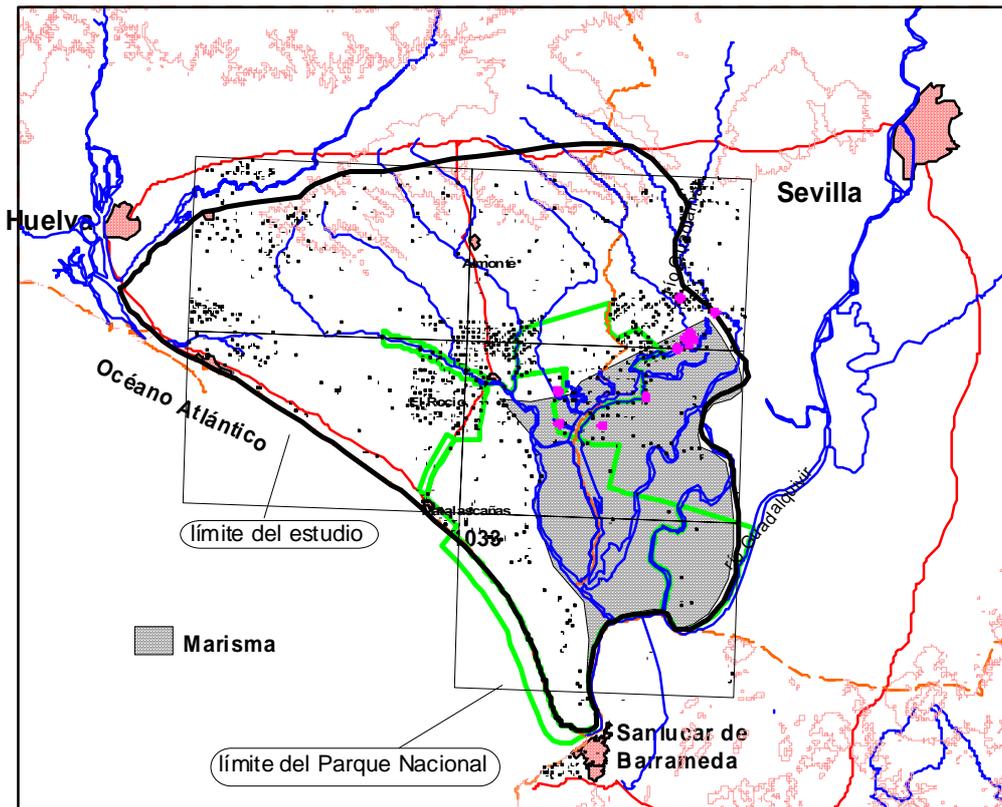


Fig. 171. Situación de los sondeos testificados en la Tesis de E. Romero (1993) [mapa superior], y por la UPC en el periodo 1996-2000 [mapa inferior]

En la información suministrada por la UPC figuran además una serie de sondeos, con la indicación de que fueron testificados de gamma natural, resistividad y temperatura del fluido por la compañía CGS, sin identificación de la fecha:

| SONDEO | Nº Invent. | Toponimia | Prof |
|-----------|------------|-------------------------------|-------|
| C1-S1 | 114180096 | El Pescante | 144 |
| C10-S21 | 104240117 | El Alamillo | 890 |
| C11-S25 | 104170010 | Los Cabezudos | 63 |
| C12-S29 | 114150103 | Merco | 26 |
| C13-S30 | 114210157 | Sector III | 44 |
| C14-S32 | 104230011 | El Abalarío | 94 |
| C15-S37 | 114210160 | Depuradora El Rocio | 98 |
| C16-S40 | 104280043 | Hotel Coto | 123 |
| C17-S41 | 104280052 | Guardia Civil Matala | 138 |
| C18-S44 | 104170014 | Los Bodegones | 38 |
| C2-S2 | 114240021 | Casa Bombas | 185 |
| C20-S46 | 104180031 | Arroyo de la Cañada | 50 |
| C21-S54 | 114170140 | Partido Resina | 75 |
| C24-S59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 |
| C4-S5 | 114220047 | La Juncosilla (o Portachuelo) | 64 |
| C7-S13 | 114220050 | Chozas del Raposo | 92 |
| C8-S16 | 114250011 | La Mogeá | 80 |
| C9-S18 | 104240114 | Los Mimbrales | 90 |
| SGOP1-S4 | 104280039 | Carretera N Matalascañas | 160 |
| SGOP10-S3 | 114210152 | Soto Chico | 68,8 |
| SGOP2-S4 | 104280051 | Sulfasaurus Matalascañ. | 150 |
| SGOP3-S2 | 104280047 | Pas. Marítimo Matalasc. | 43,1 |
| SGOP5-S4 | 104270009 | El Asperillo | 121 |
| SGOP6-S3 | 104220020 | El Arenosillo | 97,7 |
| SGOP8-S3 | 114250015 | Don Ignacio | 70,5 |
| SGOP9-S3 | 104280066 | Pequeña Holanda | 81 |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 |
| C5-S15 | 114270023 | Los Caracoles | 155 |
| C6-S12 | 114210156 | Casa de la Pichiricha | 112 |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 |
| I-1-5 | 114170067 | Hato Ratón | 75 |
| I-6-2 | 114180079 | Sector I, Almonte-Marism. | 75 |
| M-2-7 | 114260002 | Sector M, Almonte-Marism | 182 |
| P-1 | 104280015 | Urbanización El Rocio C-1-1 | 142 |
| P-2 | 104280031 | Matalascañas N-2 | 167,5 |
| P-3 | 104280032 | Matalascañas 3 | 174 |
| P-4 | 104280018 | Urbanización Matalascañas M-4 | 150 |

cuya situación se indica en la Figura 172.

Según la Oficina del IGME en Sevilla, en 1994 CGS efectuó una campaña de 2500 m de registro con un equipo Mount Sopris 1000, midiéndose gamma natural y, en algún caso, potencial espontáneo, para determinación de posición de filtros. En el mismo año se midieron también 4500 m con un equipo Century Comp.-log 1000, de gamma natural, temperatura y conductividad del fluido, y verticalidad. Desconocemos si ésta es la información a que se refiere la UPC. Estos registros fueron realizados para la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Se dispone de algunas de las fichas de Informe de Ejecución de sondeos, en las que aparece un registro de gamma natural presentada junto a la columna litológica del sondeo, así como registros de GN, Temperatura, conductividad del fluido de los siguientes registros:

| sondeo | Toponimia |
|---------|-------------------------------|
| C1-S1 | El Pescante |
| C10-S21 | El Alamillo |
| C14-S32 | El Abalarío |
| C15-S37 | Depuradora El Rocio |
| C16-S40 | Hotel Coto |
| C17-S41 | Guardia Civil Matala |
| C2-S2 | Casa Bombas |
| C21-S54 | Partido Resina |
| C24-S59 | Palacio de Marismillas |
| C4-S5 | La Juncosilla (o Portachuelo) |
| C7-S13 | Chozas del Raposo |
| C19-S49 | Palacio Doñana |
| C5-S15 | Los Caracoles |
| C6-S12 | Casa de la Pichiricha |
| C3-S57 | Vetalengua |

De los sondeos C1-S1, C17-S41, C2-S2, C19-S49, C5-S15, C23-S57 se dispone también de la testificación gamma natural efectuada con un equipo Mount-Soupris en 1996, y del C24-S59 Marismillas de la GN, SP, FI-Res, T y R, aunque en la copia del registro original en papel no es segura la distinción entre los diferentes parámetros.

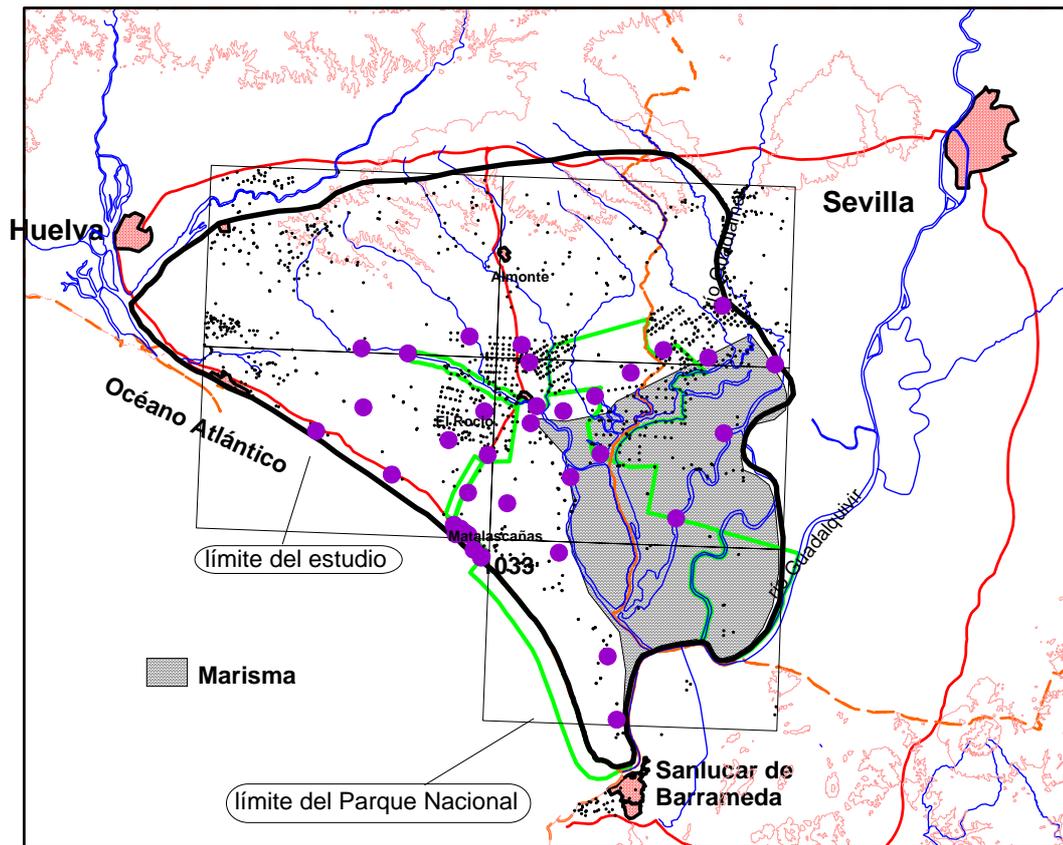


Fig. 172. Situación de sondeos testificados y asignados a una campaña de CGS, sin identificación de fecha. [Fichero CGSsinfecha.xls]

IV.2.2 Nueva campaña de testificación realizada en 2002

IV.2.2.1 Selección de sondeos a testificar en la campaña de 2002

El equipo de trabajo del presente Proyecto acordó como objetivos para efectuar una nueva campaña de testificación de los sondeos mecánicos, los siguientes:

- Delimitar la extensión de las aguas salobres bajo la Marisma.
- Delimitar el contacto de la unidad eólica y la unidad aluvial con las margas azules que constituyen la base del acuífero.

Los criterios de selección de los emplazamientos, de acuerdo con los objetivos propuestos, fueron:

- Sondeos en los que se observe un contraste en profundidad entre aguas dulces y aguas salobres

De acuerdo con los perfiles de conductividad eléctrica y temperatura realizados anteriormente en diferentes sondeos del área se han seleccionado los sondeos **Vetalengua S-57** y **Marismillas S-59**.

- Sondeos en los que exista un contraste litológico en profundidad entre depósitos arenosos y depósitos margoso/arcillosos.

-En el NE de la Marisma, las columnas litológicas de los sondeos que se relacionan a continuación muestran la existencia de un paquete arcilloso superior (Unidad de Marisma) con espesores de 80 a 100 metros con pasadas de niveles de gravas y arenas. Por debajo de esta unidad se identifica un paquete de materiales con espesores de más de 100 m (Lucio Lobo) y constituido principalmente por niveles de arenas y gravas con alternancia de niveles arcillosos de pocos metros de espesor. Es decir, no cortan las margas azules ni los limos de transición, pero quizá sirvieran para calibrar el contraste entre arcillas –de marisma- y arenas. Estos sondeos son: **Caracoles**, **Casa bombas**, **AM-12**, **M-6-5**, **M-1-1**, **Lucio Lobo** y **Lucio Mari López**.

-En el borde N de la Marisma los sondeos **AM-3**, **AM-4** y **AM-5** sí cortan las “margas azules”, pero todos ellos están entubados por encima de las margas.

- En el área del manto eólico (entre el contorno Oeste de la Marisma y Abalarío), aunque existen columnas litológicas de hasta 300 m (p.e. el sondeo BG-8) que atraviesan la unidad eólica y un importante espesor de “margas azules”, la entubación posterior de la mayoría de los sondeos consultados se queda en el paquete de arenas. Como excepción se han encontrado algunos sondeos que pueden ser utilizados para realizar las diagráfias, pero se desconoce su estado actual y accesibilidad, como los siguientes:

- **V-1-1**: unidad eólica de 0 a 54; margas azules de 54-77.67
- **V-1-11**: unidad eólica de 0 a 52 m; margas azules de 52 a 70 m

- **IV-3-8:** unidad eólica de 0 a 84 m; margas azules de 84 a 135

Como alternativa a estos sondeos, hay dos muy cercanos y que según un informe reciente de la CHG tienen un acceso fácil y no están equipados con bomba. Son:

- **V-1-9** (77 m de profundidad), cerca del V-1-1 y V-1-11
- **IV-3-3** (134 m de profundidad), cerca del IV-3-8

En consecuencia, se preparó el siguiente cuadro de características de sondeos donde era de interés el llevar a cabo testificaciones:

| pr | código | Nombre | prof. | entubación | Diámetro | colmatado | Parámetros |
|----|-----------|------------------------|-------|----------------------|-----------------------------|------------|-----------------|
| 1 | 114360018 | Vetaluenga S-57 | 190 | PVC | 90 mm | 190(2000) | GE,GN,RI,C,T |
| 1 | 114360020 | Pal.Marismillas S-59 | 289 | PVC | 90 mm | 284(2000) | GE,GN,RI,C,T,DH |
| 1 | | Santa Olalla | 319 | PVC(117m) | 80 mm | lib96m | T,C,GE,GN,RI,DH |
| 1 | 114310016 | Palacio de Doñana S-49 | 191 | PVC | 90 mm | 164(2000) | GE,GN,RI,C,T,DH |
| 2 | | Corral de la Marta | 290 | PVC | 2" (51 mm) | lib180m | GN,C;T,RI |
| 2 | | Malandar | 142 | limpiar, PVC | 2" | lib60m | GN,C;T,RI |
| 2 | | Torrecarbonero | 265 | limpiar, PVC | 2" | lib160m | GN,C;T,RI |
| 3 | | Feder 4 | 200 | PVC | 80 mm | lib144m | GN,RI,C,T,DH |
| 4 | 114270023 | Los Caracoles S-15 | 165 | PVC | 90 mm | 154 (1996) | GE,GN,RI,C,T |
| 4 | 114240021 | Casa Bombas S2 | 185 | PVC (filtros) | 150mm | colm173m | GE,GN,RI,C,T |
| 4 | 114170138 | AM-12 | 152 | Fe(141m) | 18"(81m),12"(141m) | colm82m | GN,C;T |
| 4 | 114230024 | M-6-5 M-6-6 | 196,5 | Fe 193m | 18"(66.5),12"(196) | | GN,C;T |
| 4 | 114220013 | M-1-1(ParqueNc) | 148,9 | Fe | 18" | colm137m | GN,C;T |
| 4 | | Lucio Mari Lopez | 155 | | 200 mm (gravas hasta 300mm) | | GN,C;T |
| 5 | 114220017 | AM-3 | 108 | Fe,no llega a margas | 18"(86m) | colm81m | GN,C;T |
| 5 | 114220034 | AM-4 | 122 | Fe,no llega a margas | 18"(93m) | colm83m | GN,C;T |
| 5 | 114220045 | AM-5 | 150 | Fe,no llega a margas | 18"(98m) | colm88m | GN,C;T |
| 6 | 104180012 | V-1-9 | 77 | Fe,sin bomba | 18"=46cm(76m) | | GN,C;T |
| 6 | 104240058 | IV-3-3 | 134 | Fe,sin bomba | 18"(133m) | | GN,C;T |
| 6 | 114310005 | BG-8 BG- 8Sur | 300 | sonda Est.Bio. | | | GN,C;T |
| 4p | 114270002 | Lucio Lobo IARA 1974 | 240 | bomba instalada | | colm229m | NO |
| 4p | P-10 | Lucio Lobo JR-1 1986 | 100 | colapsado | <40mm | | NO |
| 6p | | V-1-1 | 77,7 | sin datos | | | NULO |
| 6p | | V-1-11 | 70,8 | sin datos | 46mm | | NULO |
| 6p | 104240085 | IV-3-8 | 137 | Fe | 18"(136m) | | NO |

El código pr indica la prioridad dada a cada sondeo:

- 1: alto interés, por haber realizado también geofísica de superficie
- 2: zona donde no se puede hacer geofísica de superficie
- 3: prioridad dependiente de la información de la columna litológica
- 4: interés para determinación de contraste de litologías en la zona NE de las Marismas (arcillas-arenas)
- 5: interés por contraste de litología en la zona N de Marismas y establecimiento de correlaciones
- 6: interés por contraste de litología en Manto Eólico y por cortar las margas azules

En la Tabla se indican además el tipo de entubación, datos del sondeo, colmatación conocida y parámetros a testificar según los objetivos de cada sondeo:

C,T : conductividad y temperatura del fluido (mínimo 38 mm de diámetro)

GE: gamma espectral (mínimo 60 mm de diámetro)

GN: gamma natural (mínimo 38 mm de diámetro)

RI: resistividad de la formación por inducción (PVC, mínimo 38 mm de diámetro)

DH: velocidad sísmica por down-hole (mínimo 80 mm de diámetro)

Se indica, resaltando en amarillo (p.e. **Vetaluenga S-57**), los sondeos que fueron finalmente realizados.



Localización de sondeos

IV.2.2.2 Sondeos testificados en la campaña de 2002

[Síntesis y adaptación del Informe presentado por IGT, Anexo IV-2-a]

Una vez planificada la campaña, se procedió a la toma de medidas, mediante contrato de asistencia técnica con la compañía de servicios Internacional Geophysical Technology (IGT), durante el mes de septiembre de 2002. El Informe de campo presentado por IGT constituye el Anexo IV-2-a.

En total se registraron 14 sondeos (1685 m) con los parámetros Gamma Natural, temperatura y conductividad del agua. En 6 de ellos (1088 m), se utilizaron además métodos más innovadores, y se midió la resistividad de la formación por inducción (tubería de PVC), y en 5 (948 m) se registró la radiación gamma espectral, esperando así obtener parámetros que permitan diferenciar entre los tipos de limos y arcillas contenidos en las diversas unidades estratigráficas. Tres sondeos fueron además utilizados para la medición de velocidad de ondas sísmicas por el sistema de down hole, a fin de disponer de datos reales para la interpretación de los trabajos de sísmica de reflexión. Su situación se indica en la Figura 173.

sondeos Doñana testificados en 2002

| Sondeo | X UTM29 | Y UTM29 | X UTM30 | Y UTM30 | prof. Reg. | Parámetros |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|
| S57 VETALENGUA | 733010 | 4087500 | 198416 | 4089658 | 180 | GN,T,C,GE,RI |
| S59 PAL. MARISMILLAS | 734320 | 4080650 | 199293 | 4082736 | 270 | GN,T,C,GE,RI,DH |
| S49 PAL. DOÑANA | 727779 | 4097040 | 193794 | 4099513 | 164 | GN,T,C,GE,RI,DH |
| S15 LOS CARACOLES | 739380 | 4101290 | 205645 | 4103025 | 153 | GN,T,C,GE,RI |
| S2 CASA BOMBAS | 743650 | 4110250 | 210473 | 4111701 | 177 | GN,T,C,GE,RI |
| Feder4 | 742210 | 4112910 | 209176 | 4114448 | 144 | GN,T,C,RI,DH |
| M-6-6 | 737728 | 4109440 | 204510 | 4111266 | 43 | GN,T,C |
| AM3 | 733160 | 4114170 | 200248 | 4116277 | 80 | GN,T,C |
| AM4 | 733850 | 4114320 | 200947 | 4116384 | 80 | GN,T,C |
| M-1-1 | 730258 | 4111734 | 197197 | 4114029 | 134 | GN,T,C |
| AM-12 | 742260 | 4117860 | 209567 | 4119386 | 81 | GN,T,C |
| LUCIO M. LOPEZ | | | 203369 | 4102702 | 110 | GN,T,C |
| BG8 | 721457 | 4097405 | 187504 | 4100276 | 25 | GN,T,C |
| BG8-sur | 721457 | 4097405 | 187504 | 4100276 | 44 | GN,T,C |

GN: gamma natural

GE: gamma espectral

T,C : temperatura y conductividad del fluido

RI: resistividad de la formación por inducción

DH: velocidad de ondas sísmicas por down-hole

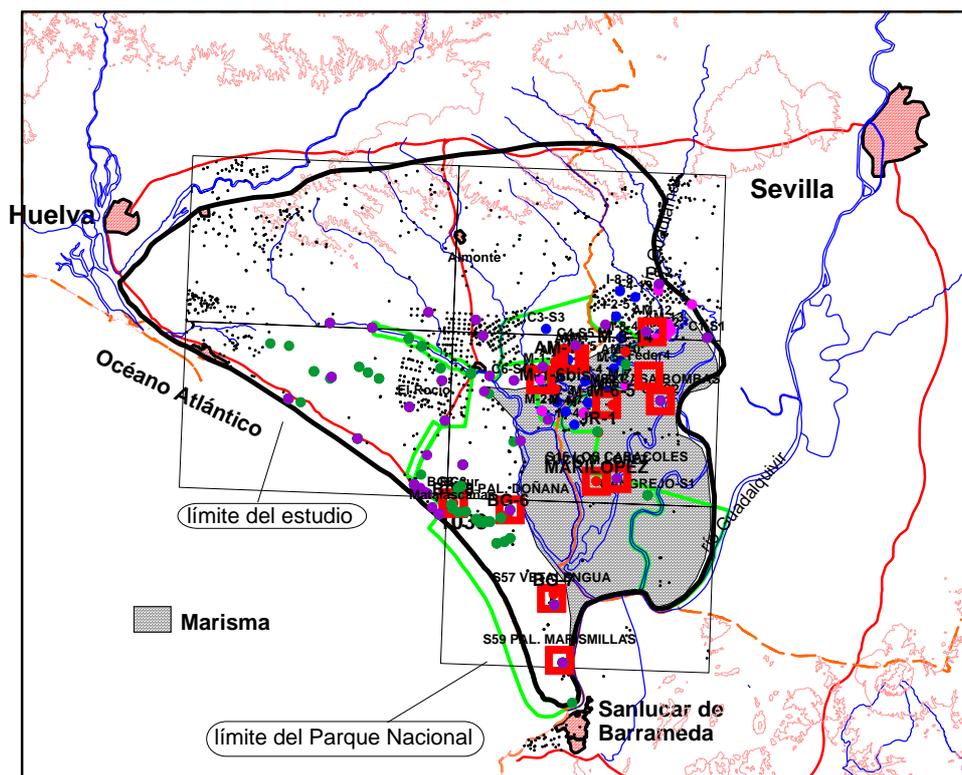


Fig. 173. Situación de sondeos testificados en la campaña de 2002 (cuadro rojo). Se indica también la situación de los sondeos de los que se tiene constancia que han sido testificados anteriormente, referidos en el apartado IV.2.1..

IV.2.2.3 Instrumentación utilizada

Los parámetros GN,T,C y RI fueron registrados con el testificador Robertson Geologging RG Micrologger 2. Con la sonda Focused Induction Probe se midió la radiación gamma natural y la resistividad de la formación. Con la sonda Temperature/Conductivity probe, se midió la radiación gamma natural, temperatura y conductividad del fluido; el sensor de conductividad está formado por tres electrodos de grafito, anticorrosivos y anulando el efecto de la polarización, con un rango de 50 a 50.000 uS/cm (200 a 0.2 ohm.m) y resolución de +/- 2.5 % para 500 uS/cm. La temperatura se mide con un error de +/-0.5 °C. La radiación gamma natural se mide con un cristal de NaI(Tl) de 50 x 25 mm, registrando a una velocidad de 4 m/min. Ambas sondas son de 38 mm de diámetro, introduciéndose en primer lugar la de temperatura-conductividad, registrando en bajada, a 4 m/min.

Los registros de Gamma Espectral fueron realizados por la Société d'Etudes de Mesures et de Maintenance (SEMM). La sonda utiliza un cristal de NaI de 50 x 150 mm, proporcionando un espectro de 250 canales a fin de determinar las cuentas del Potasio-40, Thorio-232 y Uranio-238. Esta sonda tiene un diámetro de 69 mm y las lecturas se efectúan a 2 m/min.



Testificación de un sondeo



Sonda de Gamma Espectral

Para las mediciones de Down-Hole se utilizó una cadena de 24 hidrófonos de la marca Geotomographie, a intervalo de 1 m, disponiéndose de un cable que permite efectuar mediciones hasta 120 m de profundidad. Como fuente de energía se empleó un explosivo pirotécnico de 200 g en un taladro de unos 60 cm de profundidad, situado a no más de 3-4 m de la boca del sondeo. Las mediciones se efectuaron cada 0.5 m. El tiempo cero se obtuvo mediante un geófono situado junto al punto de tiro; esta práctica, al irse deteriorando el terreno en las sucesivas explosiones, puede producir retrasos aparentes en las lecturas entre registros, que serán tenidos en cuenta debido al solape entre los mismos, para que no afecten a la medición de velocidades. Para el registro se empleó el sismógrafo Geometrics StrataView de 24 canales. Sus resultados serán comentados en el apartado IV-4.2.



Perforación para preparación de la carga



Hidrófono

IV.2.2.4 Presentación de los resultados

Los valores de Gamma Natural se presentan en cps (cuentas por segundo), sin corrección. Los registros de Temperatura se expresan en °C. La conductividad del fluido, leída en mS/cm a la temperatura T, se ha normalizado a 25° C, mediante la expresión:

$$C_{25} = C_T [46.5/(T+21.5)]$$

Las lecturas de resistividad por inducción, medida en unidades de conductividad mS/cm, se han convertido a resistividad en ohm.m mediante:

$$R(\text{ohm.m}) = 100/C \text{ (mS/cm)}$$

Para cada sondeo se presenta en un mismo documento los parámetros T (°C), $C_T - C_{25}$ (mS/cm), RI (Ohm.m) y GN (cps), junto con la columna litológica del sondeo, facilitada por el IGME.

Las lecturas de la sonda de Gamma Espectral han sido calibradas en cps, según la instalación de calibración de Schlumberger en Clamert (Francia), por lo que pueden ser utilizadas cuantitativamente. Para cada sondeo se presenta en un mismo documento los registros y sus combinaciones siguientes:

- Gamma cuentas totales cps
- Composición de cuentas totales acumuladas debidas al K+U+Th, K+Th y Th, de tal forma que se visualiza la importancia relativa de cada elemento.
- Canales independientes de K %, U ppm y Th ppm
- Relación Th/K
- Columna litológica, facilitada por el IGME

Los registros de Down-Hole, de muy buena calidad, han sido sometidos al siguiente tratamiento:

- identificación de primeras llegadas
- construcción del gráfico distancias (punto de tiro-geófono) – tiempo
- cálculo de la velocidad de las ondas P (pendiente de la curva anterior)

Puesto que la velocidad así calculada se refiere a grandes tramos del subsuelo, las variaciones en tramos de menor potencia se ha calculado mediante la diferencia de tiempos de llegada a dos

geófonos separados una distancia fija, habiéndose probado intervalos de 2 a 4 m, seleccionando finalmente como el más adecuado el de 3 m. Estos resultados se muestran para cada sondeo en un gráfico conjunto:

- curva distancias-tiempo, cuyas variaciones de pendiente son indicativas de variaciones de velocidad
- curva V_p calculada para intervalos de 3 m.

Los registros están representados en las figuras 174 a 193. (pueden observarse a mayor tamaño a través de sus imágenes en el Anexo Digital de este capítulo).

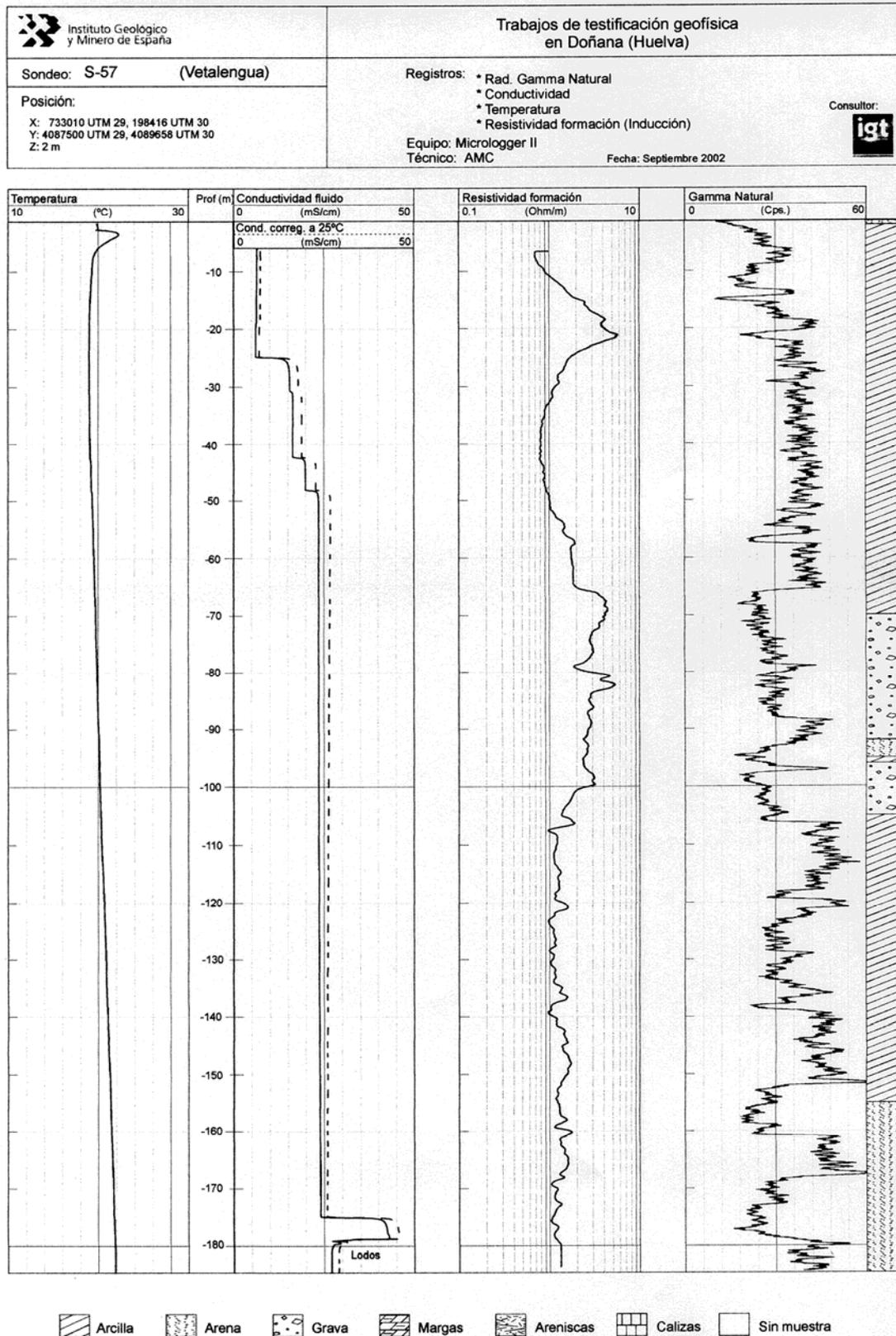


Fig. 174. Testificación en 2002 del sondeo S-57 (Vetalengua)

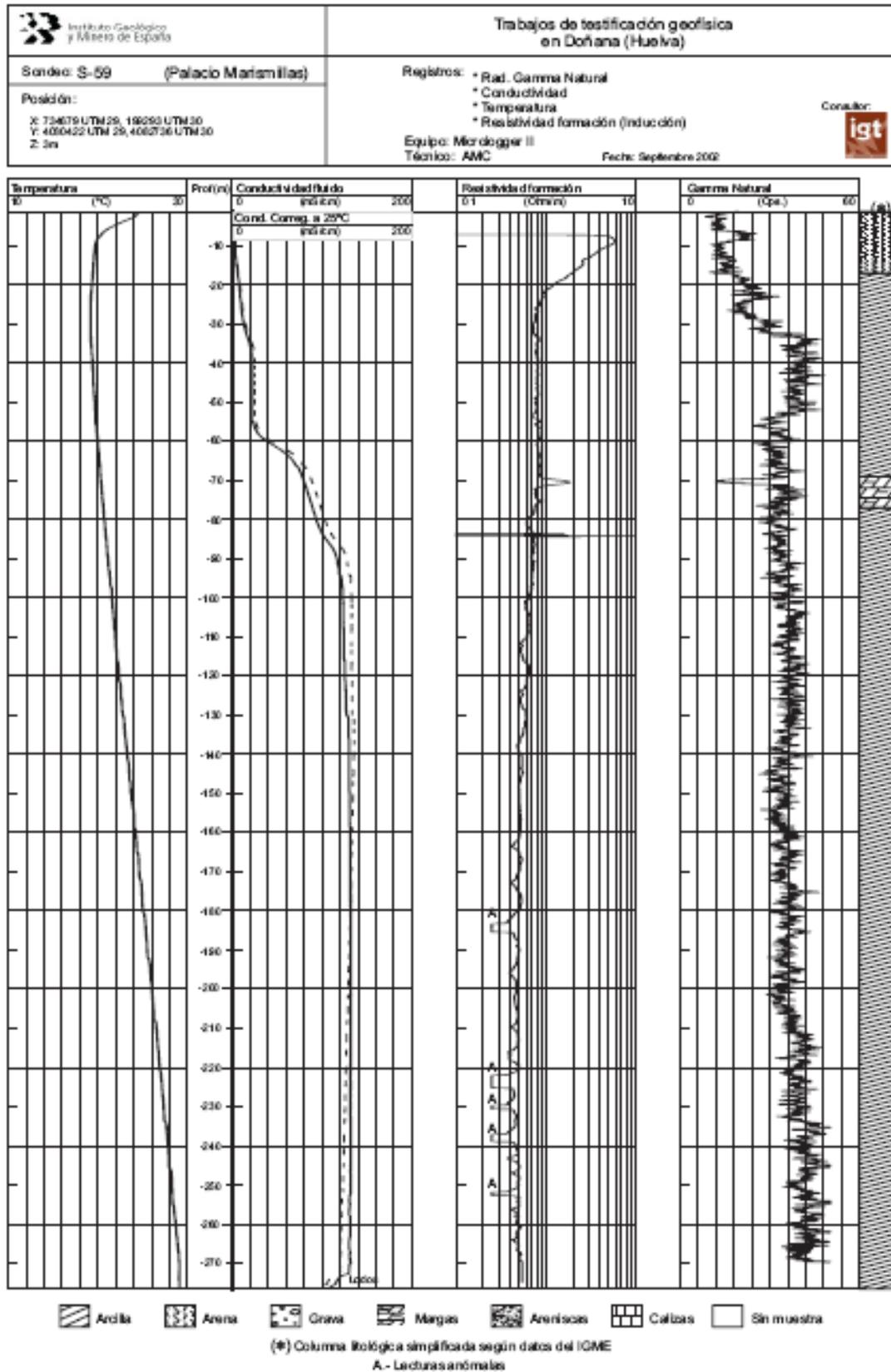
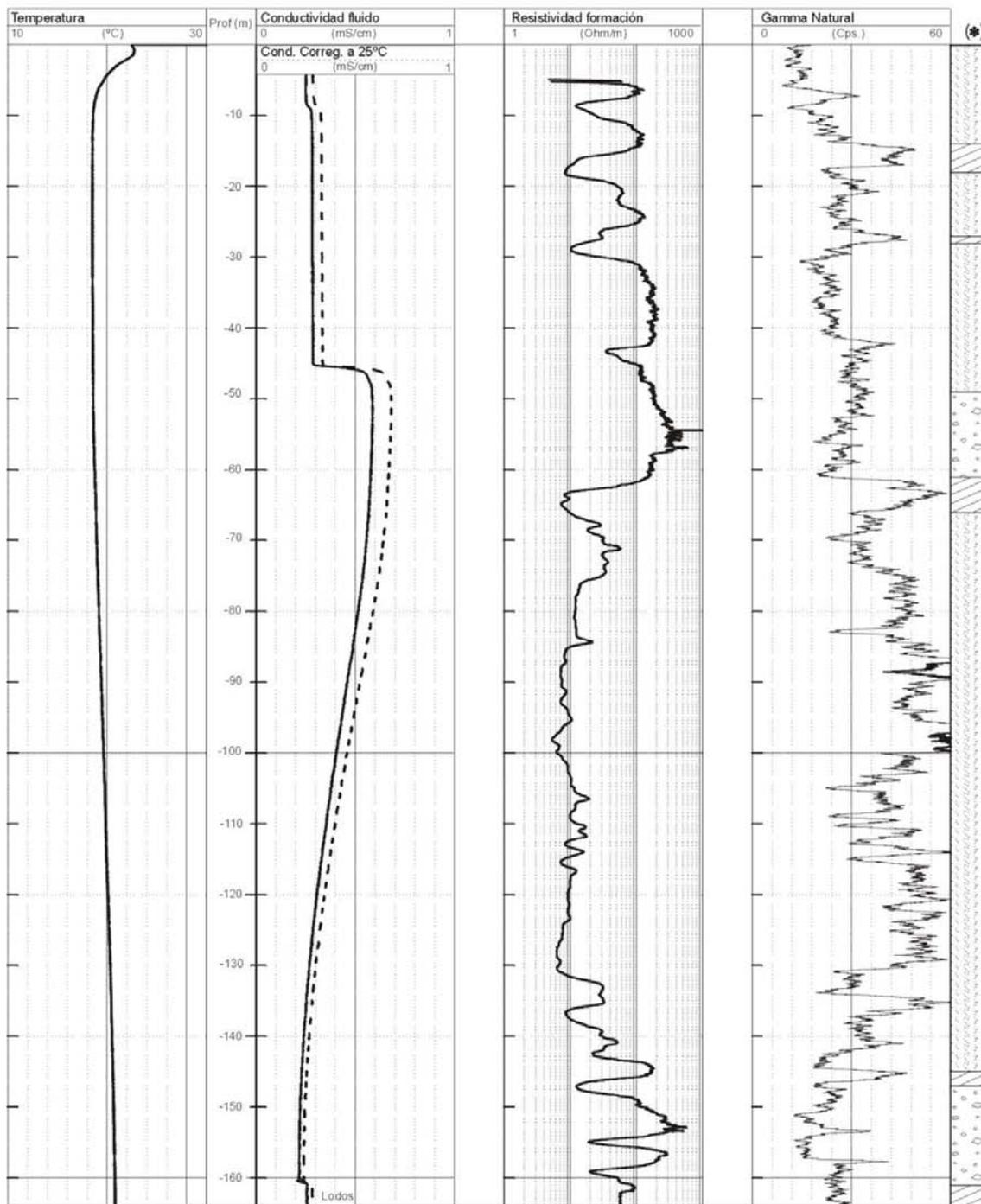


Fig. 175. Testificación en 2002 del sondeo S-59 (Palacio Marismillas)

| | | | |
|--|--|---|--|
|  | | Trabajos de testificación geofísica en Doñana (Huelva) | |
| Sondeo: S-49 (Palacio de Doñana) | | Registros: <ul style="list-style-type: none"> * Rad. Gamma Natural * Conductividad * Temperatura * Resistividad formación (Inducción) | |
| Posición: X: 727779 UTM 29, 193794 UTM 30 Y: 4097040 UTM 29, 4099513 UTM 30 Z: 2.94 m | | Equipo: Micrologger II Técnico: AMC | |
| | | Fecha: Septiembre 2002 | |
| | | Consultor:  | |





(*) Columna litológica simplificada según datos del IGME

Fig. 176. Testificación en 2002 del sondeo S-49 (Palacio Doñana)

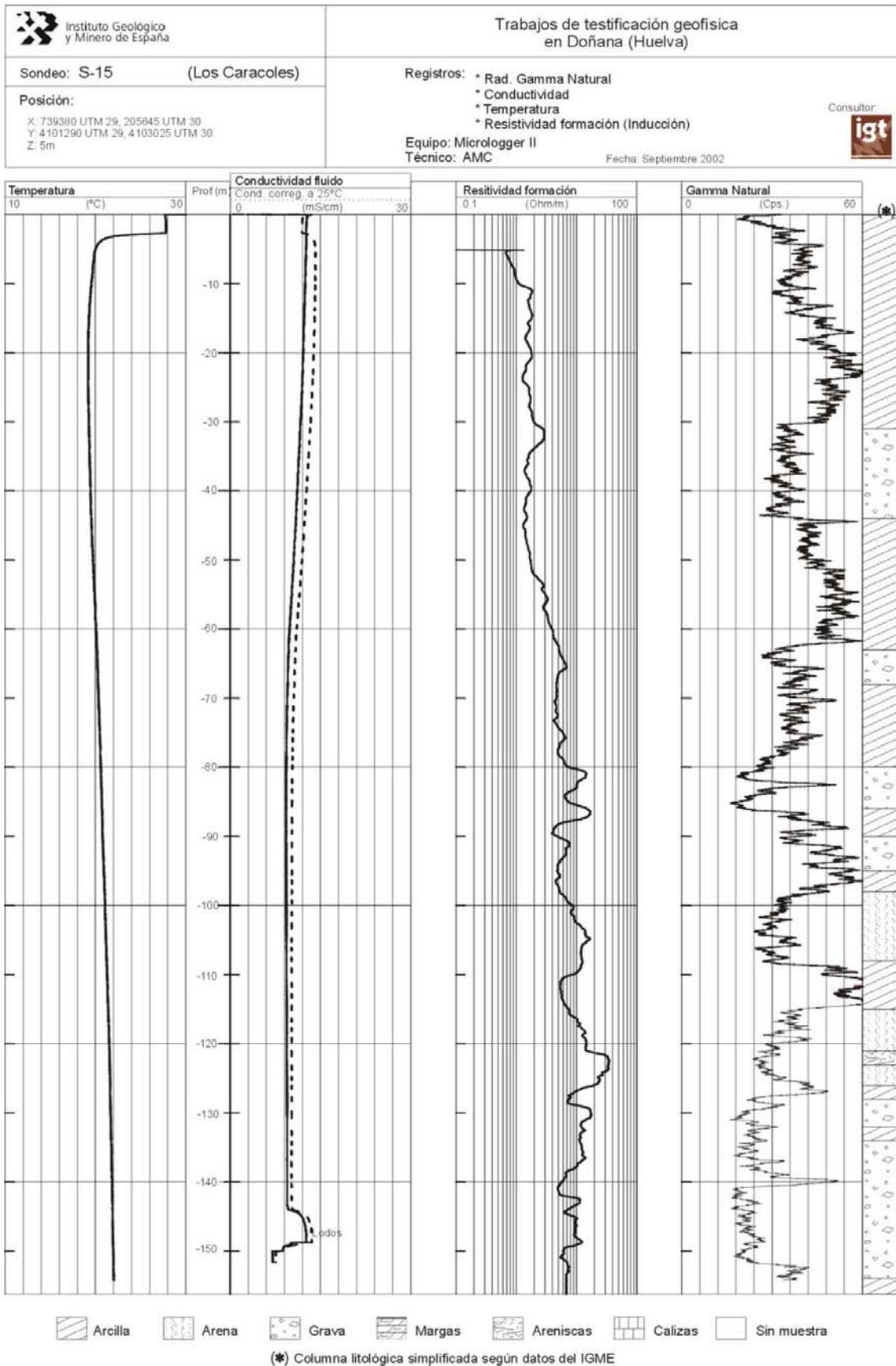


Fig. 177. Testificación en 2002 del sondeo S-15 (Los Caracoles)

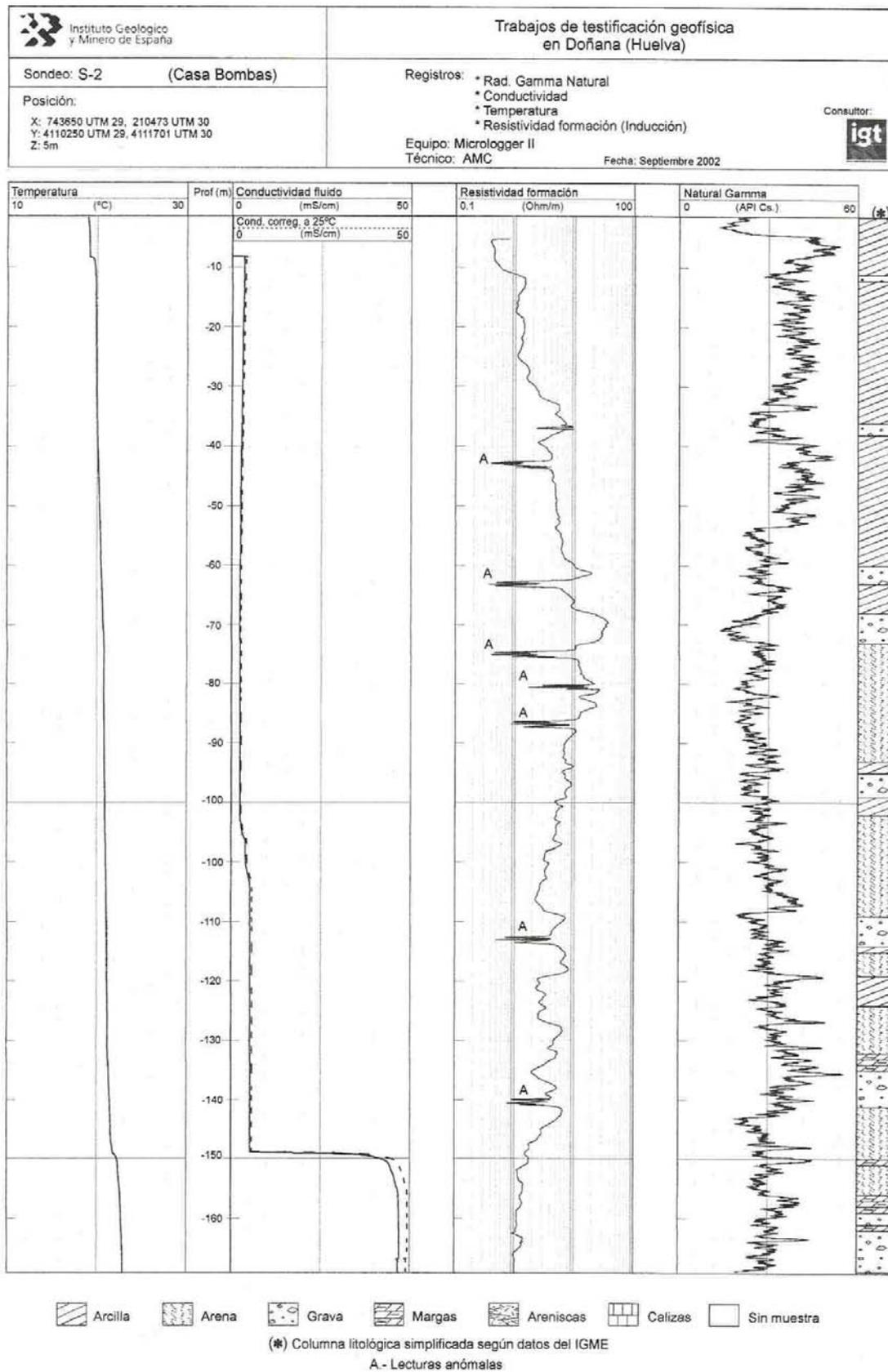


Fig. 178. Testificación en 2002 del sondeo S-2 (Casa Bombas)

| | | | |
|--|--|---|--|
|  Instituto Geológico y Minero de España | | Trabajos de testificación geofísica en Doñana (Huelva) | |
| Sondeo: FEDER-4 | | Registros: * Rad. Gamma Natural * Conductividad * Temperatura * Resistividad formación (Inducción) | |
| Posición: X: Y: Z: | | Equipo: Micrologger II Técnico: AMC | |
| | | Fecha: Septiembre 2002  Consultor | |

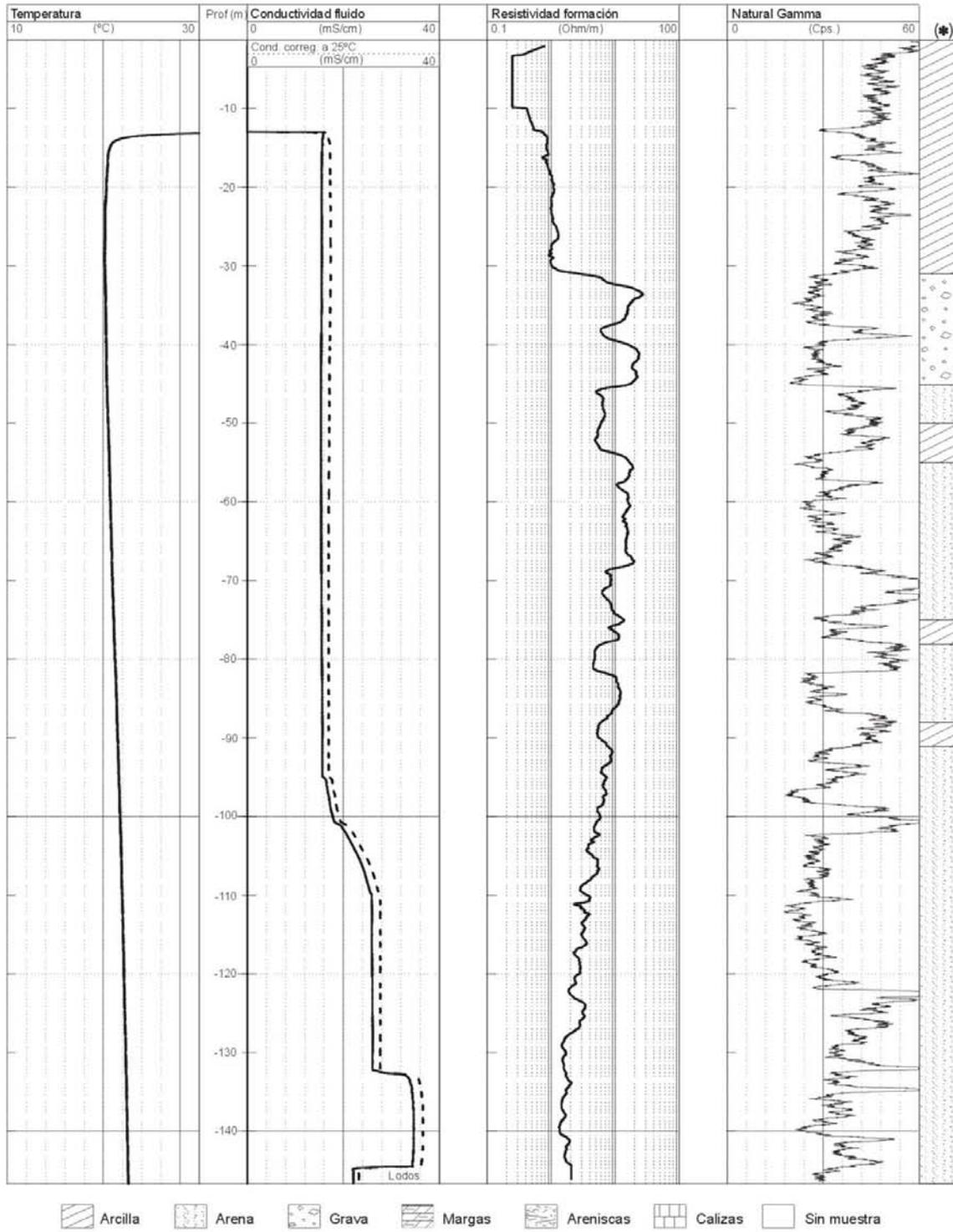


Fig. 179. Testificación en 2002 del sondeo Feder-4

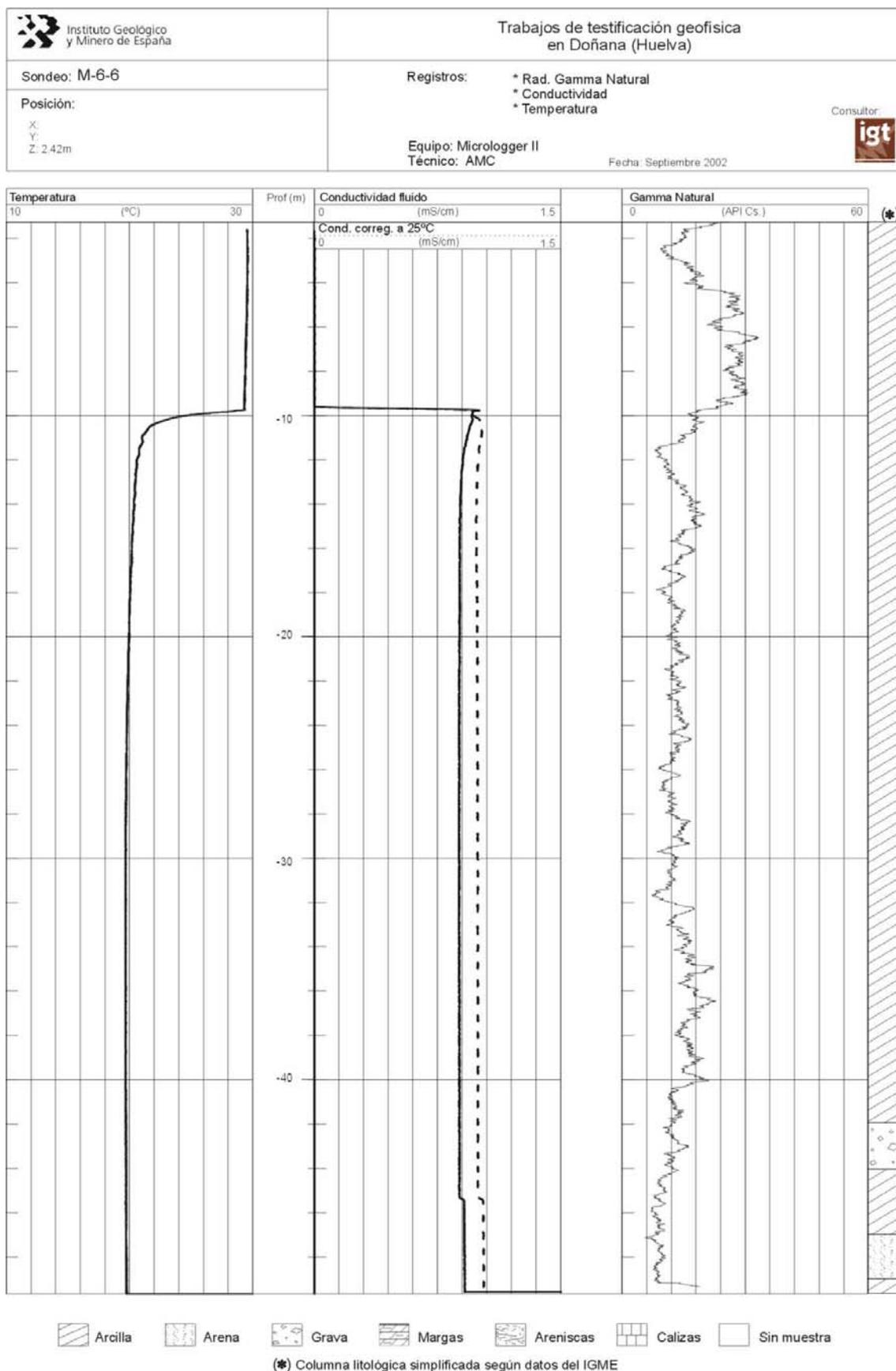


Fig. 180. Testificación en 2002 del sondeo M-6-6

| | |
|--|---|
|  Instituto Geológico y Minero de España | Trabajos de testificación geofísica en Doñana (Huelva) |
| Sondeo: AM-3 | Registros: <ul style="list-style-type: none"> * Rad. Gamma Natural * Conductividad * Temperatura |
| Posición: X: 200248 UTM 30 Y: 4116277 UTM 30 Z: 2.5m | Equipo: Micrologger II Técnico: AMC |
| Fecha: Septiembre 2002 | |
| Consultor:  | |

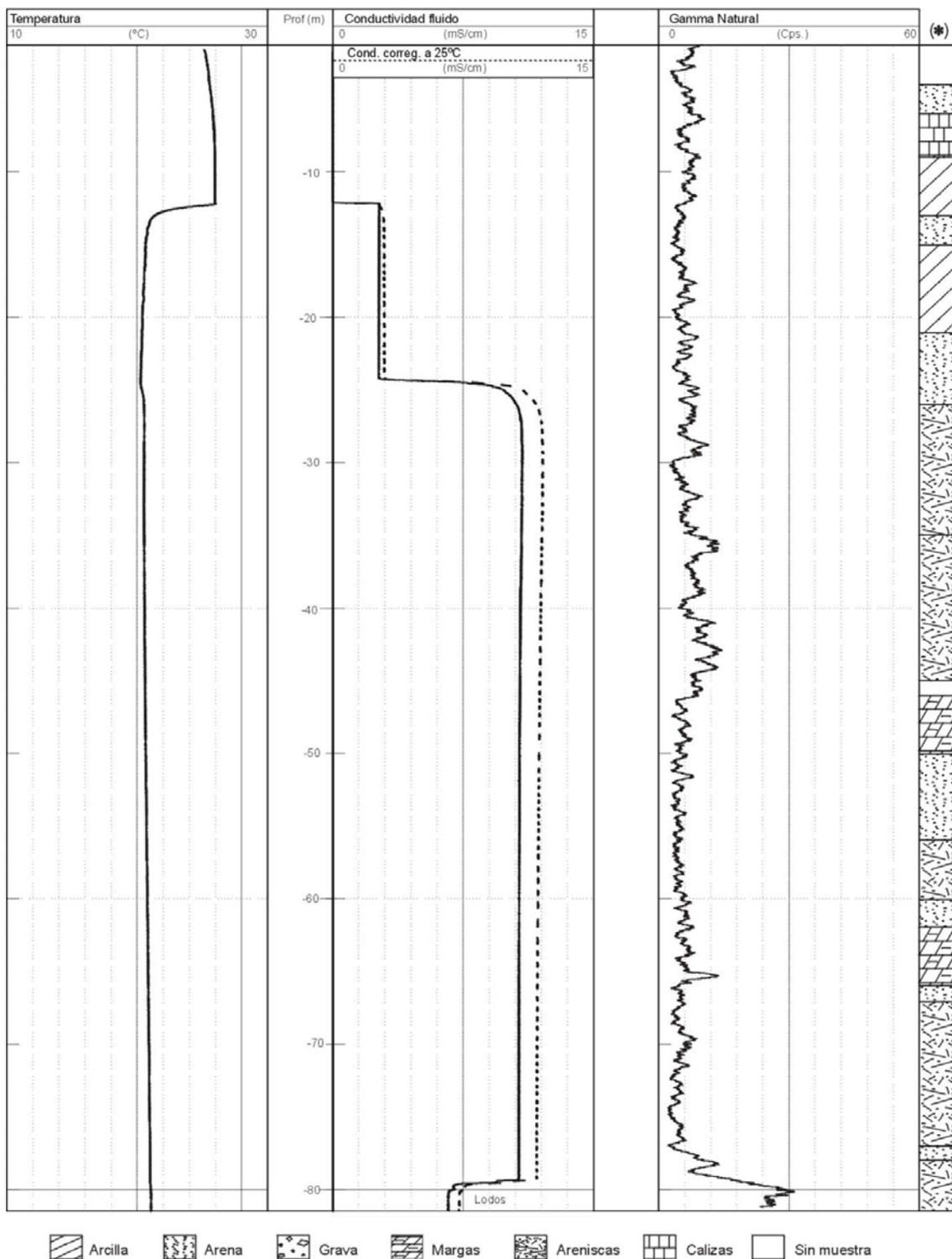


Fig. 181. Testificación en 2002 del sondeo AM-3

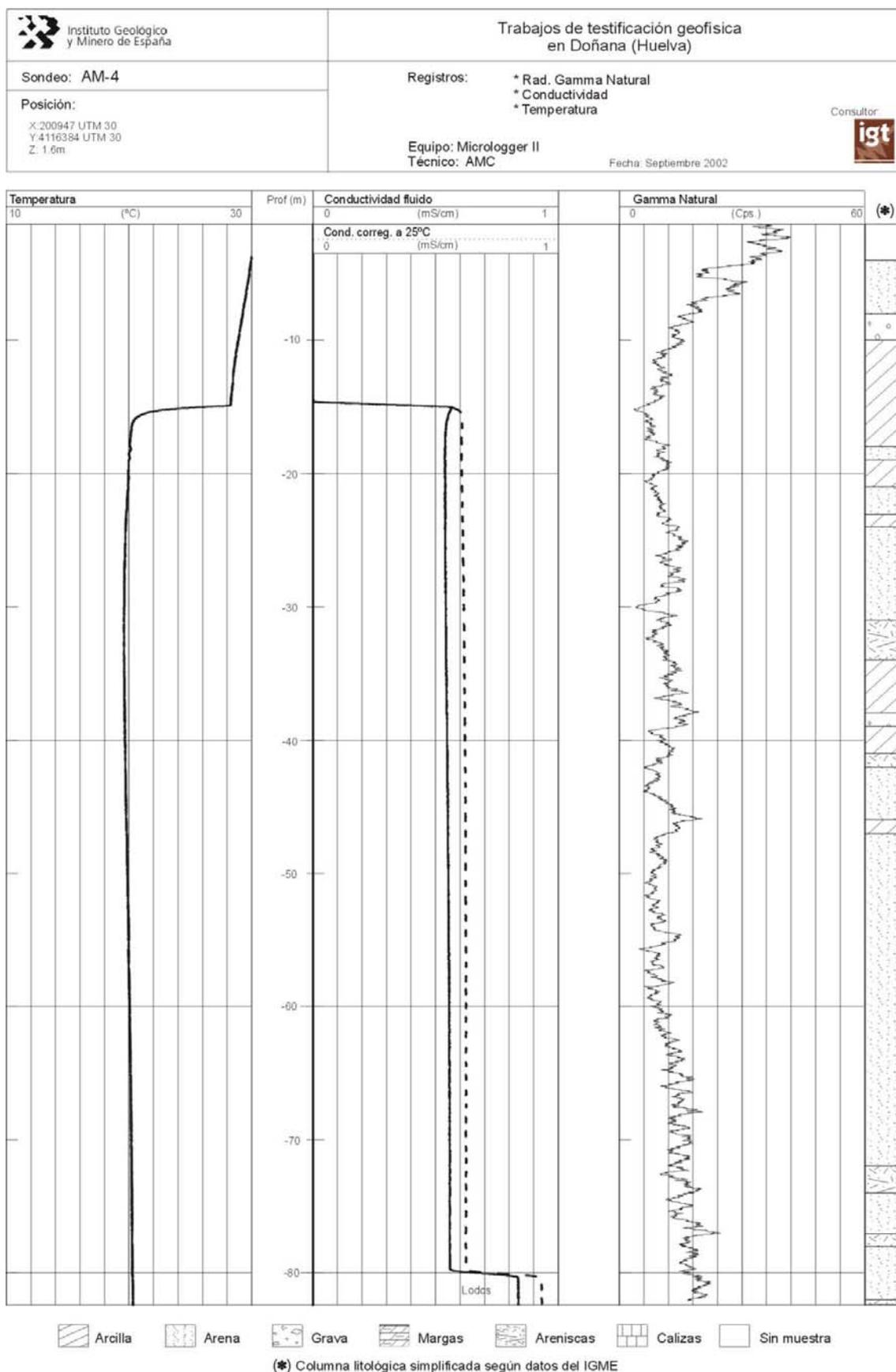


Fig. 182. Testificación en 2002 del sondeo AM-4

| | |
|--|---|
|  Instituto Geológico y Minero de España | Trabajos de testificación geofísica en Doñana (Huelva) |
| Sondeo: M-1-1 | Registros: * Rad. Gamma Natural * Conductividad * Temperatura |
| Posición: X: 197197 UTM 30 Y: 4114029 UTM 30 Z: 2.63m | Equipo: Micrologger II Técnico: AMC <div style="text-align: right;"> Consultor:  </div> |
| Fecha: Septiembre 2002 | |

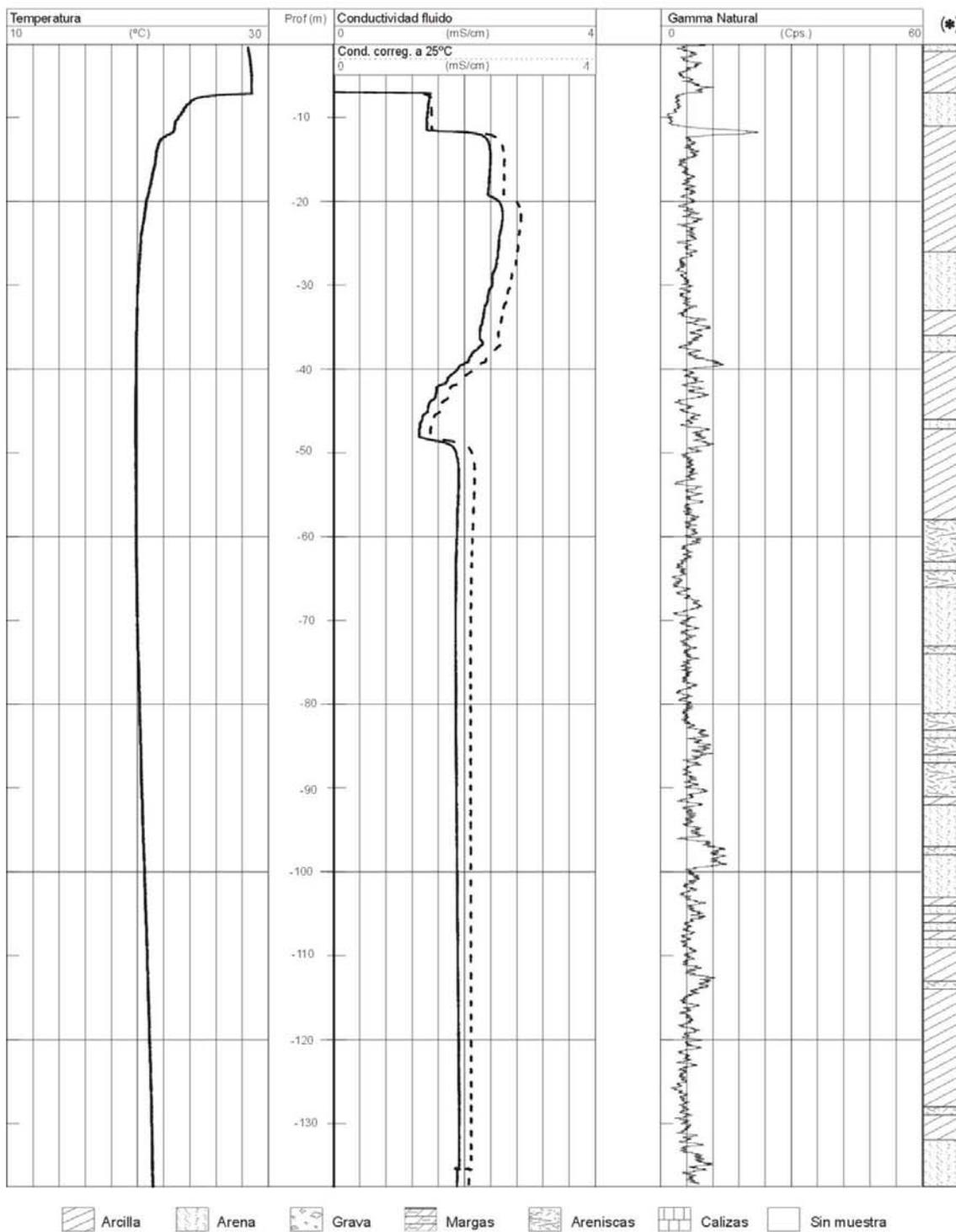


Fig. 183. Testificación en 2002 del sondeo M-1-1

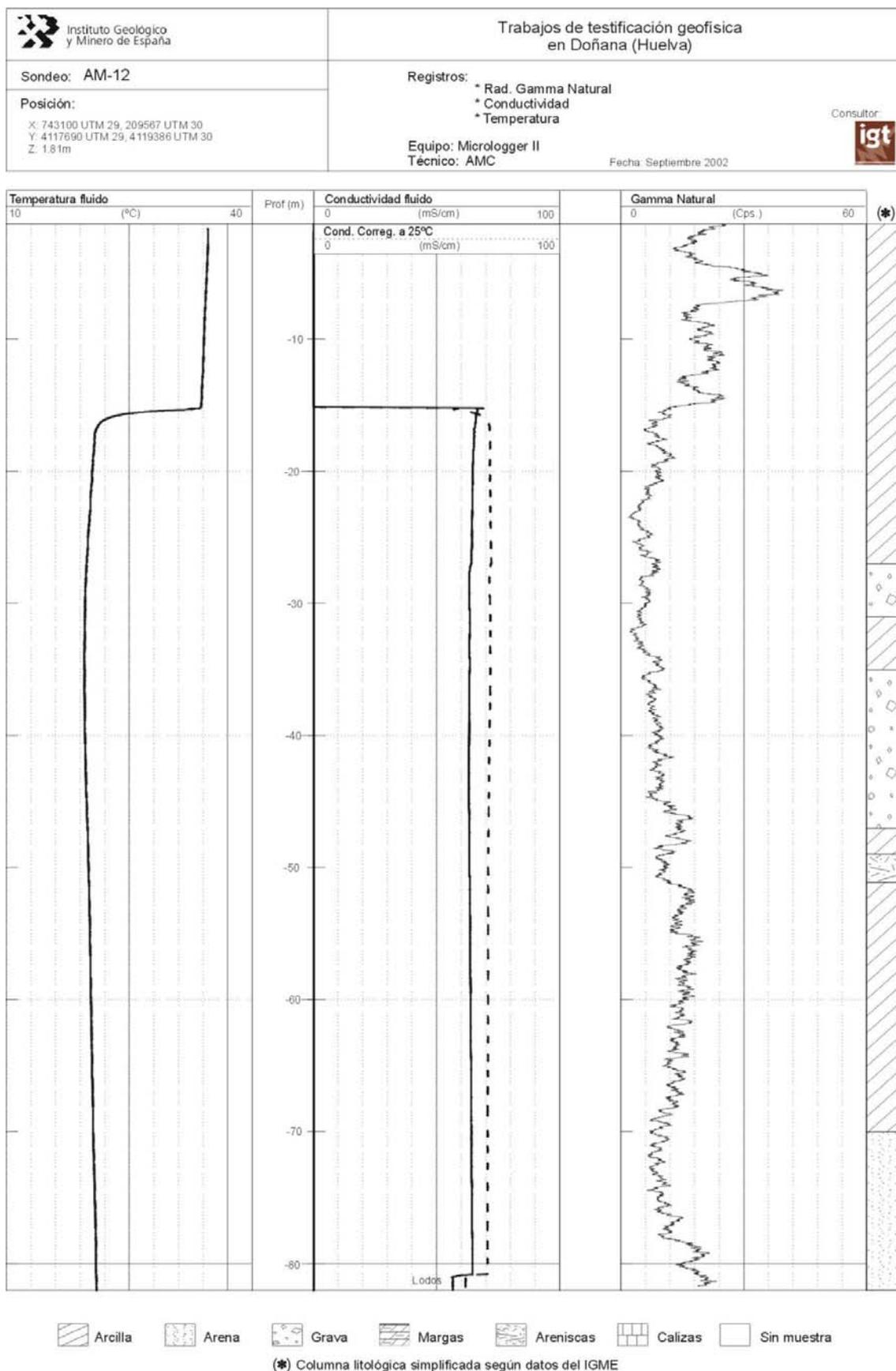
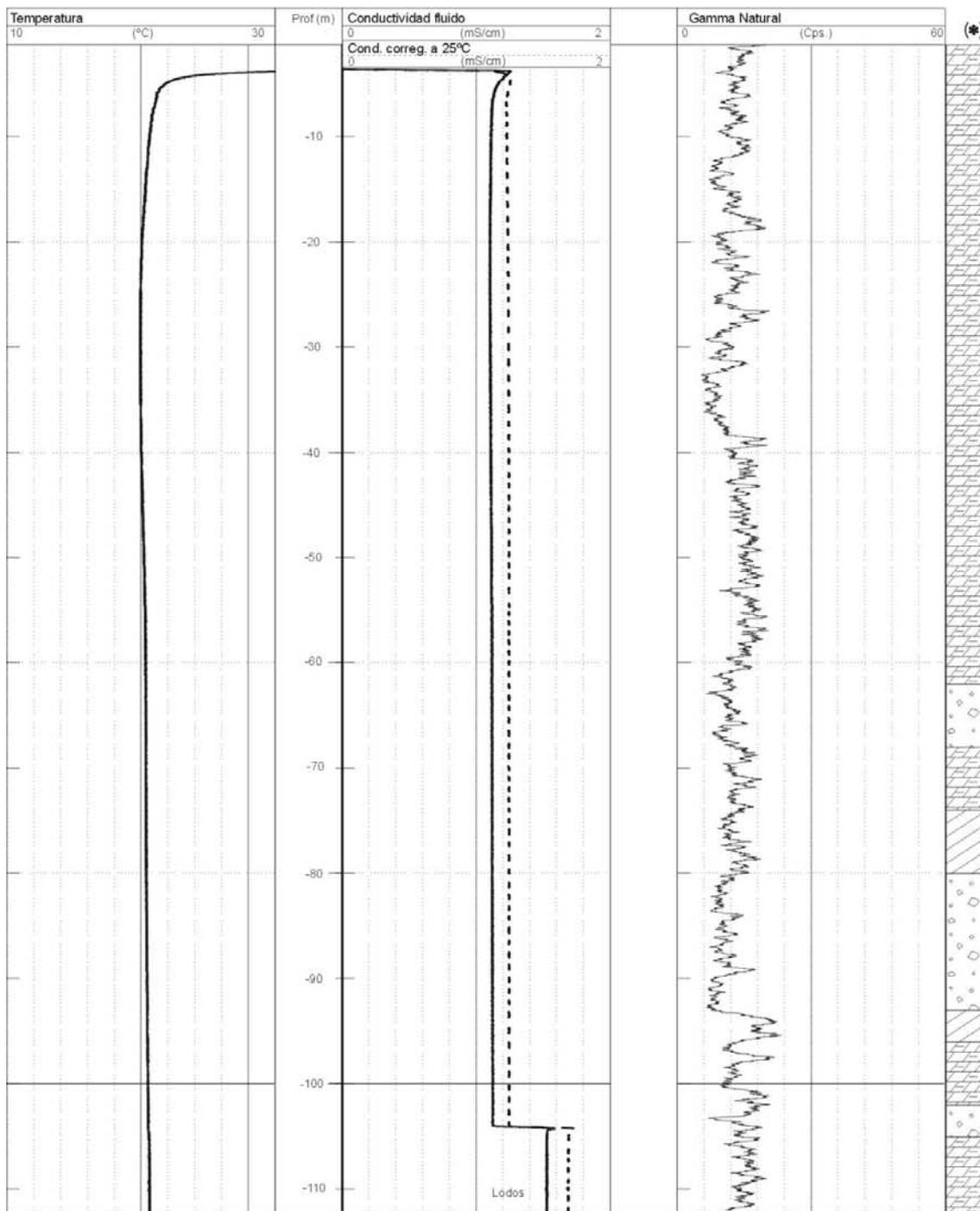


Fig. 184. Testificación en 2002 del sondeo AM-12

| | | | |
|--|--|--|---|
|  Instituto Geológico y Minero de España | | Trabajos de testificación geofísica en Doñana (Huelva) | |
| Sondeo: Lucio Mari López | | Registros: | * Rad. Gamma Natural * Conductividad * Temperatura |
| Posición: X: 203369 UTM 30 Y: 4102702 UTM 30 Z: 2.5m | | Equipo: Micrologger II Técnico: AMC | Consultor:  |
| | | Fecha: Septiembre 2002 | |





(*) Columna litológica simplificada según datos del IGME

Fig. 185. Testificación en 2002 del sondeo Lucio de Mari López

| | | | |
|---|--|--|--|
|  | | Trabajos de testificación geofísica en Doñana (Huelva) | |
| Sondeo: BG-8 | | Registros: <ul style="list-style-type: none"> * Rad. Gamma Natural * Conductividad * Temperatura | Consultor:  |
| Posición: X: 721457 UTM 29, 187504 UTM 30 Y: 4097405 UTM 29, 4100276 UTM 30 Z: 18.59m | | Equipo: Micrologger II Técnico: AMC | Fecha: Septiembre 2002 |

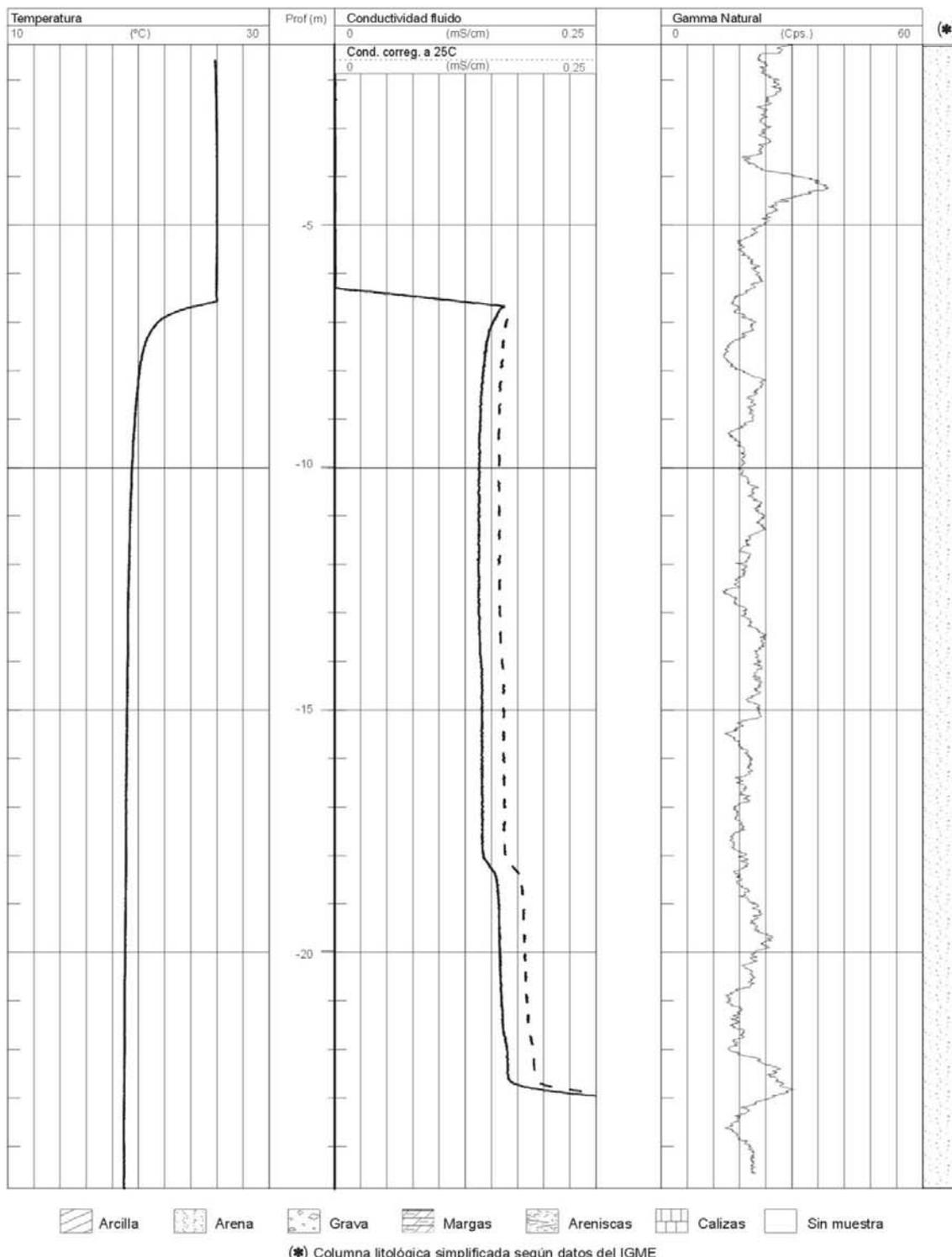
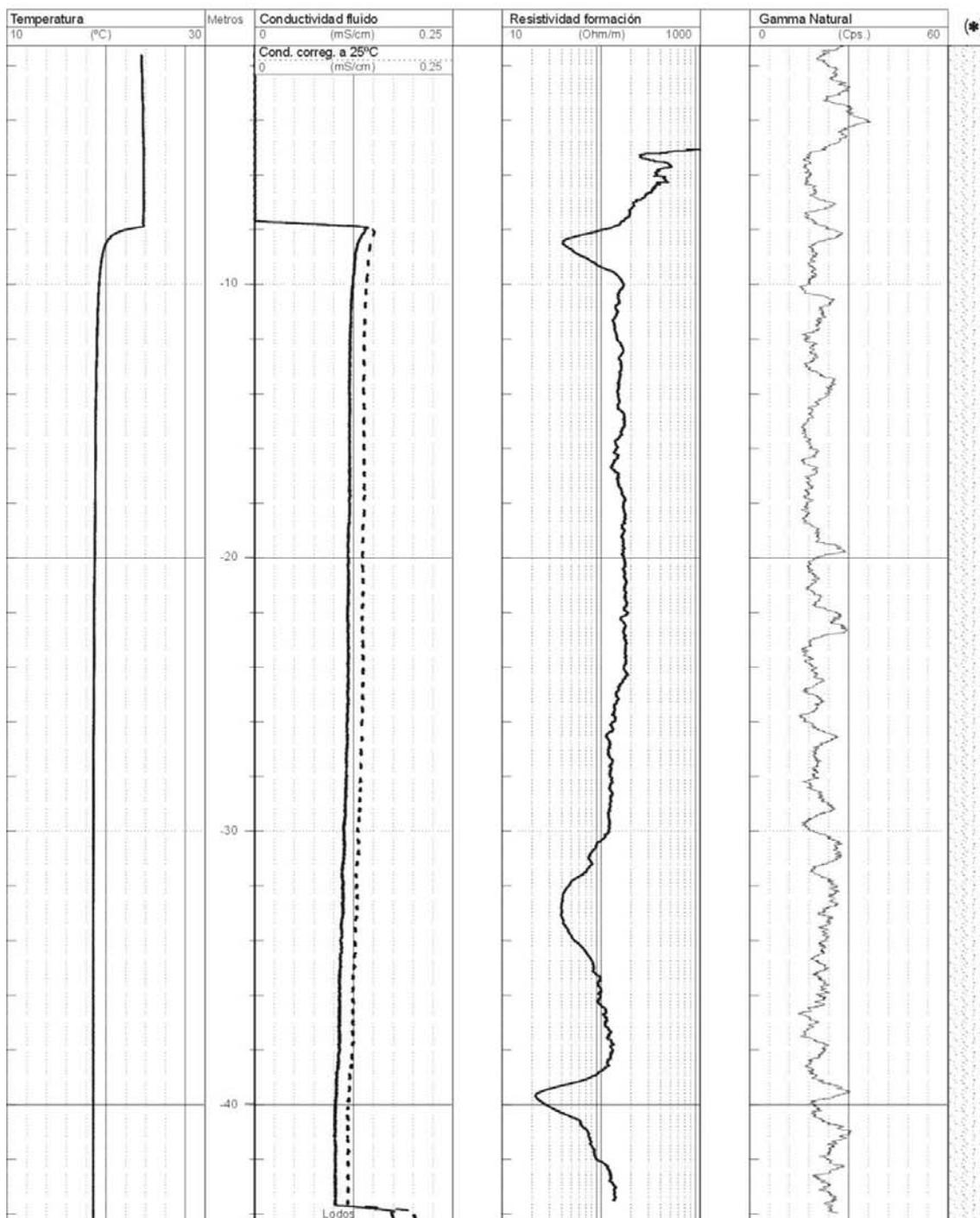


Fig. 186. Testificación en 2002 del sondeo BG-8

| | |
|--|--|
|  Instituto Geológico y Minero de España | Trabajos de testificación geofísica en Doñana (Huelva) |
| Sondeo: BG-8 Sur | Registros: * Rad. Gamma Natural * Conductividad * Temperatura * Resistividad formación (Inducción) |
| Posición: X: 721457 UTM 29, 187504 UTM 30 Y: 4097405 UTM 29, 4100278 UTM 30 Z: 18.59m | Equipo: Micrologger II Técnico: AMC |
| | Fecha: Septiembre 2002  |





(*) Columna litológica simplificada según datos del IGME

Fig. 187. Testificación en 2002 del sondeo BG-8(sur)

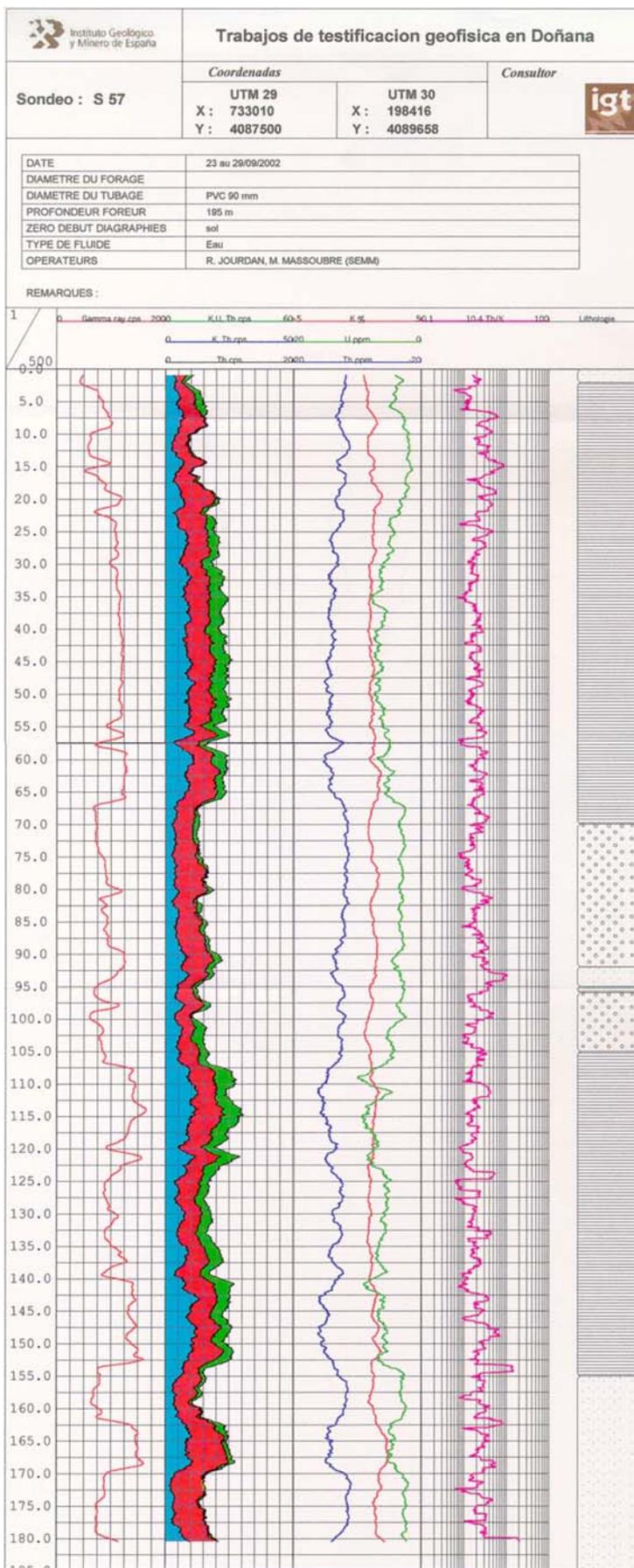


Fig. 188. Testificación en 2002 ; gamma espectral del sondeo S-57(Vetalengua)

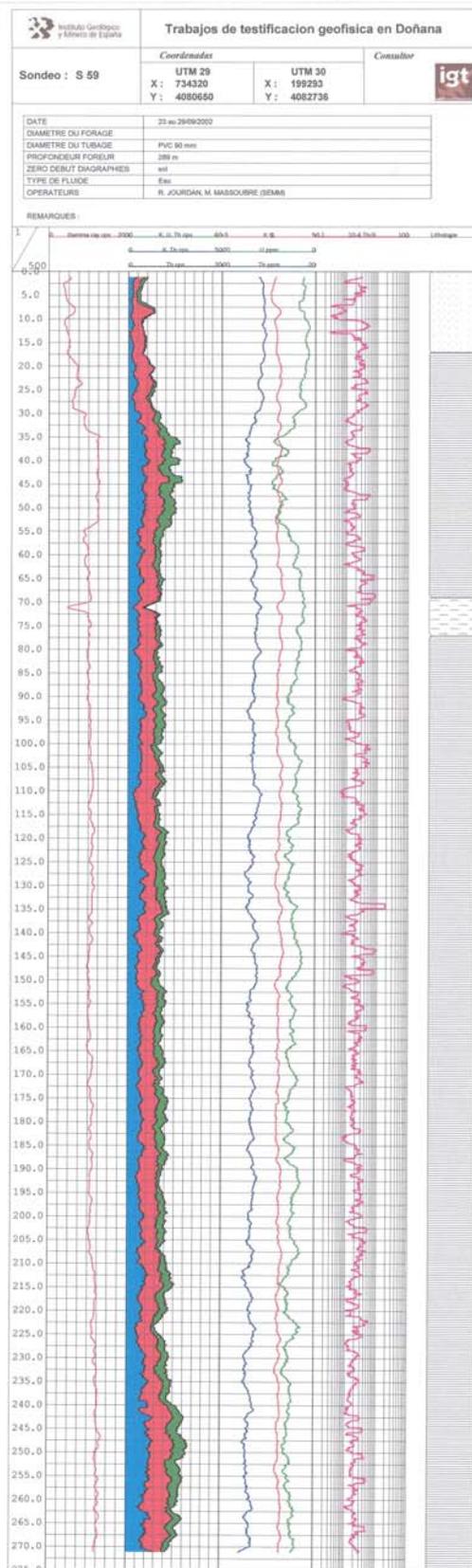


Fig. 189. Testificación en 2002 ; gamma espectral del sondeo S-59 (Palacio Marismillas)

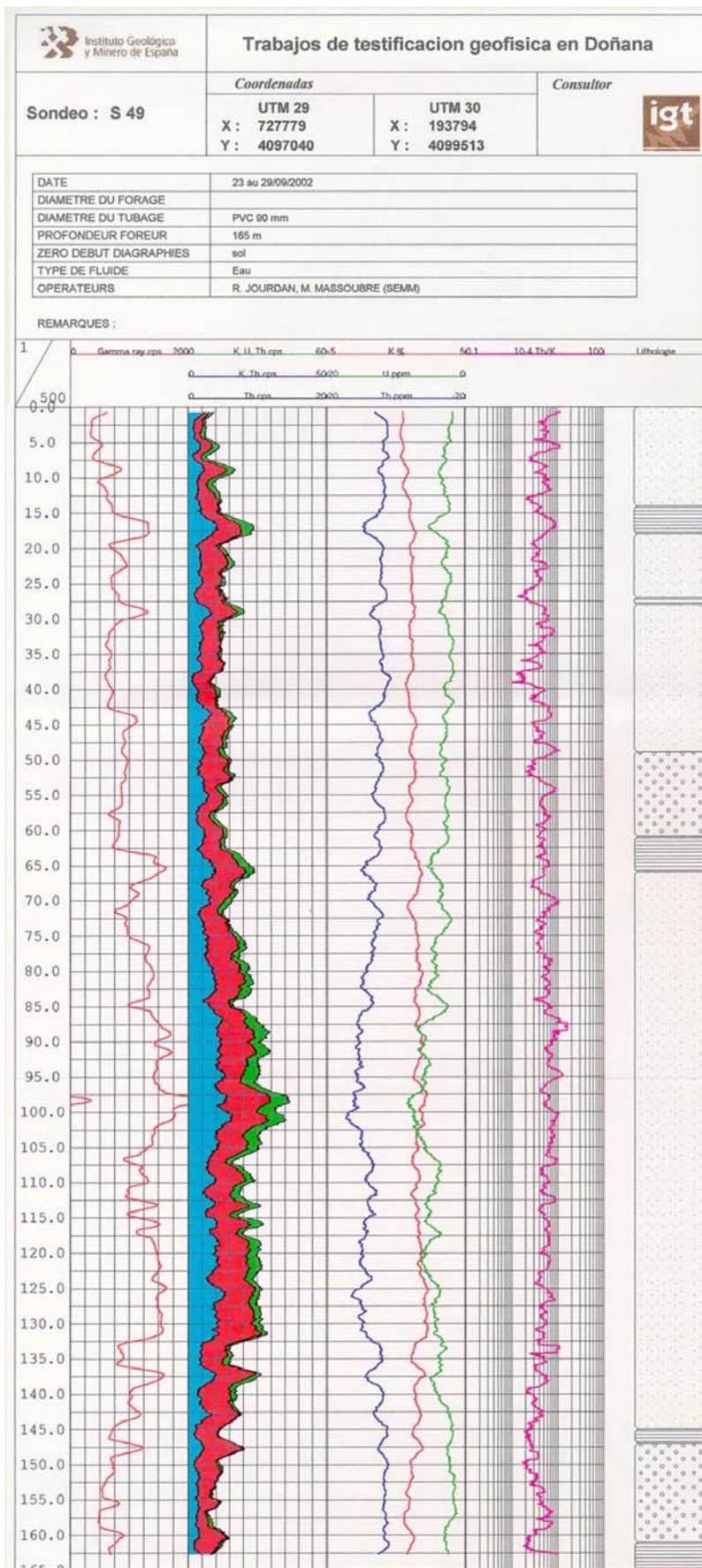


Fig. 190. Testificación en 2002 ; gamma espectral del sondeo S-49 (Palacio Doñana)

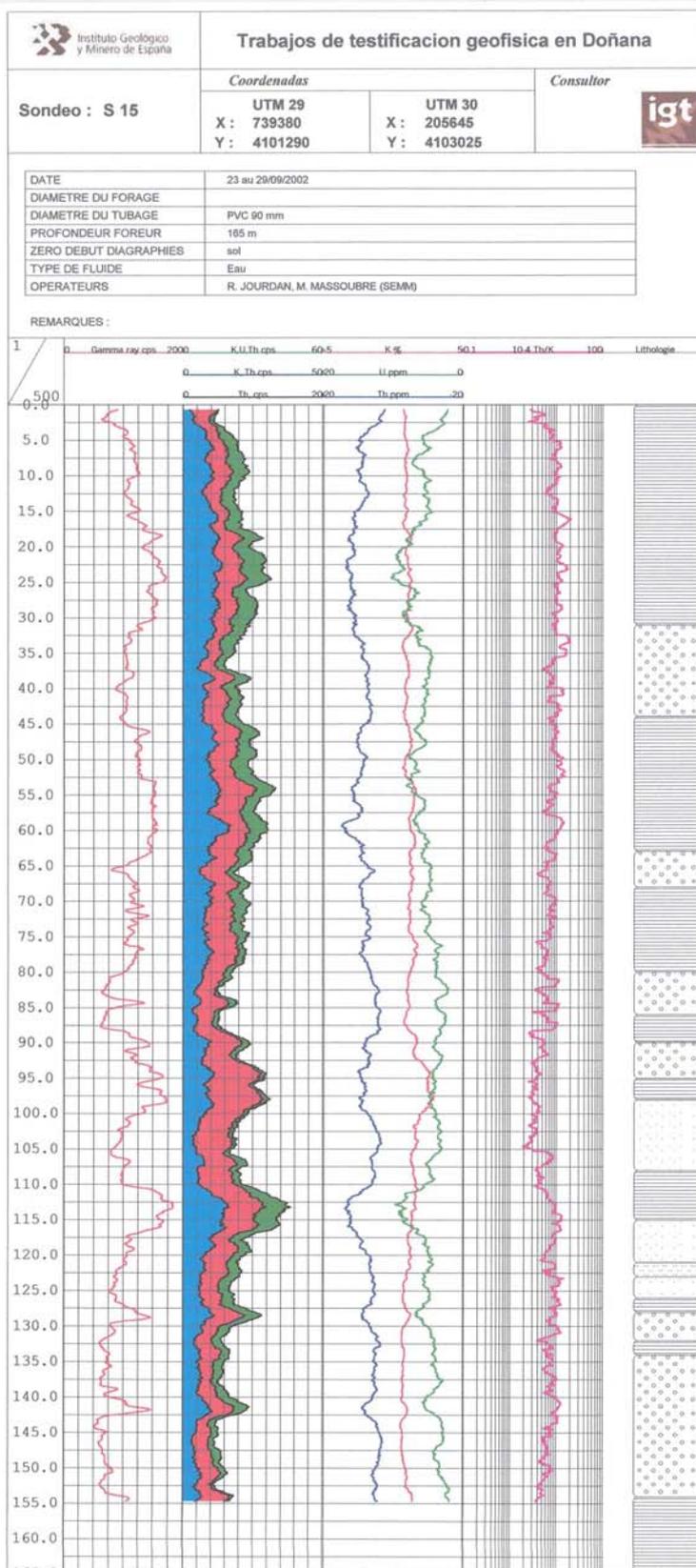


Fig. 191. Testificación en 2002 ; gamma espectral del sondeo S-15 (Caracoles)

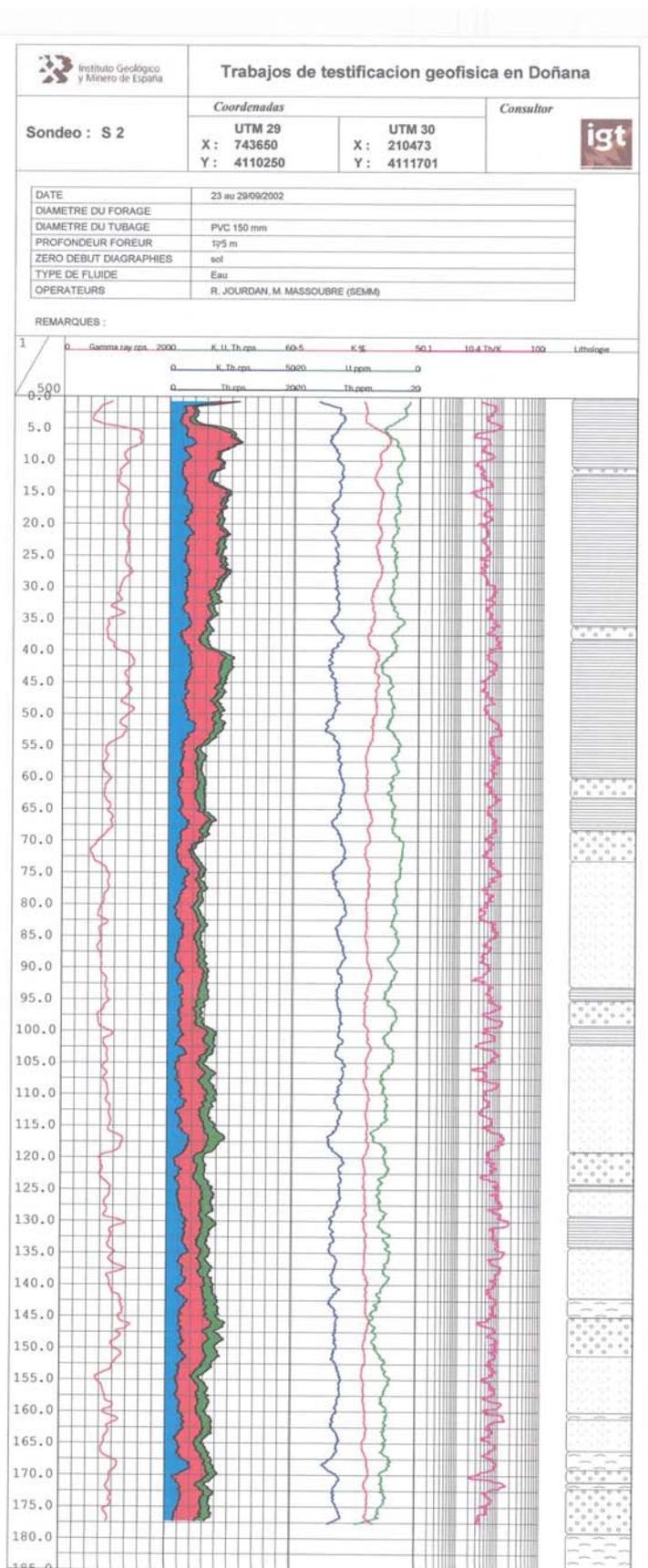


Fig. 192. Testificación en 2002 ; gamma espectral del sondeo S-2 (Casa Bombas)

IV.2.2.5 Ficheros de datos digitales

Todos los datos se encuentran recogidos en los correspondientes ficheros digitales en el Anexo Digital de este apartado:

Ficheros del registrador RG:

- gráficos: ficheros Corel Draw v 8.0 y/o ficheros JPG
- datos: ficheros ASCII (profundidad m, temperatura °C, conductividad fluido mS/cm, gamma natural cps, resistividad formación ohm.m)
- ficheros LAS (Cabecera estándar, profundidad m, temperatura °C, conductividad fluido mS/cm, gamma natural cps, resistividad formación ohm.m, conductividad fluido a 25°C mS/cm). Se proporcionan en dos versiones de este formato.
- ficheros Geometrics para los datos de DownHole en formato SEG-Y-2, identificados por el nombre del sondeo seguido de la profundidad del geófono más profundo registrado en ese dispositivo.

Ficheros de la sonda Gamma Espectral:

- Gráficos: en formato WellCad
- Datos: en ficheros ASCII, con los valores:
 - Profundidad m- gamma cps
 - Profundidad m- K, U, Th cps
 - Profundidad m- K, Th cps
 - Profundidad m- Th cps
 - Profundidad m- U ppm
 - Profundidad m- Th ppm
 - Profundidad m- U ppm
 - Profundidad m- K %
 - Profundidad m- Th/K

IV.2.2.6 Información proporcionada por los registros

La lectura más inmediata de los registros de gamma natural y resistividad de la formación es la siguiente:

- los niveles arcillosos se manifiestan por tener valores elevados (relativos) de GN y bajos de RI
- los niveles detríticos se manifiestan por tener valores bajos (relativos) de GN y altos de RI

Este modelo puede verse alterado por la presencia de agua salada en la formación, que proporcionará valores bajos de RI, aunque se trate de niveles detríticos. Así mismo, la presencia de limos y arcillas finas en los niveles detríticos hará que aumente en ellos la GN. Los registros efectuados de GN y RI son de buena calidad, pudiendo ser utilizados de forma fiable para esta discriminación litológica. La presencia de picos anómalos en los registros de RI es debida a la existencia de elementos metálicos en los sondeos (anillos de empalme entre entubación),

El registro de Conductividad del fluido aporta información de la salinidad del agua contenida en el interior de la entubación, que no tiene por qué corresponderse con el agua de formación a esa misma profundidad. Puesto que la conductividad es afectada por la temperatura, deben utilizarse los valores corregidos a una temperatura homogénea, de 25º C de forma estandarizada. No se ha llevado a cabo una calibración que permita una traslación rigurosa de valores de conductividad a concentración salina; los órdenes de magnitud son los siguientes:

| salubridad del agua | g/l ClNa | mS/cm 25º C |
|-----------------------|----------|-------------|
| fresca | 0,2 | < 1 |
| moderadamente fresca | 0,5 | 1 |
| débilmente fresca | 1,3 | 2.7 |
| moderadamente salubre | 3,3 | 6.2 |
| salubre | 7 | 4.7 |
| muy salubre | 12 | 24.3 |
| salmuera | 20 | 41.3 |
| marina | 30 | 64 |

Los registros de temperatura, además de servir para corregir los valores de conductividad del fluido, pueden informar de las zonas de posibles entradas de agua en el sondeo, siempre que éstas sean capaces de manifestarse como una anomalía de temperatura a través de la entubación.

La obtención de velocidades ha dejado entrever la alternancia de capas de baja velocidad, lo que permitirá su identificación como reflectores netos en las secciones sísmicas de reflexión, así como la conversión a profundidad de los tiempos de llegada registrados en dichas secciones.

Varios de los sondeos que han sido testificados en esta campaña ya lo habían sido anteriormente, según se ha visto en el apartado anterior IV.2.1 de Antecedentes. El siguiente cuadro recoge dichas testificaciones:

| sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof | FECHA | C/T | GN | OTROS | Organismo |
|--------------|------------|---------------------------|-------|-----------|-----|----|--------------|---------------------------|
| AM-12 | 114170138 | Partido Resina | 152 | | X | | | CGS, informe 35963 |
| AM-3 | 114220017 | Sector AM, Almonte-Marism | 108 | | X | | | CGS, informe 35963 |
| BG-8 | 114310005 | Charco del Toro | 300 | 1968 | | | PS,R | INFORM. PRAKLA 35559 |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 15-Mar-99 | X | | | UPC |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 24-Nov-00 | X | | | UPC |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 11-Jun-96 | X | | | UPC |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 1993 | X | X | | CGS MS |
| C2-S2 | 114240021 | Casa Bombas | 185 | 1994 | X | X | | informe 35963 |
| C2-S2 | 114240021 | Casa Bombas | 185 | | X | X | | CGS |
| C2-S2 | 114240021 | Casa Bombas | 185 | 13-Jun-96 | X | | | UPC |
| M-1-1 | 114220013 | Sector M, Almonte-Marism | 148,9 | 1994 | X | X | | CGS, informe 35963 |
| M-1-1 | 114220013 | Sector M, Almonte-Marism | 148,9 | 1-Sep-93 | X | | | E. ROMERO (teXs doctoral) |
| MARISM59-C24 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 6-May-97 | X | | | UPC |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 21-Oct-99 | X | | | UPC |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 1-Mar-00 | X | | | UPC |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 6-May-97 | X | | | UPC |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 21-Oct-99 | X | | | UPC |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 1999 | X | X | | CGS? |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 6-May-97 | X | | | UPC |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 1-Mar-00 | X | | | UPC |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 1-Mar-00 | X | | | UPC |
| VETA57 | 114360018 | Vetalengua | 190 | 21-Oct-99 | X | | | UPC |
| MARILOPEZ | | Lucio Mari Lopez | 156 | 08-abr-00 | X | X | PS, R64, R16 | ? |

A continuación se van a analizar los registros efectuados para discriminación litológica, es decir los de resistividad de la formación, gamma natural y gamma espectral, teniendo en cuenta los valores de conductividad del fluido, por su influencia en la resistividad de la formación. Los resultados de las testificaciones de temperatura y conductividad del fluido serán comentados en un apartado posterior, sobre la determinación de la interfase agua dulce – agua salada.

IV.2.2.7 Comentarios sobre la interpretación de las diagráfias de GN,RI

A fin de determinar la posibilidad de utilizar los métodos geoléctricos de superficie en la resolución de los temas estratigráficos planteados, se van a analizar alguno de los registros efectuados. Excepto el sondeo BG-8 y Lucio de Mari López, que fueron anteriormente testificados a pozo descubierto midiéndose la resistividad de la formación, el resto lo fueron solamente de la temperatura y conductividad del fluido, junto con la radiación gamma natural en algunos casos. Precisamente, uno de los principales objetivos de esta nueva campaña es el de disponer de valores de la resistividad de las formaciones, como apoyo a la interpretación de las campañas geoléctricas de superficie.

Para el sondeo BG-8 (Figura 186 y 187), del registro efectuado en 1968 se pudo determinar que la resistencia monoelectrónica es de 3.6-4.3 ohm en las arenas y 0.25-0.1 ohm en las arcillas, y que por la buena correlación entre las oscilaciones del registro de PS con el de R, puede deducirse que en principio los valores de resistencia no están afectados por agua salada. En los datos tomados actualmente (2002) el agua tiene una conductividad constante de unos 0.13 mS/cm, por lo que, en efecto, puede afirmarse que se trata de agua dulce, no resultando afectados los valores de resistividad de la formación. De la sonda de inducción se deduce que las intercalaciones de arcillas presentan una resistividad entre 20 y 40 ohm.m, mientras que las arenas limpias llegan a los 180 ohm.m.

Respecto del **sondeo Lucio de Mari López** (Figura 185), aunque no existe la certeza de que se trate del mismo sondeo testificado en 1999, la conductividad del agua (no identificable en los registros de 1999) es de 1.2 mS/cm, es decir, de agua que puede tener más de 0.5 g/l de ClNa, por lo que puede afectar algo a los valores de resistividad de la formación, que en 1999 se situaban en las arcillas entorno a los 15 ohm.m, pasando a 45 ohm.m en los tramos potentes de cantos rodados o gravas.

En el sondeo **S-49 Palacio de Doñana** (Figura 176 y 193) la litología predominante son las arenas, con alguna intercalación de arcilla y gravas. En función de los registros de conductividad anteriormente medidos se supone que los niveles de arenas y arcillas más someros contienen agua con mayor concentración de sal que las arenas y gravas inferiores, donde el agua es la de recarga y dulce. Se dedujo que en la parte superior existen algunos puntos donde, posiblemente por imperfección en la entubación, el agua penetra en la columna del sondeo entre los 12 y los 45 m, con flujo vertical descendente entre esos puntos. El agua dulce que penetra por la rejilla (a los 150-158 m), dada la forma del registro de conductividad, parece estar diluyendo el agua de la entubación, lo que supondría un flujo ascendente. El registro actual de temperatura y conductividad pone de manifiesto que no parecen existir las aportaciones superiores, sino que a los 45 m hay un cambio neto de salinidad que, en efecto va gradualmente disminuyendo hasta llegar a la zona de filtros, donde debe penetrar el agua dulce contenida en el paquete de gravas. El registro de gamma natural indica claramente las capas de arcillas ya conocidas, añadiendo la información de que el paquete inferior de arenas, entre los 65 m y 145 m es más arcilloso que el superior, conteniendo además algunas zonas donde la arena es casi inexistente.

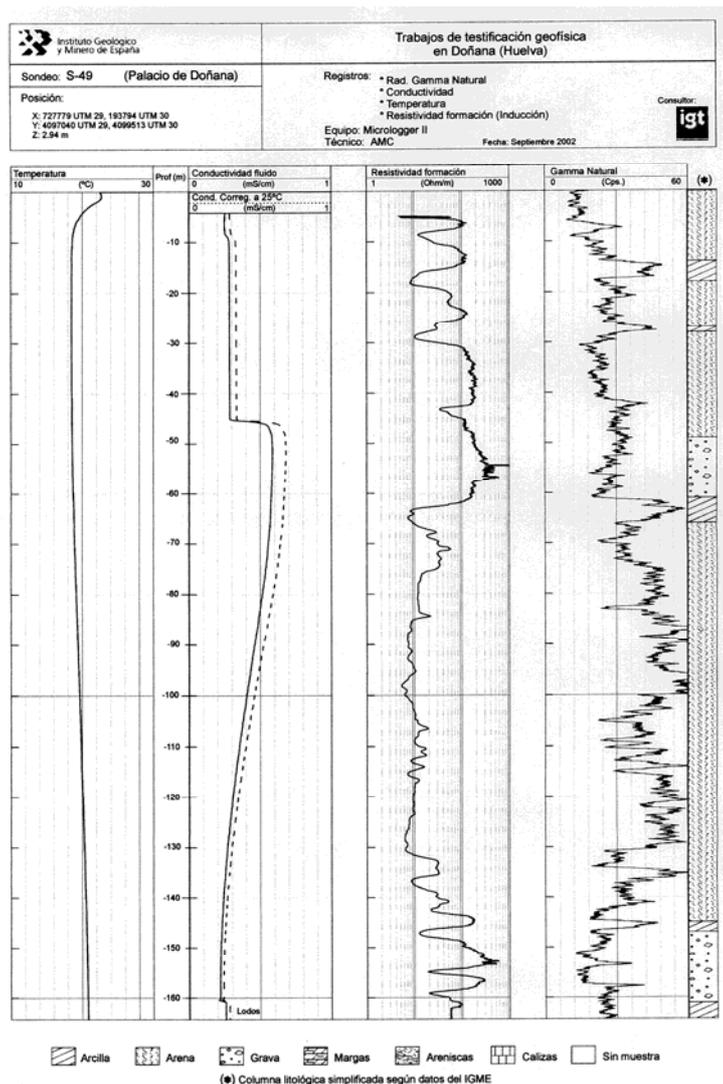


Fig. 193 . Testificación del sondeo S-49

La mayor novedad de esta testificación es la información proporcionada por el registro de resistividad de la formación: existe una clara diferencia entre las arenas situadas por encima de los 60 m (con resistividad entre 100 y 300 ohm.m) y por debajo (entorno a 10 ohm.m), donde estas arenas deben tener un gran contenido en arcilla, creciendo considerablemente la radiación gamma, e identificándose las zonas donde el contenido en arcillas es netamente predominante, por el aumento de la relación Th/K y de la velocidad sísmica. Se detectan claramente los paquetes de gravas por el aumento de la resistividad, con independencia de que el agua contenida sea dulce o salada. Es decir, el factor que controla fundamentalmente la resistividad de la formación en este sondeo no es, aparentemente, la salinidad del agua (que con un máximo de 0.7 mS/cm, correspondería a aguas con menos de 0.5 g/l de ClNa), sino el contenido en arcillas.

En zonas de ambiente más conductor, como en el sondeo **S-57 Vetalegua**, la litología predominante son las arcillas, con intercalaciones de arenas y gravas (Figura 174 y 194). La conductividad del fluido en este caso es de 15 mS/cm a los 24 m, pasando a más de 20 mS/cm a partir de los 50 m, manteniéndose estable hasta el final del sondeo; se trata por lo tanto de aguas muy saladas en toda la columna (concentraciones superiores a 10 g/l de ClNa). En el primer tramo de arcillas se destaca una capa de arenas, no cartografiada anteriormente, entre 10 y 25 m, claramente identificada tanto por la disminución de la radiación gamma natural, como por el aumento de la resistividad; la posibilidad de que fuera un efecto relativo producido por la disminución de resistividad a partir de los 25 m, provocada por la mayor salinidad del agua de formación, puede descartarse por la información aportada por el registro de gamma espectral, que indica una presencia prácticamente nula de U en esta capa resistiva.

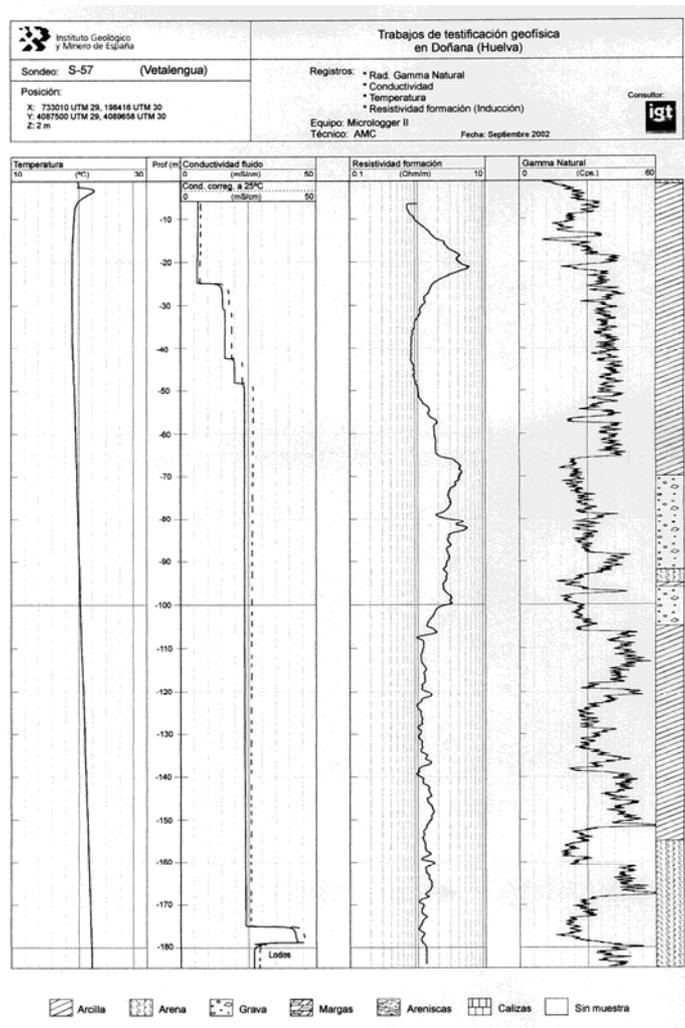


Fig. 194. Testificación del sondeo S-57

Pasado este tramo, las arcillas se manifiestan con una resistividad del orden de 1 ohm.m, mientras que en la zona del S-49 se situaban en los 10 ohm.m; esto es posiblemente debido a la influencia de la mayor salinidad en esta zona. En efecto, el paquete de gravas y arenas situado entre los 70 m y los 100 m se identifica claramente tanto en el registro de gamma natural como en el de resistividad, pero

ésta no pasa de 8 ohm.m, mientras que en el Palacio de Doñana las arenas superaban los 100 ohm.m. Por debajo de los 100 m, el registro gamma natural indica la presencia de tramos más arenosos, y marca bien el paso a las arenas inferiores, donde de nuevo se detecta una capa de arcillas no cartografiada anteriormente: mientras que estas alternancias son confirmadas por la información de la gamma espectral, no es así por el registro de resistividad de la formación, que discurre entre 1 y 2 ohm.m; por lo tanto, en estas situaciones de mayor conductividad, debido a la litología existente junto con la presencia de agua salada, no será posible la utilización de métodos geoelectrónicos para discriminaciones litológicas.

En el sondeo **Feder-4** (Figura 179 y 195), hasta los 30 m de profundidad, el crecimiento gradual de la resistividad junto con el decrecimiento igualmente gradual de la radiación gamma indica la transición de unas arcillas limpias en superficie y arenosas según aumenta la profundidad. Hasta los 95 m, la correlación entre los registros gamma natural y resistividad es buena, permitiendo matizar bien la existencia de tramos de arcilla dentro de las arenas, que tienen resistividad del orden de 10-20 ohm.m, lo que indica la influencia del agua salada que contienen (13 mS/cm). A partir de los 95 m se produce una disminución gradual de la resistividad, no acompañada por aumento de la radiación gamma, que sigue marcando muy bien la presencia de tramos arcillosos, prácticamente no reflejados en variaciones de resistividad; en este caso, la variación de la resistividad se debe al aumento de la salinidad del agua, como muestra el registro de conductividad, llegándose a valores de hasta 26 mS/cm, lo que impide utilizar la resistividad como valor discriminante de litología.

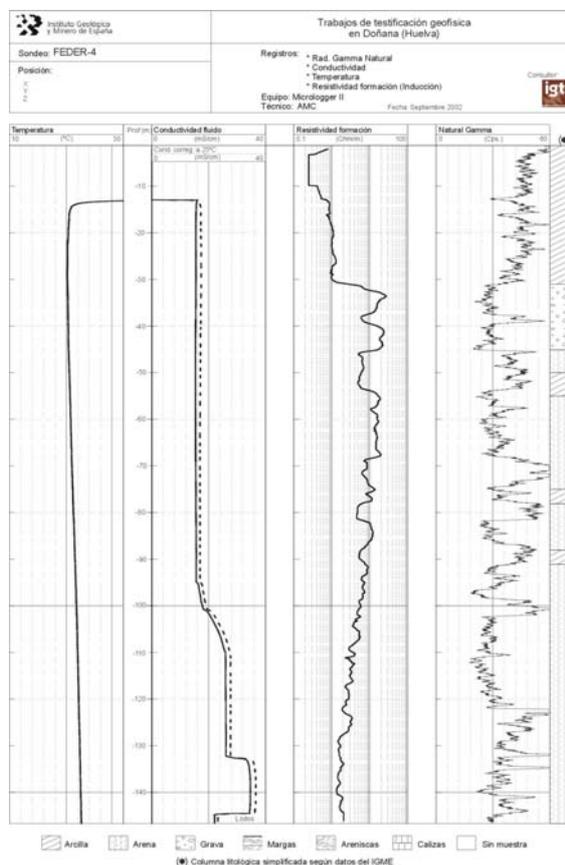


Fig. 195. Testificación del sondeo Feder-4

De la información analizada en estos tres sondeos (S-47, S-59 y Feder-4), se deduce (Figura 196) que las variaciones litológicas pueden ser identificadas por variaciones de resistividad de la formación, siempre que el agua contenida en ésta tenga valores de conductividad inferiores a 15 mS/cm; para valores superiores, la salinidad es el factor que controla los registros de resistividad de las rocas, no permitiendo establecer diferenciaciones litológicas claramente existentes en los registros de gamma natural y espectral.

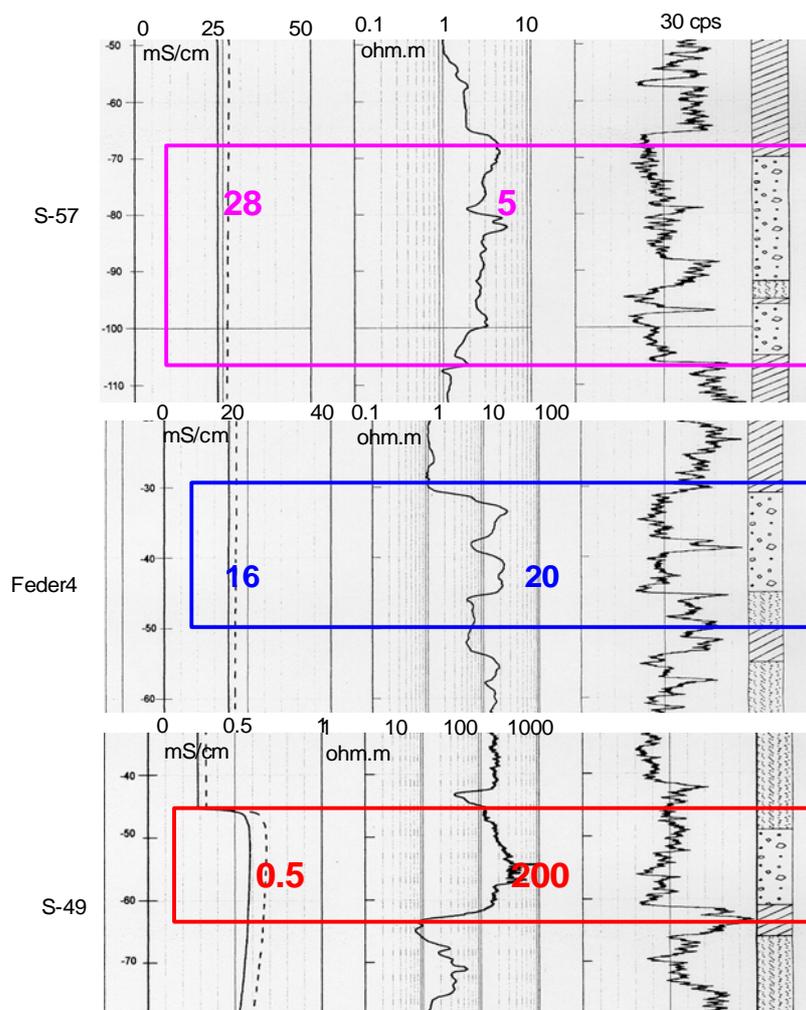


Fig. 196. Diferente correlación entre gamma natural y resistividad según la salinidad de agua

IV.2.2.8 Comentarios sobre la interpretación de las diagráfias de GE

Los registros y valores representados de Gamma Espectral pueden aportar información fundamental sobre la composición y origen de las rocas, así como permitir establecer correlaciones entre sondeos con mayor fiabilidad. Este último aspecto no se puede llevar a cabo con los registros efectuados, no sólo por la distancia entre sondeos, sino por la gran variación estratigráfica lateral a que da lugar una secuencia deposicional deltaica. Las variaciones en el contenido de Th, U y K informan sobre los cambios de facies de las formaciones arcillosas.

Para el **sondeo S-2, Casa Bombas** (Figura 192), la relación Th/K, indicador del cambio de facies, apenas varía a lo largo del registro, permaneciendo en valores medios. De 0 a 55 m hay una arcillosidad importante, con bajo contenido en U y una presencia de K proporcionalmente importante, que varía poco a lo largo del sondeo.

En el **S-15, Los Caracoles** (Figura 191), de 0 a 10 m el contenido en arcilla va aumentando paulatinamente, disminuyendo el contenido en arena. Se aprecia un contenido relativamente importante de U hasta los 80 m. El índice Th/K permanece constante hasta los 52.5 m, disminuyendo posteriormente hasta los 105 m, desde donde vuelve a aumentar, alcanzando valores superiores a los del primer tramo. Entre los 112.5-117.5, a 127.5 y a 142 m se aprecian aumentos bruscos importantes de la radiactividad total, significando pasadas de arcilla de distinta naturaleza.

En la parte superior del sondeo **S-49, Palacio de Doñana** (Figura 190), hasta los 62 m, se observan, cómo en el S-15, varios picos en la curva de gamma natural (a 8, 17.5, 27.5 m) que evidencian una alternancia de formaciones de naturaleza diferente. En esta zona, la fase de U es muy débil. A los 62.5 m se produce un cambio de facies con una arcillosidad más importante. De 85 a 106 m aumenta notablemente los contenidos de U y Th, acompañada por un aumento de la relación Th/K. A partir de los 132.5 m disminuye el contenido en arcilla, indicado principalmente por la casi desaparición del U.

En el sondeo **S-57, Vetalegua** (Figura 188), de 25 a 65 m existe un contenido elevado en U, con una bajada muy significativa a los 57.5, debida a la disminución del Th. De los 65 a los 107 m disminuye fuertemente el contenido en U, y de ahí al final del sondeo tienen lugar numerosas fluctuaciones del valor de gamma natural, correspondientes a cambios de facies, como indican las fluctuaciones de la relación Th/K (la columna litológica disponible no presenta dichos cambios). A partir de los 155 m se produce la casi desaparición del U.

Finalmente, en el sondeo **S-59, Palacio Marismillas** (Figura 189), la arcillosidad también comienza aumentado poco a poco, hasta los 30 m; posteriormente, hasta los 53 m existe una zona con alto contenido en arcilla, con fases de U y Th bien representadas. A partir de los 70 m los valores de gamma natural permanecen prácticamente constantes, mientras que la relación Th/K presenta fluctuaciones notables, sobre todo en el intervalo 130-165 m, indicando que existen cambios de facies en las arcillas. A partir de los 210 m aumenta ligeramente la arcillosidad.

En consecuencia, los registros de gamma espectral manifiestan claramente la diferente composición de los tramos arcillosos y/o arenosos, lo que una vez unido al establecimiento de una secuencia estratigráfica permitirá establecer criterios sedimentológicos basados en datos geofísicos.

IV.2.3 Campaña de testificación de 2005

[Síntesis y adaptación del Informe presentado por AGS, Anexo IV-2-b]

IV.2.3.1 Selección de sondeos a testificar en la campaña de 2005

Los trabajos de campo previstos en el presente Proyecto han ido sufriendo una evolución, fruto del desarrollo del mismo. Por una parte, una vez concluido el análisis de los datos disponibles se ha elaborado un mapa del sustrato impermeable (capítulo III.2 del presente Informe), cuya profundidad y morfología ha abierto nuevas líneas de trabajo sobre las inicialmente previstas, dado que supone la existencia de más de mil metros de sedimentos en zonas donde se pensaba que tan sólo existían un par de centenares. Por otra parte, los nuevos planteamientos que otros grupos han venido realizando sobre la geología del acuífero de Doñana (apartado III.3.6.1 “Síntesis geológica de partida”), estableciendo redefiniciones de la estratigrafía de la zona, han ido perfilando que la estratigrafía secuencial se revela como la única herramienta útil para resolver parte de los problemas planteados. De esta forma, los trabajos de campo previstos se han reconsiderado y se ha planificado una nueva campaña de testificación geofísica de sondeos de mayor cobertura que la anteriormente realizada, utilizando como parámetros fundamentales a medir la resistividad de la formación y la radiación gamma natural (la utilización de los registros de gamma espectral se ha descartado, por resultar en estos momentos cinco veces más cara que la gamma natural).

La selección de los sondeos se ha hecho buscando la mejor adaptación a perfiles geológicos ya interpretados según la nueva idea de secuencia estratigráfica, a fin de evaluar la contribución que la testificación geofísica puede hacer a este análisis. Por una parte, estos registros podrán utilizarse para una mejor definición de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos, según se ha establecido en la campaña de 2002; por otra, los registros de gamma natural se pretende que sean interpretados en términos de análisis secuencial: identificación de secuencias granocrecientes y granodecrescentes.

En las Figuras 197 y 199 se indica la posición de los sondeos inicialmente seleccionados, con su denominación numérica y toponímica.

En estos mismos sondeos estaba previsto efectuar también mediciones de conductividad y temperatura. Estos registros no han podido ser realizados de forma adecuada, debido a incidencias durante la campaña y por averías en la instrumentación que serán comentadas en mayor detalle posteriormente. A fin de completar el crédito establecido para su ejecución, la selección de sondeos finalmente efectuados con los parámetros de resistividad de la formación y gamma natural es superior a la planificada.

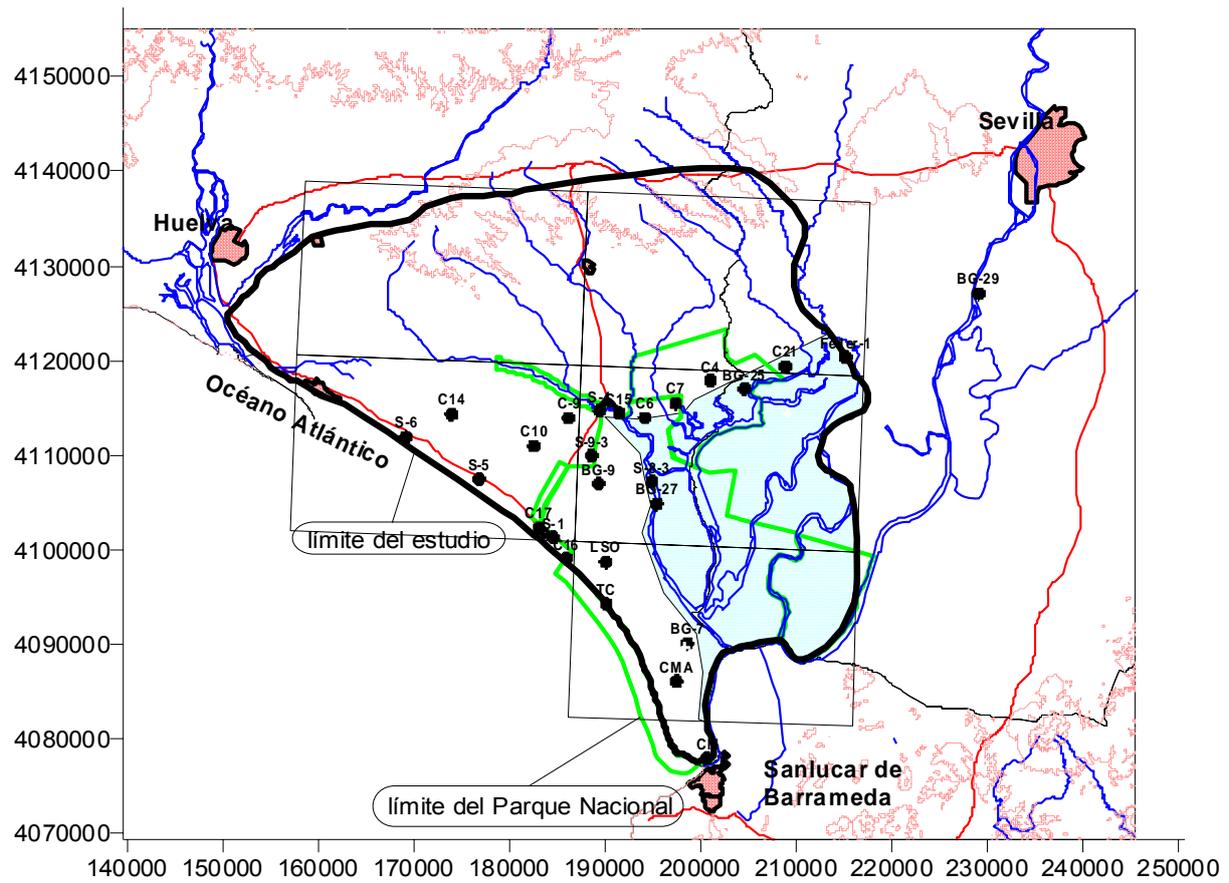


Fig. 197. Situación de los sondeos seleccionados para su testificación en la campaña de 2005 (denominación numérica).

IV.2.3.2 Sondeos testificados en la campaña de 2005

La relación final de sondeos propuestos y ejecutados (2630 m) se indica en el siguiente cuadro:

| nº reg. IGME | sondeo | toponimia | prof. prof. | prof. entub | diám PVC | Prof. Testif | observaciones |
|--------------|----------|---------------------------------|----------------|----------------|-------------|--------------|----------------------------|
| 104220020 | SGOP6-S3 | Medano de Loro (z.militar) | 98 | 88 | 113 | | Tubería hierro hasta 70m |
| 104270009 | SGOP5-S4 | Ctra. Mazagón km 38 (Asperillo) | 121 | 115 | 103 | 111,25 | Tubería hierro hasta 101m |
| 104280052 | C17-S41 | Guardia Civil Matalascañas | 153 | 138 | 150 | 133,75 | |
| 104280039 | SGOP1-S4 | Ctra. Norte Matalascañas | 160 | 146 | 113 | | tiene aceite |
| 104280043 | C16-S40 | Hotel El Coto, Matalasc. | 150 | 123 | 150 | | no existe |
| 114310037 | LSO | Laguna de Sta. Olalla | 319 | 99 | 80 | 96,35 | |
| 114310041 | TC | Torre Carbonero | 229 | 176 | 50 | 165,70 | |
| 114360024 | CMA-3 | Corral de la Marta | 290 | 160 | 50 | 156,40 | |
| 114420047 | CM-B | Cuartel Malandar | 142 | 62 | 50 | 50,60 | |
| 104230011 | C14-S32 | El Abalarío | 108 | 94 | 150 | 92,00 | |
| 104240120 | C10-S24 | El Alamillo | 130 | 118 | 150 | 117,40 | |
| 104240114 | C9-S18 | Los Mimbrales | 130 | 90 | 150 | 88,50 | |
| 114210143 | SGOP4-S3 | Arroyo Rocina (Canariega) | 101 | 98 | 113 | | Tubería hierro hasta 49,5m |
| 114210160 | C15-S37 | Depuradora El Rocio | 117 | 98 | 150 | 96,60 | |
| 114210156 | C6-S12 | Pichiricha o Matasgordas | 120 | 112 | 150 | 111,51 | |
| 114220050 | C7-S13 | El Raposo | 100 | 92 | 150 | 91,30 | |
| 114220047 | C4-S5 | La Juncosilla o Portachuelo | 68 | 64 | 150 | 64,20 | |
| 114170140 | C21-S54 | Partido Resina | 107 | 75 | 150 | 74,80 | |
| 114180118 | Feder-1 | Casa Nieves | 153 | 66 | 80 | | |
| 114250015 | SGOP8-S3 | Don Ignacio | 62 | 61 | 103 | | Tubería hierro hasta 35m |
| 104280066 | SGOP9-S3 | Pequeña Holanda | 81 | 80 | 103 | | Tubería hierro hasta 62m |
| 114360018 | VETA57 | Vetalengua | 195 | 190 | 150 | 180,62 | |
| 114180096 | C1-S1 | El Pescante | 152 | 144 | 150 | 141,80 | |
| 104280051 | SGOP2-S4 | Matalascañas Sulfasaurus | 150 | 146 | 103 | 137,80 | Tubería hierro hasta 105m |
| 114250011 | C8-S16 | La Moglea | 94 | 80 | 150 | 78,40 | |
| 124150021 | | La Marmoleja 2 | 120? | 123 | 80 | 87,50 | |
| 114180118 | | Feder 1 Bis | 73 | 69 | 80 | 68,00 | |
| 114210139 | | Rocina Nº 4 | 95 | 95 | 100 | 87,50 | |
| 114210137 | | Rocina Nº 3 | 95 | 95 | 100 | 88,00 | |
| 114160018 | C3-S3 | Laguna de la Anguila 1 | 66 | 64 | 150 | 63,50 | |
| 114210157 | C13-S30 | Sector III-1 | 54 | 43 | 150 | 41,00 | |
| 104170010 | C11-S25 | Cabezudos 1 | 72 | 58 | 150 | 58,00 | |
| 104180031 | C20-S46 | Arroyo Cañada 1 | 67 | 48 | 150 | 45,00 | |
| 104170014 | C18-S44 | Bodegones 1 | 58 | 38 | 150 | 38,00 | |
| 114210136 | | Hatovilla (Parcela III) | 40,4 | 34 | 110 | 33,50 | |
| 124120064 | | El Sequero | 159? | 30 | 80 | 30,50 | |

Los trabajos han sido efectuados en abril-mayo y diciembre de 2005, mediante contrato de asistencia técnica con la compañía de servicios geofísicos Análisis y Gestión del Subsuelo AGS. El informe efectuado por esta compañía constituye el Anexo IV-2- b. En el cuadro anterior se especifica aquellos sondeos que por diversas razones no pudieron ser testificados (normalmente por tener tubería de hierro), y que fueron sustituidos por otros. La posición se indica en la Figura 198, y sus coordenadas están en el cuadro siguiente:

| nº reg. IGME | sondeo | toponimia | realización | UTM: X(30) | UTM: Y(30) | cota (m) | nivel piezom |
|--------------|----------|---------------------------------|-------------|------------|------------|----------|--------------|
| 104220020 | SGOP6-S3 | Medano de Loro (z.militar) | SGOP | 169202 | 4111924 | 38,76 | |
| 104270009 | SGOP5-S4 | Ctra. Mazagón km 38 (Asperillo) | SGOP | 176854 | 4107479 | 32,23 | 6,48 |
| 104280052 | C17-S41 | Guardia Civil Matalascañas | CGS | 183137 | 4102360 | 19,97 | 16 |
| 114310037 | LSO | Laguna de Sta. Olalla | IGME | 190119 | 4098729 | 6,00 | 0,9 |
| 114310041 | TC | Torre Carbonero | IGME | 190163 | 4094287 | 4,00 | 2,6 |
| 114360024 | CMA-3 | Corral de la Marta | IGME | 197479 | 4086124 | 11,00 | 2,67 |
| 114420047 | CM-B | Cuartel Malandar | IGME | 200684 | 4078014 | 5,00 | 4,72 |
| 104230011 | C14-S32 | El Abalarío | CGS | 173979 | 4114330 | 64,97 | 9,36 |
| 104240120 | C10-S24 | El Alamillo | CGS | 182602 | 4110997 | 36,00 | 14,42 |
| 104240114 | C9-S18 | Los Mimbrales | CGS | 186217 | 4113937 | 29,00 | |
| 114210160 | C15-S37 | Depuradora El Rocío | CGS | 191513 | 4114453 | 2,50 | 3,08 |
| 114210156 | C6-S12 | Pichiricha o Matasgordas | CGS | 194208 | 4113952 | 3,00 | 4,48 |
| 114220050 | C7-S13 | El Raposo | CGS | 197413 | 4115483 | 2,50 | 6,9 |
| 114220047 | C4-S5 | La Juncosilla o Portachuelo | CGS | 201033 | 4117870 | 4,85 | 13,99 |
| 114170140 | C21-S54 | Partido Resina | CGS | 208878 | 4119398 | 20,00 | 16,2 |
| 114360018 | VETA57 | Vetalengua | CGS | 198281 | 4089484 | 2,00 | 3,18 |
| 114180096 | C1-S1 | El Pescante | CGS | 215630 | 4118709 | 3,15 | 7,55 |
| 104280051 | SGOP2-S4 | Matalascañas Sulfasaurus | SGOP | 185143 | 4099811 | 16,52 | 14,93 |
| 114250011 | C8-S16 | La Mogeá | CGS | 188531 | 4104556 | 28,90 | 3,66 |
| 124150021 | | La Marmoleja 2 | IGME | 221128 | 4123080 | 4 | |
| 114180118 | | Feder 1 Bis | IGME | 215206 | 4120357 | 4 | |
| 114210139 | | Rocina Nº 4 | IGME | 187358 | 4115498 | 10 | |
| 114210137 | | Rocina Nº 3 | IGME | 188242 | 4115184 | 10 | |
| 114160018 | C3-S3 | Laguna de la Anguila 1 | CGS | 197770 | 4119691 | 10 | |
| 114210157 | C13-S30 | Sector III-1 | CGS | 190764 | 4118932 | 18,5 | |
| 104170010 | C11-S25 | Cabezudos 1 | CGS | 178491 | 4119871 | 24,5 | |
| 104180031 | C20-S46 | Arroyo Cañada 1 | CGS | 184725 | 4121561 | 30 | |
| 104170014 | C18-S44 | Bodegones 1 | CGS | 173794 | 4120279 | 32 | |
| 114210136 | | Hatovilla (Parcela III) | IGME | 191435 | 4112448 | 5 | |
| 124120064 | | El Sequero | IGME | 231757 | 4130306 | 5,5 | |

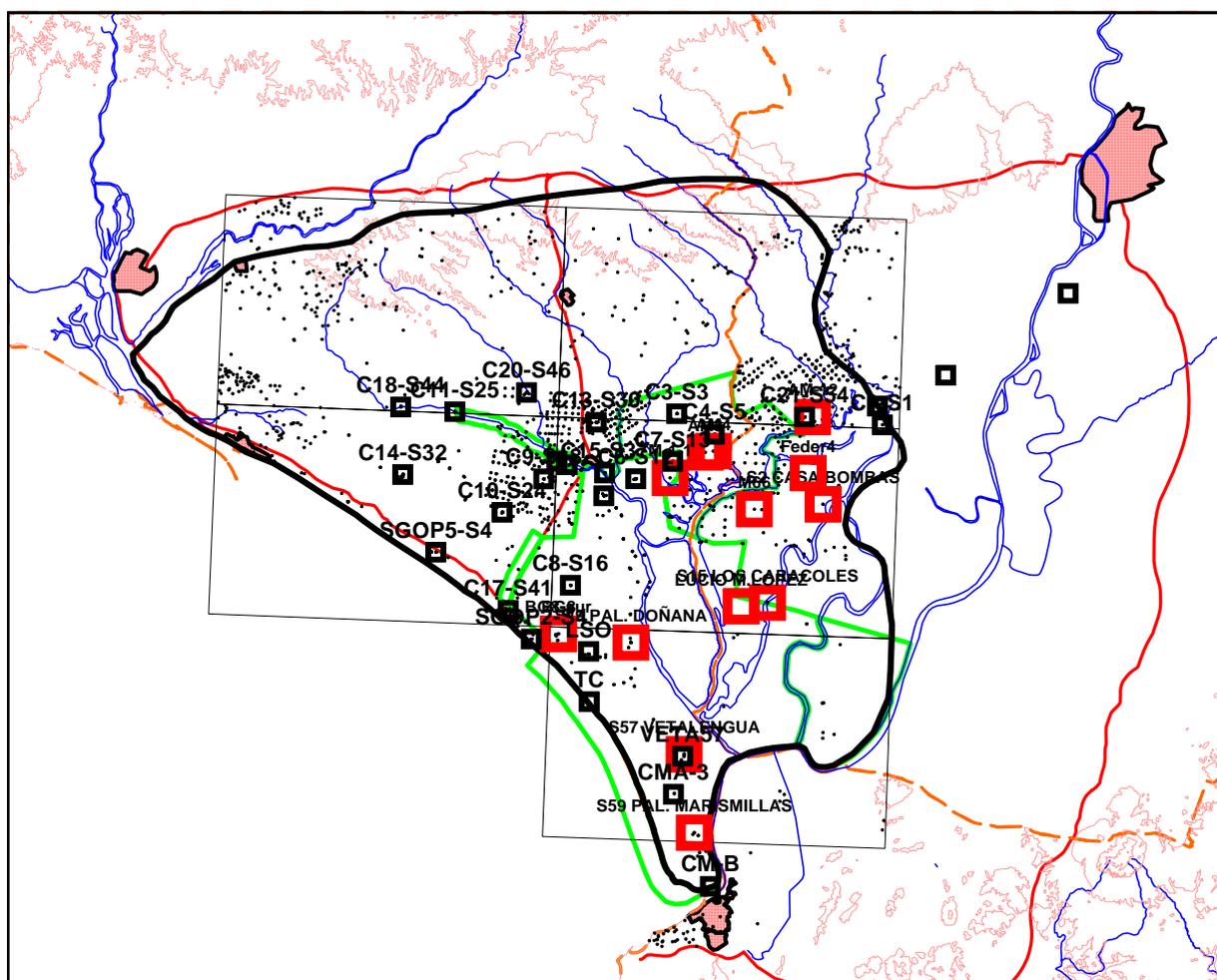


Fig. 198. Situación de los sondeos finalmente testificados en la campaña de 2005 [en negro]. Sondeos testificados en la campaña de 2002[en rojo]

IV.2.3.3 Instrumentación utilizada

Se ha utilizado el equipo de registro MGX-II, controlado por PC externo, con cable de 1000 m. Los registros se han efectuado con las siguientes sondas, de la marca Mount Soupris:

- Sonda 2PGA-1000, de 41 mm de diámetro, que mide la radiación gamma natural mediante cristal de NaI de 22.2x76.2 mm, junto con la sonda 2SFAB-1000, que mide la temperatura y la resistividad del fluido, en un rango nominal de 0 a 100 ohm.m y resolución mejor del 1%.

A la vista de las anomalías encontradas durante la realización de esta campaña, consultas realizadas con el fabricante indican que el rango efectivo de esta sonda es de 2-80 ohm.m, con algunas peculiaridades en su sistema de calibración, que serán comentadas posteriormente.

- Sonda 2PIA-1000, de 39 mm de diámetro, que mide la resistividad de la formación por inducción, con rango de 0 a 10.000 mS/m y precisión del 5% de la escala.

En la campaña de abril se observó un anormal comportamiento de la sonda, dando valores negativos de resistividad del fluido y/o muy discrepantes con los valores medidos en los mismos sondeos en campañas anteriores, por lo que se interrumpieron las mediciones. Tras varias calibraciones efectuadas siguiendo las indicaciones técnicas de la sonda, en noviembre se llevó a cabo su verificación utilizando soluciones patrón de ClNa, observándose un comportamiento no aceptable. Se realizó una nueva calibración con las mismas soluciones patrón, en el rango de 0.5 a 15 g/l, tras lo cual, la verificación de las mediciones dio mejores resultados, aunque presentando todavía discrepancias importantes con los valores de Laboratorio, sobre todo para concentraciones superiores a los 2 g/l.

Reiniciada la campaña en diciembre, la repetición de los sondeos Guardia Civil y El Abalarío volvió a mostrar discrepancias muy importantes, tanto con los valores medidos en abril con la misma sonda, como con los anteriormente conocidos, a pesar de encontrarse la conductividad del agua dentro del rango de calibración. En consecuencia se procedió a una nueva calibración en campo, en el rango 0.5-5 g/l. Las posteriores verificaciones efectuadas en los sondeos Feder 1, La Rocina 4, Los Mimbrales y el Sequero, utilizando además una sonda de conductividad facilitada por la oficina del IGME en Sevilla, redundó en que las mediciones de la sonda MS no son fiables para valores inferiores a los 2 ohm.m. Se decidió no obstante finalizar la campaña, con la siguiente observación: **los valores medidos de resistividad del fluido sólo serán considerados en su aspecto cualitativo.**

En consecuencia, y para compensar la deficiencia de este parámetro se amplió el número inicial de sondeos a testificar con los parámetros de gamma natural, temperatura y resistividad de la formación.

IV.2.3.4 Presentación de los resultados

Se han utilizado dos programas para realizar el procesado de los registros geofísicos obtenidos en la testificación: MSLOG y WellCad. El programa MSLOG se emplea para recibir los datos que transmite la sonda durante la testificación. Este programa genera un archivo LAS en el que se almacenan los registros geofísicos, que serán diferentes en función de los parámetros medidos por la sonda empleada.

El tratamiento de datos se ha realizado a continuación con el programa Wellcad. Éste abre el fichero LAS generado por el anterior programa y permite realizar operaciones para cambiar las unidades de los distintos parámetros. Se utiliza principalmente para mejorar la visualización del registro geofísico obtenido.

El registro de Radiactividad Gamma Natural refleja el valor de radiación gamma que, de forma natural, emiten las distintas litologías. Este registro es el más común y el más relacionado con la litología. Las aplicaciones principales de este registro se pueden resumir en dos: la identificación litológica y la determinación del porcentaje de contenido en arcillas. Este parámetro es registrado por

la sonda en unidades cps (cuentas por segundo) que, posteriormente, se convierte a unidades API mediante la fórmula siguiente:

$$API = [(CPS \times 1.15) + 5].$$

El registro de conductividad del fluido refleja el valor de conductividad del agua contenida en el sondeo. La conductividad del agua es un parámetro que, en cierta medida, indica la mayor o menor concentración de sales en la misma, dado que los incrementos en la concentración de sales en un fluido van a facilitar la conducción de la corriente eléctrica. Esta característica que presentan los fluidos puede variar en función de la temperatura. La Conductividad del Fluido se obtiene a partir del parámetro de Resistividad del Fluido registrado por la sonda, realizando el cálculo siguiente:

$$\text{Conductividad } (\mu\text{S/cm}) = 10.000 / \text{Resistividad del Fluido (ohm x m)}$$

Para una mejor interpretación se debe tener en cuenta el registro de Temperatura del Fluido para observar dos aspectos: por un lado, comprobar que las posibles variaciones de conductividad son debidas a variaciones en la concentración de sales y no a variaciones de temperatura y, por otro lado, para corregir en este registro de conductividad el efecto que produce la temperatura. Por ello, se ha normalizado la Conductividad del Fluido a una temperatura fija de 25°C mediante la fórmula:

$$\text{Conductividad } 25^{\circ}\text{C } (\mu\text{S/cm}) = \text{Conductividad } (\mu\text{S/cm}) * [46.5 / (\text{Temperatura} + 21.5)]$$

El registro de temperatura se presenta en ° C. El registro de resistividad del terreno se ha obtenido por conversión de los valores de conductividad medidos por la sonda, ya que las unidades en ohm.m son más usuales para este parámetro.

IV.2.3.5 Ficheros de datos digitales

En el Anexo Digital IV-2-b de este capítulo se incluyen los ficheros digitales de los registros efectuados, en formato LAS, así como los ficheros gráficos de los registros, su interpretación y columnas litológicas, para poder ser reproducidos en otra escala. En estos ficheros se contiene la siguiente información:

DEPT[M] : profundidad en m

FRES[OHM] : resistividad del agua dentro de la entubación en ohm.m

TEMP[GRA] : temperatura del agua en °C

GAMM[API] : radiación gamma natural en unidades API

I__R[OHM]: resistividad de la formación, medida por inducción en subida en ohm.m

I__R#[OHM]: resistividad de la formación, medida por inducción en bajada en ohm.m

IV.2.3.6 Información proporcionada por los registros

En todos los gráficos de los registros se ha incluido su corrección en función de los parámetros medidos, así como la columna litológica facilitada por el IGME. Se presentan a continuación los principales resultados obtenidos, tanto en lo que se refiere a las características litológicas-sedimentológicas, como a las características hidrogeológicas.

Respecto de las características litológicas y sedimentológicas, tanto en el registro de Radiactividad Gamma Natural como en el de Resistividad del Terreno se han interpretado las diferentes secuencias sedimentarias. Las secuencias vienen representadas con flechas de diferente color, según sean granodecrecientes a techo, de color rojo, granocrecientes a techo, de color azul, o secuencias verticales, de color negro. En las Figuras 200 a 228 se recogen los gráficos de los registros, donde aparecen dibujadas estas secuencias junto con los parámetros registrados por la sonda y los datos litológicos proporcionados por el IGME, que se han modificado, ajustando las profundidades y realizando las intercalaciones necesarias de acuerdo con la interpretación de los registros geofísicos.

Las características hidrogeológicas de cada sondeo que se ha testificado se han deducido a partir de los registros de la conductividad del fluido y temperatura del fluido, haciendo constar que *los valores de conductividad sólo deben ser tomados en su aspecto de variaciones cualitativas*. El agua se ha clasificado en función de la conductividad. En soluciones acuosas la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. La salinidad más probable del agua se ha clasificado, cuando esto ha sido posible, en función de la conductividad del agua, de acuerdo al siguiente criterio:

| Tipos de agua | Conductividad ($\mu\text{S/cm}$) |
|---------------|------------------------------------|
| Dulce | 50 -1.000 |
| Salobre | 1.000-50.000 |
| Salada | 50.000-53.000 |

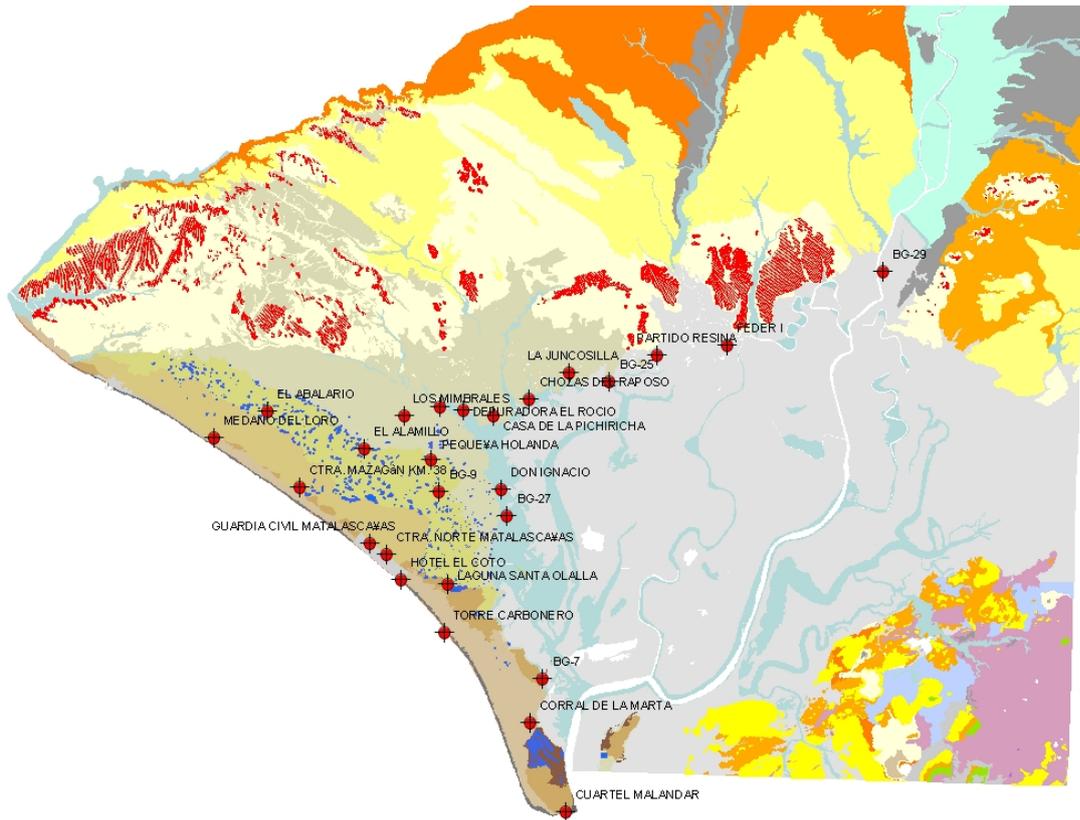


Fig. 199. Situación de los sondeos seleccionados para su testificación en la campaña de 2005 (denominación toponímica).

IV.2.3.7 Interpretación de los registros

ASPERILLO

Este sondeo tiene entubación metálica hasta los 101.8 m, por lo que el registro de resistividad del terreno no es válido hasta esa profundidad, y los valores de radiactividad gamma natural se encuentran más amortiguados que en otros pozos.

En los registros geofísicos se distingue una unidad litológica predominante de arena, que se extiende desde la superficie hasta los 99 m de profundidad, apareciendo algún nivel más arcilloso intercalado, como entre los metros 76 a 86. Bajo ésta unidad arenosa aparece un nivel de arcilla y unos niveles de gravas de escasa potencia que alternan con niveles de arcillas, hasta la profundidad de 110 m. Esto queda reflejado en el registro de Radiactividad Gamma Natural, donde las gravas deben de corresponder con unos niveles de muy baja radiactividad, concretamente entre 102 y 103.5 y entre 106 y 109 m. Por último, se observa un nivel de limos desde los 109 m de profundidad hasta el final del sondeo.

Con los datos de radiactividad se identifican dos secuencias granocrecientes a techo, la más baja de 105 a 101 m y la más alta de 100 a 89 m.

El nivel freático se encontraba a 6.48 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

Los valores de resistividad del fluido y temperatura son incoherentes, debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda, careciendo de valor cuantitativo estos registros y por lo tanto el de conductividad a 25° C derivado de ellos. Como consecuencia de este fallo en la sonda, no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

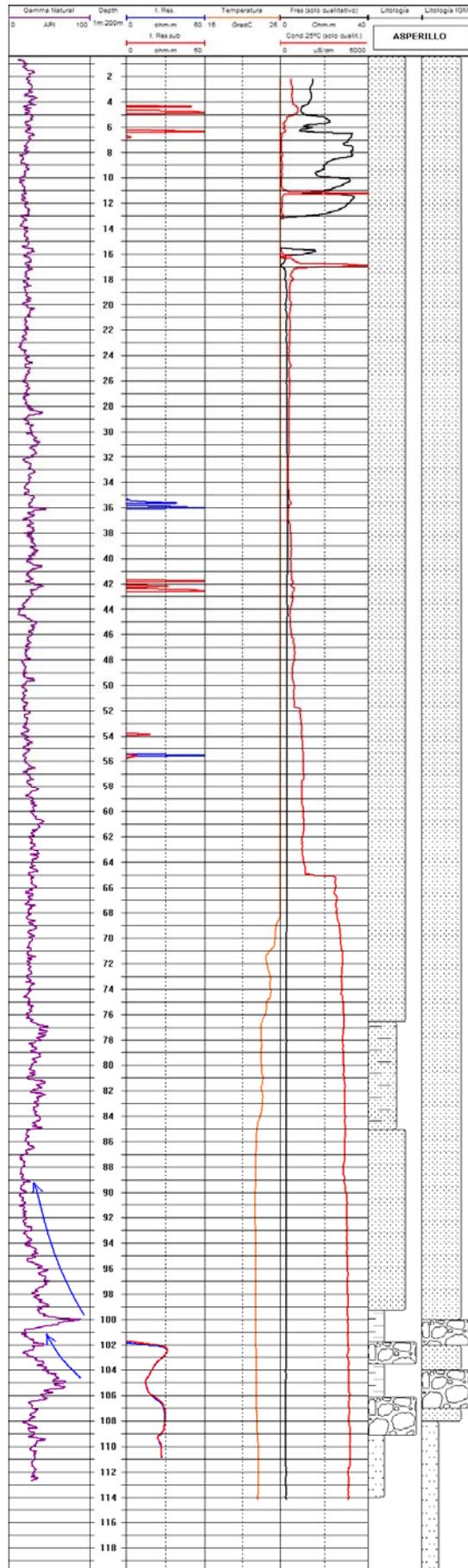


Fig. 200. Testificación en 2005 del sondeo Asperillo

GUARDIA CIVIL

Se observan dos unidades litológicas que se repiten a lo largo del sondeo, arenas y arcillas. Salvo que exista algún aspecto constructivo que lo justifique, el registro de radiactividad gamma natural marca dos unidades claramente diferenciadas: una más radiactiva por encima (entre superficie y el metro 66.5) y otra menos radiactiva (por debajo del metro 66.5), que no se ve reflejada en variaciones de la resistividad del terreno.

La columna litológica se compone principalmente de arenas, con pequeños niveles arcillosos, entre los que destaca el existente entre los 26-28 m y entre los 86-89 m, que queda reflejado por el descenso en los valores de resistividad y un ligero aumento de la radiactividad.

En general, la serie se compone de tramos caracterizados por secuencias sedimentarias granocrecientes a techo y secuencias verticales dentro de las arenas, y pequeñas secuencias granodecrecientes a techo que indican el paso de arenas a arcillas.

El nivel freático se encontraba a 16 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 19.5° C. La conductividad del agua va disminuyendo desde el nivel freático hasta el final del sondeo. El valor medio de la conductividad del fluido varía desde 1.200 hasta 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que debe ser tomado solamente en su aspecto de variación relativa por las razones ya indicadas. La clasificación probable en función de estas características es de agua salobre.

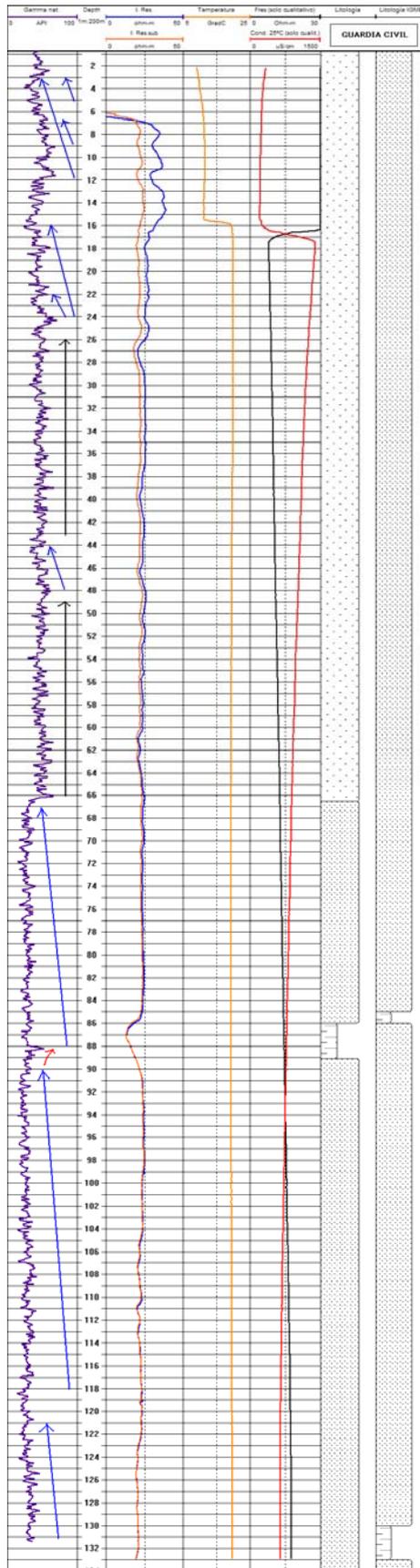


Fig. 201. Testificación en 2005 del sondeo Guardia Civil

LAGUNA DE SANTA OLALLA

La columna litológica se compone principalmente de arenas, finas y medias, con pequeños niveles intercalados de arcillas, indicados fundamentalmente por las variaciones de resistividad del terreno (tramos 12.5-13.5 m y 61-64 m), y acompañados por variaciones de los valores de gamma natural (tramos 26.5.-27.5 m y a partir de los 90 m).

Se aprecia una secuencia granocreciente a techo desde el metro 90 al 71, y dos secuencias granodecrescentes a techo entre los metros 61 a 49 y 48 a 44.

El nivel freático se encontraba a 0.9 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica. El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 18° C Los valores de resistividad del fluido son incoherentes debido a un fallo en el mecanismo de la sonda, por lo que no se tendrán en cuenta.

Como consecuencia de los fallos producidos en la sonda no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

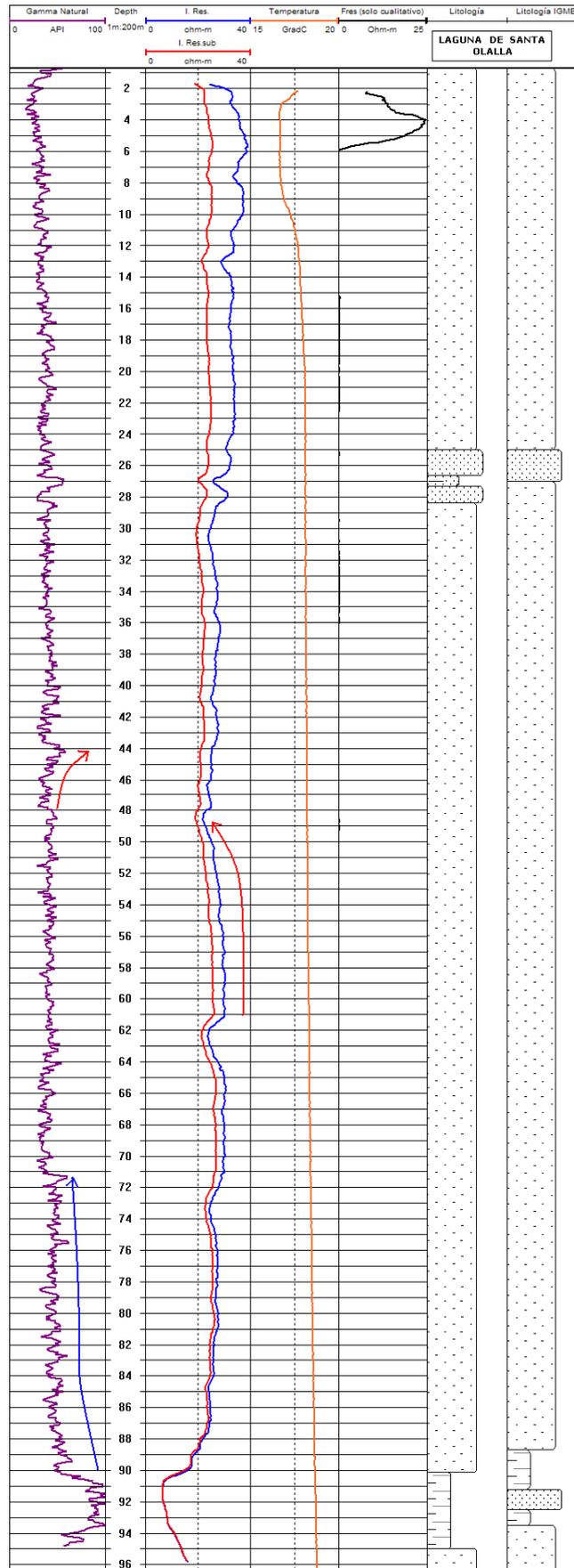


Fig. 202. Testificación en 2005 del sondeo Laguna Santa Olalla

TORRE CARBONERO

La litología de este sondeo se compone fundamentalmente de arenas finas y medias, con algunos niveles de arcillas, que son los que marcan la presencia de secuencias sedimentarias.

Los niveles arcillosos se distinguen en los registros de radiactividad gamma natural y en los valores de resistividad, aumentando uno y disminuyendo otro, respectivamente, con una buena correspondencia y complementariedad entre ambos registros, que sólo se ve incumplida en la anomalía de baja resistividad a los 35 m, que no se refleja en el registro de gamma natural, debido posiblemente a que en esa zona no existan arcillas, sino que sea una zona donde las arenas estén menos compactadas.

La diferencia entre arenas finas y medias se aprecia ligeramente en los valores de resistividad, teniendo estas últimas valores algo mayores.

En el registro geofísico de radiactividad gamma natural se puede observar que las secuencias sedimentarias son generalmente granodecrescentes a techo, aunque también hay un nivel caracterizado por una secuencia sedimentaria inversa, esto es, granocreciente a techo, entre los 139 y 114 m.

El nivel freático se encontraba a 2.6 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura una vez estabilizada aumenta en profundidad de 18 a 21.2° C. El parámetro de la resistividad del fluido registró datos negativos, posiblemente debido a que se trataba de un acuífero muy salado, y la sonda no pudo reconocer estos valores tan bajos, por ello, tanto el registro de resistividad del fluido como su conversión a conductividad a 25° C sólo sirven para mostrar la variación relativa en profundidad, diferenciándose un tramo con agua de mayor conductividad entre 3.5 y 17 m. Debido a fallos en el mecanismo de la sonda, no se puede clasificar el tipo de agua del sondeo.

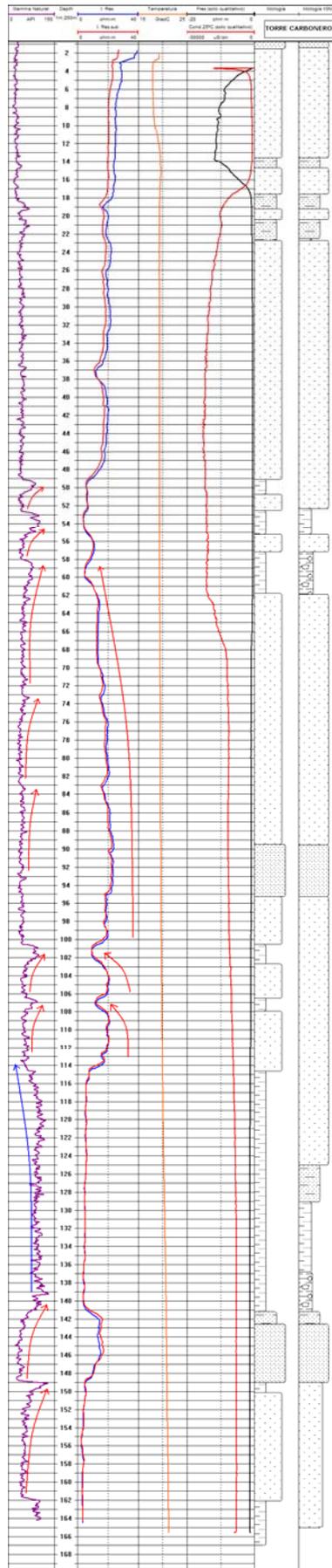


Fig. 203. Testificación en 2005 del sondeo Torre Carbonero

CORRAL DE LA MARTA

La secuencia litológica se compone de una alternancia entre arenas y arcillas, predominando los tramos arenosos, y apareciendo algunos tramos más compactos, que se identifican por el aumento de resistividad.

Los niveles arcillosos se distinguen de los arenosos en los registros de radiactividad gamma natural, siendo mayor cuanto más arcilloso es el nivel, y siendo menores los valores de resistividad del material.

No obstante, es notable la falta de correspondencia entre los valores de resistividad de la formación y la radiación gamma a partir de los 65 m de profundidad. Una hipótesis para justificar este hecho es que, a partir de esta profundidad, el agua contenida en las arenas es muy salobre, por lo que no resulta posible de diferenciar la resistividad de las arenas de la de las arcillas.

En esta serie sedimentaria destacan dos tramos granodecrecientes a techo entre los 44 y 40 m, y entre 31 y 25 m, que muestran el paso de zonas arenosas a zonas arcillosas y un tramo granocreciente a techo, entre 40 y 33 m, que indica el paso de arenas a arcillas.

El nivel freático se encontraba a 2.67 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura en todo el sondeo una vez estabilizada aumenta de 18 a 21.42° C. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el mecanismo de la sonda, por lo que no pueden tenerse en cuenta.

Como consecuencia de estos problemas en el registro de resistividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

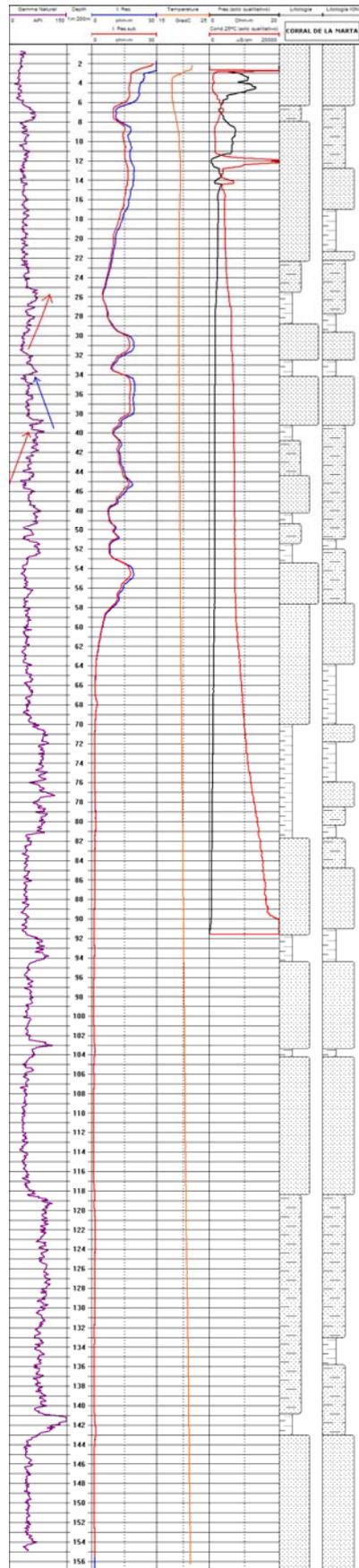


Fig. 204. Testificación en 2005 del sondeo Corral de la Marta

CUARTEL MALANDAR

Se distinguen tres grandes unidades litológicas: una superior, de arenas, una intermedia areno-arcillosa y una inferior, de arcillas.

La unidad arenosa se extiende desde la superficie hasta los 8 m de profundidad, lo cual queda marcado por bajos valores de radiactividad. Bajo esta unidad aparece una unidad areno-arcillosa de 11 m de potencia, que sólo se diferencia ligeramente de la anterior en la disminución de la resistividad y un leve aumento de los valores de radiactividad gamma. La unidad arcillosa se localiza bajo la unidad anterior hasta los 49 m, donde termina el registro geofísico. Se caracteriza por valores generalmente más altos de radiactividad.

Los cambios de valor del registro de gamma natural no tienen correspondencia con los de resistividad de la formación, que permanece inalterada a partir de los 10 m. Una hipótesis para justificar este hecho es que el agua contenida en las arenas es muy salobre, por lo que no resulta posible diferenciar la resistividad de las arenas de la de las arcillas.

Las secuencias sedimentarias más destacadas se sitúan dentro del nivel arcilloso ya que las variaciones litológicas en esta unidad permiten apreciar esos cambios evolutivos. Estas secuencias son tanto granodecrecientes como granocrecientes a techo.

Alrededor de los 6 m de profundidad se han registrado valores negativos en el parámetro de resistividad, debido a que la sonda ha detectado algún elemento metálico en la tubería, como pueden ser las juntas metálicas que conectan los segmentos de la tubería de PVC.

El nivel freático se encontraba a 4.72 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura aumenta en profundidad de 19.2 a 20.2° C desde el nivel freático hasta los 50.52 m de profundidad. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda, por lo que sólo se tendrá en cuenta su variación relativa. Como consecuencia, no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

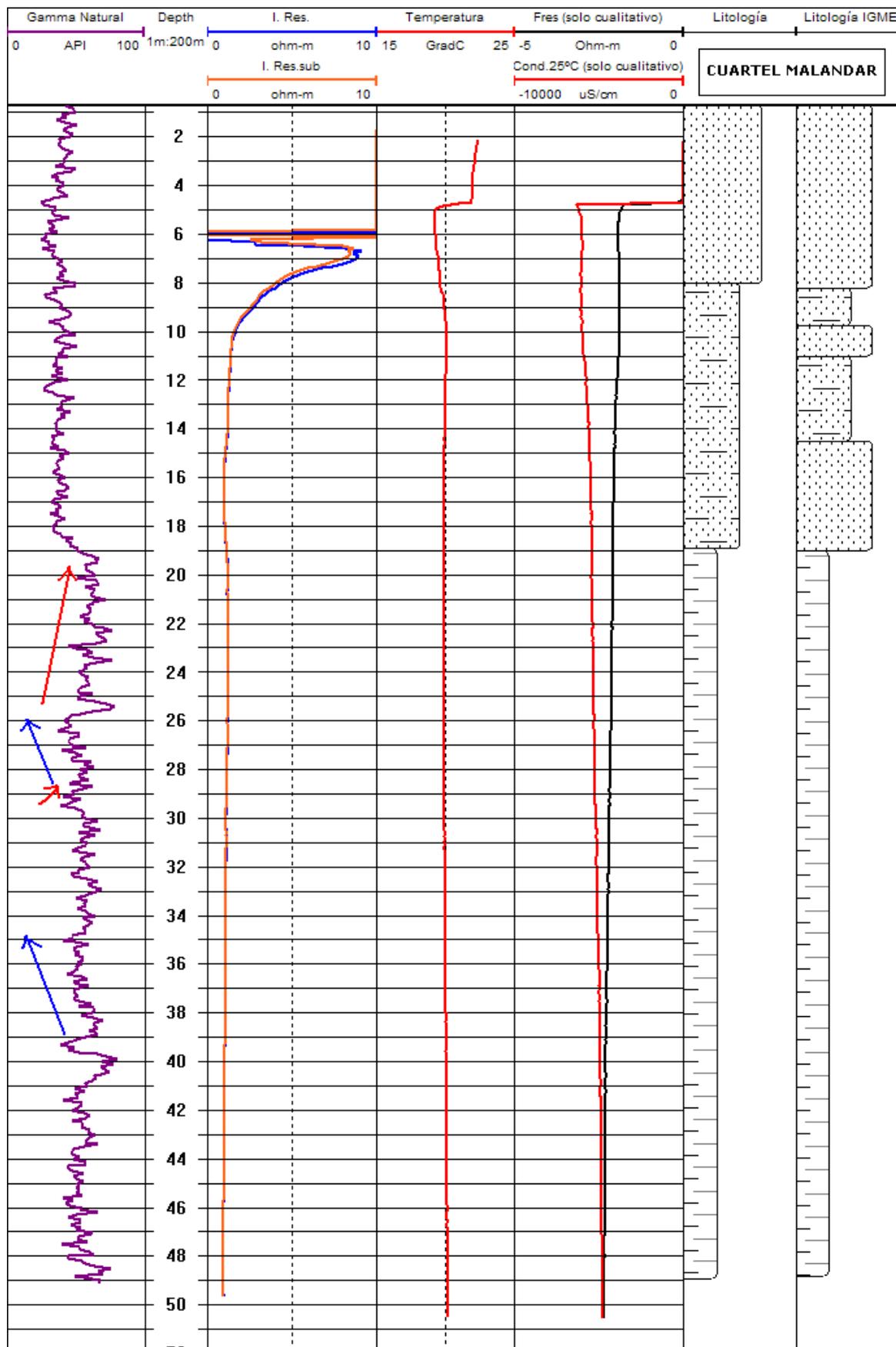


Fig. 205. Testificación en 2005 del sondeo Cuartel del Malandar

EL ABALARIO

La columna litológica se compone principalmente de arenas con pequeños niveles de arcilla, entre los que destacan los que se localizan entre las cotas 69-71 m, 80-81.5 m y 85.5-87 m, indicados por las variaciones tanto de radiación gamma como de resistividad del terreno.

Se observan dos secuencias de primer orden dentro del tramo de arenas: una granodecreciente a techo, de 68 a 38 m, y otra granocreciente a techo, de 38 m hasta la superficie del sondeo. Dentro de estas grandes secuencias se distinguen secuencias de segundo orden, alternando entre granocrecientes y granodecrecientes a techo.

El nivel freático se encontraba a 9.36 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 19.6° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 191 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (por las razones explicadas este valor solamente puede tomarse con carácter relativo) una vez que ya se ha estabilizado, observándose un tramo con mayor conductividad del fluido entre 15 y 30 m.

La clasificación en función de estas características es de agua dulce.

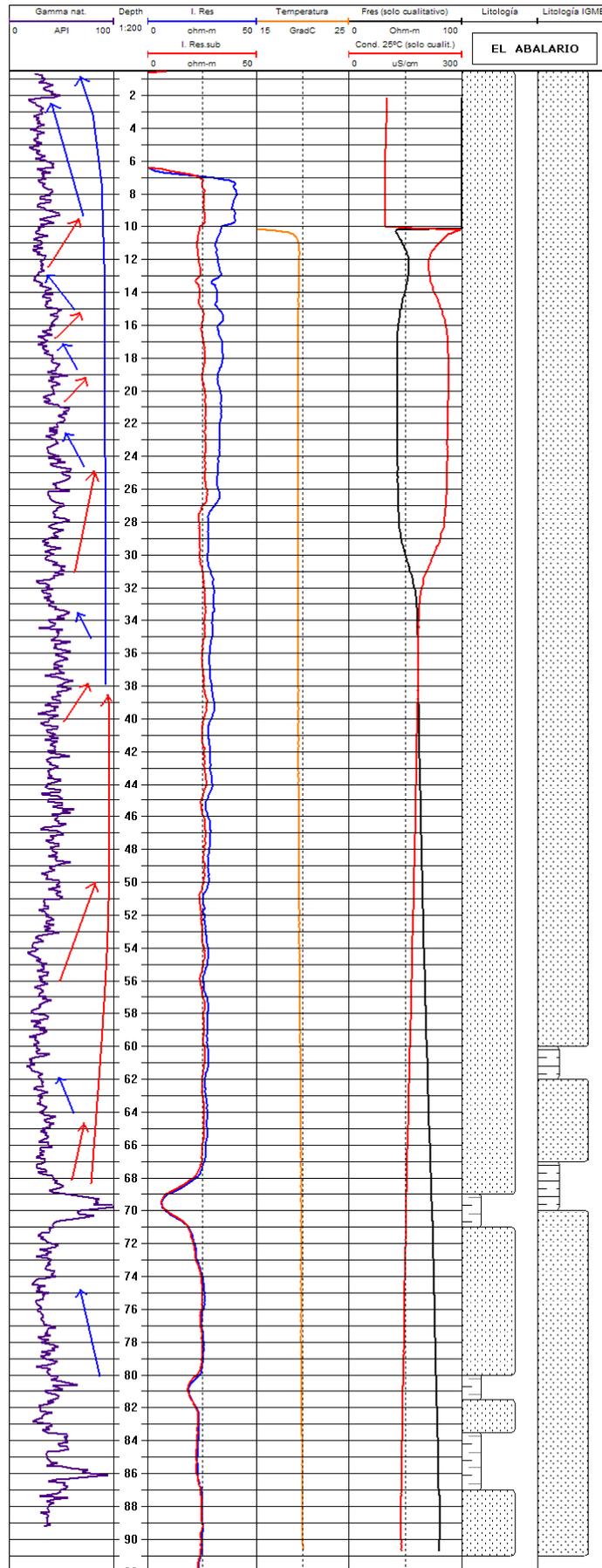


Fig. 206. Testificación en 2005 del sondeo El Abalarío

EL ALAMILLO

Se distinguen dos grandes unidades litológicas detríticas, arenas y arcillas. La unidad arenosa se extiende desde la superficie hasta los 63.5 m de profundidad. En esta unidad se observan intercalados algunos niveles con mayor contenido en arcilla como en los niveles de 33-34.5 m y 40-43 m, que se pueden distinguir a partir de los registros de radiactividad gamma natural, que aumenta su valor en estos niveles.

La unidad más arcillosa se localiza bajo la anterior hasta los 117 m, donde termina el registro geofísico, con varios tramos areno-arcillosos diferenciados por el aumento en los valores de resistividad, entre 63.5 y 68.5 m, 73.5 y 76.5 m y entre 90.5 y 110 m. En esta unidad se observan variaciones litológicas mayores que en la unidad arenosa suprayacente. Estas mayores variaciones litológicas son las que provocan la existencia de diversas secuencias sedimentarias, alternantes entre granodecrecientes y granocrecientes a techo.

Las fuertes oscilaciones del registro de resistividad de la formación entorno a los 50 m y 60-62 m deben ser adjudicadas a la existencia de partes metálicas de la entubación.

El nivel freático se encontraba a 14.42 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 19.8° C. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda, por lo que sólo se tendrá en cuenta su variación relativa, observándose un aumento progresivo de la conductividad del fluido una vez estabilizada la sonda.

Debido a la falta de fiabilidad de los datos de resistividad y conductividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

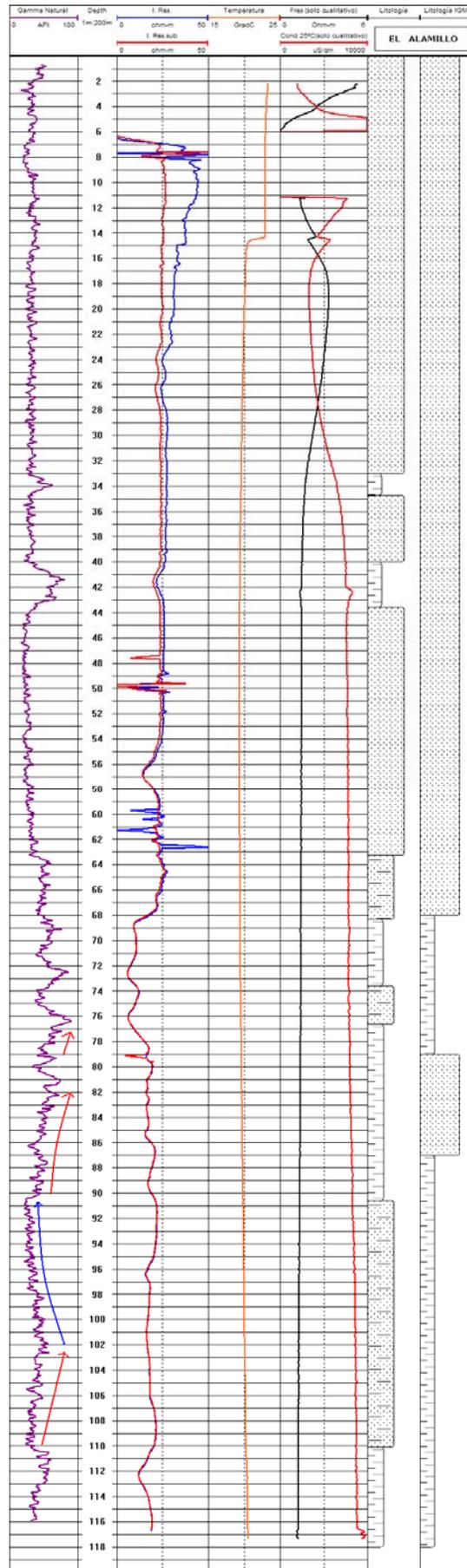


Fig. 207. Testificación en 2005 del sondeo El Alamillo

DEPURADORA EL ROCIO

La columna litológica está compuesta de arenas, arcillas y margas. En este sondeo se presenta una total correspondencia entre las oscilaciones de los valores de radiactividad y de resistividad de la formación, lo que permite establecer la secuencia litológica sin apenas ambigüedades.

La litología predominante son arenas, y aparecen intercalados niveles de arcillas y margas, que se distinguen en el registro geofísico por un aumento de la radiactividad y una disminución de la resistividad del terreno. Los niveles arcillosos más destacados se encuentran en 7-10 m, 20-33 m, 51.5-54.5 m y 74-80.5 m, y el nivel margoso está entre los 40 y 47.5 m.

La gran variación litológica permite apreciar claramente la presencia de secuencias sedimentarias tanto granodecrecientes como granocrecientes a techo.

El nivel freático se encontraba a 3.08 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 20° C. Como se puede observar en los registros geofísicos, el parámetro de la resistividad del fluido registró datos negativos a partir de 17.5 m, por ello no se tendrá en cuenta.

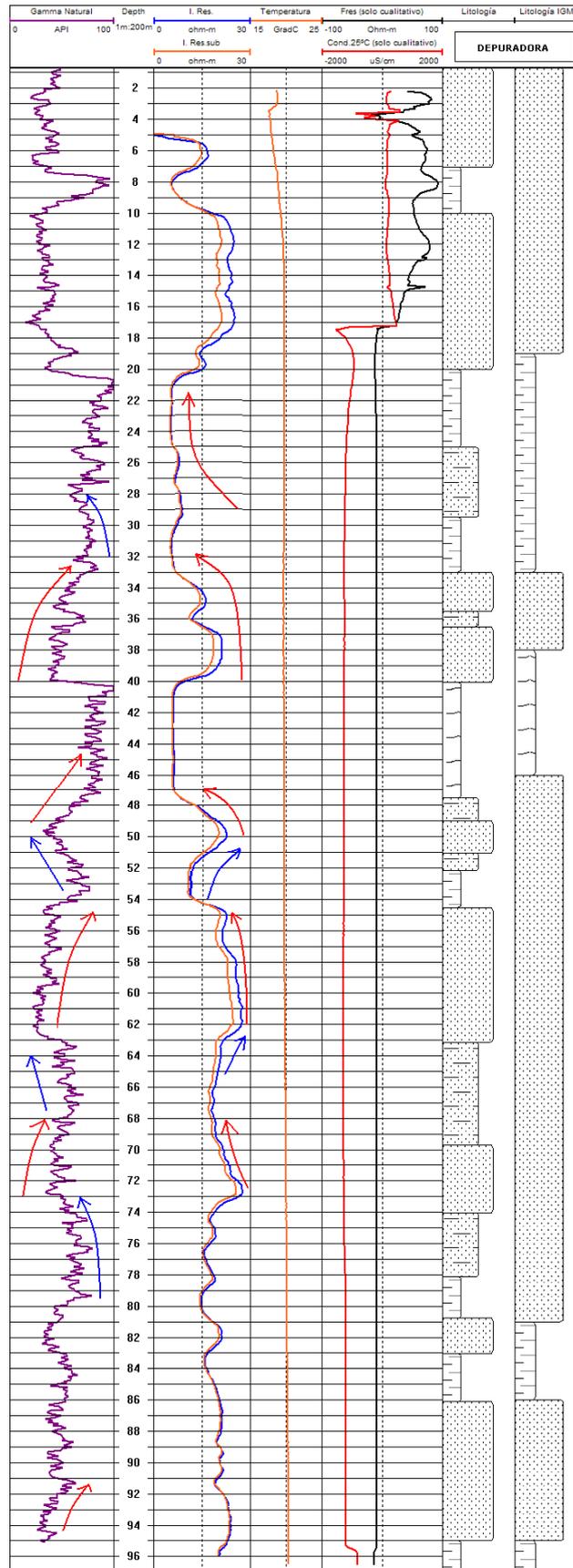


Fig. 208. Testificación en 2005 del sondeo Depuradora

PICHIRICHA

La columna litológica del sondeo se compone básicamente de arenas, con niveles lutíticos y arcillosos, y gravas.

El tramo de arenas con intercalaciones de lutitas y arcillas se extiende desde la superficie hasta los 95.5 m; los niveles arcillosos, fácilmente identificables por la disminución de la resistividad y aumento de la radiactividad gamma natural, se localizan en las siguientes cotas: 31.5-34 m, 38-42.5 m, 52.5-67 m, 72-75.5 m y 94.5-95.5 m. El nivel lutítico no es fácilmente distinguible con los datos del registro de resistividad, posiblemente debido a algún aspecto constructivo del sondeo que ha distorsionado la medición de resistividad de la formación hasta los 18.5 m, pero según los datos aportados por el IGME se localiza entre los 11 y 17 m, correspondiéndose con un ligero aumento de la radiación gamma.

Bajo este tramo de arenas y hasta el final del sondeo, a 111 m, se observa un nivel con alta resistividad, que según datos aportados por el IGME, podría corresponder a gravas, con pequeños niveles de menor resistividad, que corresponde a niveles arcillosos, dado el aumento en los valores de radiactividad gamma natural.

La serie sedimentaria está formada por varias secuencias granodecrescentes a techo, de 110 a 100 m, de 66 a 58 m y de 28 a 13 m, y pequeñas secuencias granocrescentes a techo, de 56 a 53 m y de 42 a 37 m.

El nivel freático se encontraba a 4.48 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura una vez estabilizada aumenta progresivamente con la profundidad desde los 18 hasta los 21° C. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda, por lo que sólo se tendrá en cuenta su variación relativa sondeo, distinguiéndose un aumento gradual de la conductividad del agua a lo largo de todo el sondeo, algo más brusco a 49 m.

Como consecuencia de estos problemas en el registro de resistividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

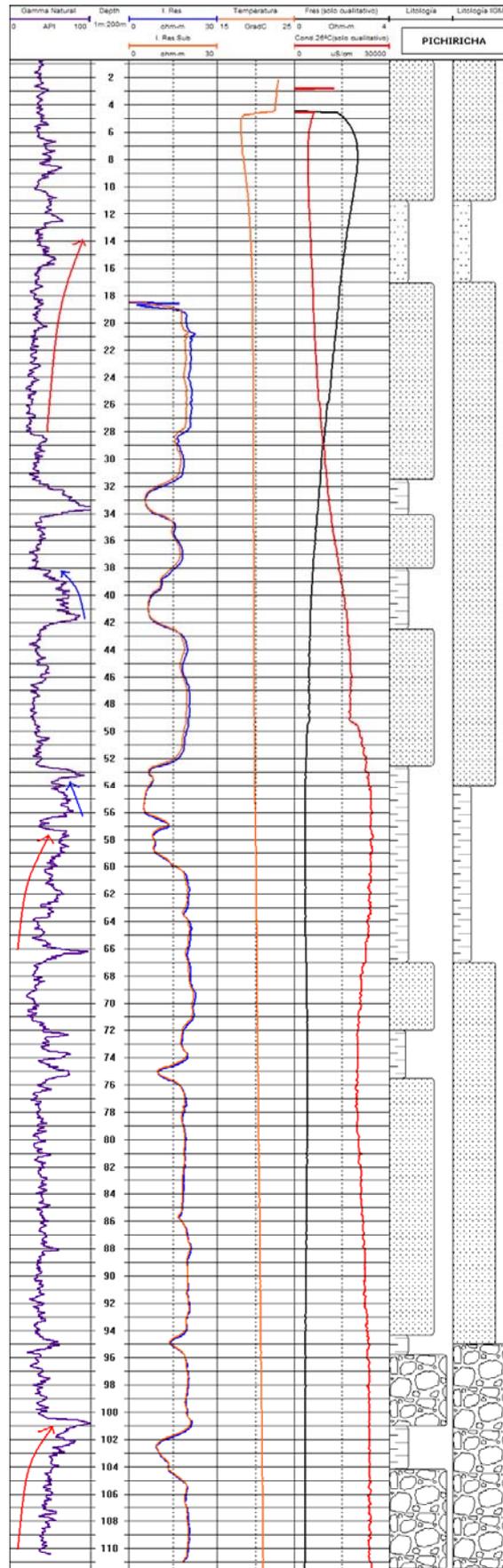


Fig. 209. Testificación en 2005 del sondeo Pichiricha

CHOZAS DEL RAPOSO

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 9 m. No obstante, por debajo de esta profundidad, en los registros geofísicos, se pueden distinguir dos grandes unidades litológicas predominantes, arenas y arcillas, con un nivel de gravas entre 37 y 40 m de profundidad.

Las unidades arenosas principales se extienden desde la superficie hasta los 14 m y de 40 a 58 m de profundidad.

Según los registros de Resistividad del terreno y radiactividad gamma natural se pueden distinguir niveles intercalados de arenas y arcillas entre los 14 y 37 m, apreciándose un aumento del parámetro de resistividad en los niveles arenosos y una disminución en los niveles arcillosos.

A partir de los 58 m aumenta el contenido en arcillas, según se desprende de la lectura del registro de radiactividad gamma natural, que aumenta en este tramo, y aparecen niveles areno-arcillosos intercalados con niveles arcillosos, siendo más arcillosos cuanto mayor es este parámetro.

Según los registros de los parámetros de radiactividad y resistividad del terreno, se distingue una secuencia de primer orden granodecreciente a techo desde los 58 a los 20 m, y pequeñas secuencias tanto granodecrecientes como granocrecientes a techo.

El nivel freático se encontraba a 6.9 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 20.14° C. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda, por lo que sólo se tendrá en cuenta su variación relativa, observándose un valor constante en la conductividad hasta los 75 m, donde comienza a producirse un aumento progresivo de la conductividad del agua en profundidad. Como consecuencia de estos problemas en el registro de resistividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

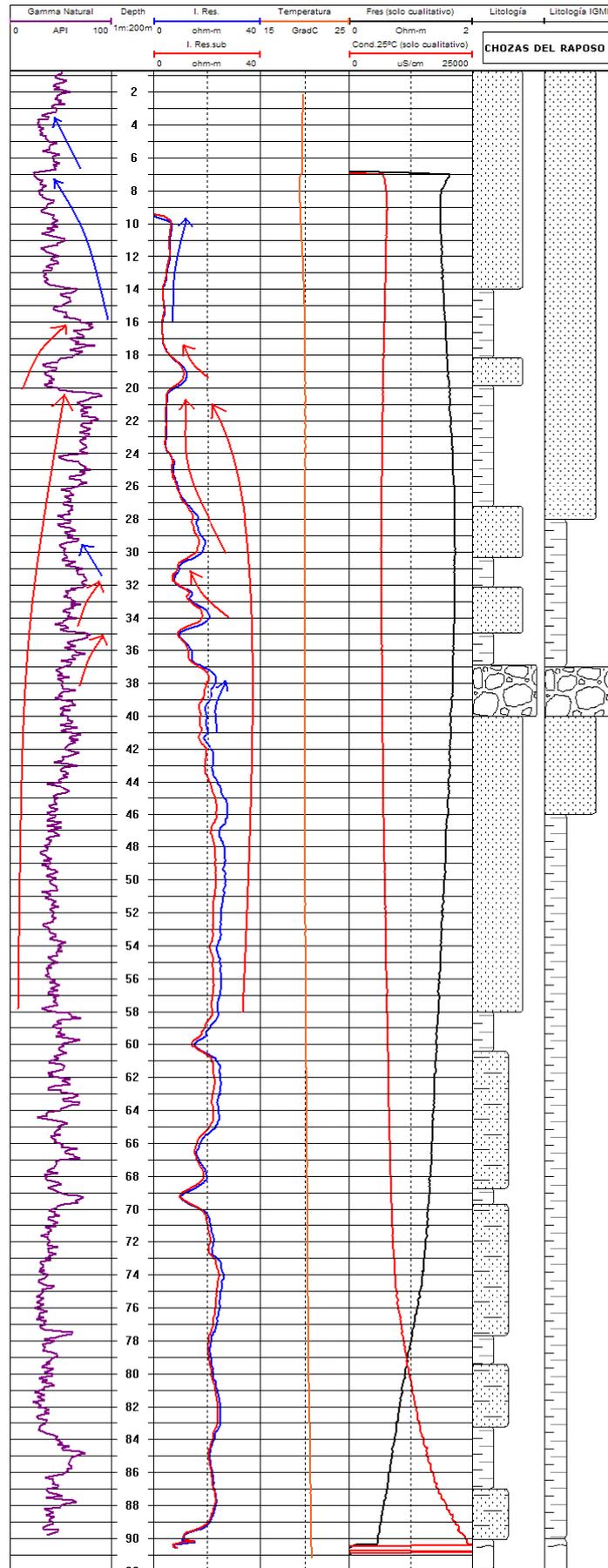


Fig. 210. Testificación en 2005 del sondeo Choza del raposo

LA JUNCOSILLA

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 5 m. Aun así, en los registros geofísicos se distingue una unidad litológica predominante de arena desde la superficie hasta los 56 m, con niveles intercalados de arcillas y gravas de escasa potencia, y un nivel margoso al final del sondeo (de 56 a 63 m de profundidad).

Los niveles arcillosos se identifican en los registros geofísicos por un aumento de la radiactividad y una disminución de la resistividad del terreno entre los tramos de 5-12.5 m, 26-30 m, 36-37.5 m, 39-40 m y 51-52 m.

En la secuencia sedimentaria se aprecia la sucesión entre los tramos arenosos y arcillosos, señalándose en los registros geofísicos algunas secuencias granocrecientes a techo de 52 a 40 m y de 30 a 26 m y granodecreciente de 32 a 30 m.

El nivel freático se encontraba a 13.99 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

La temperatura va aumentando progresivamente en profundidad de 19.6 a 20.2° C. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda, por lo que no se tendrán en cuenta.

Debido a la falta de fiabilidad de los datos de resistividad y conductividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

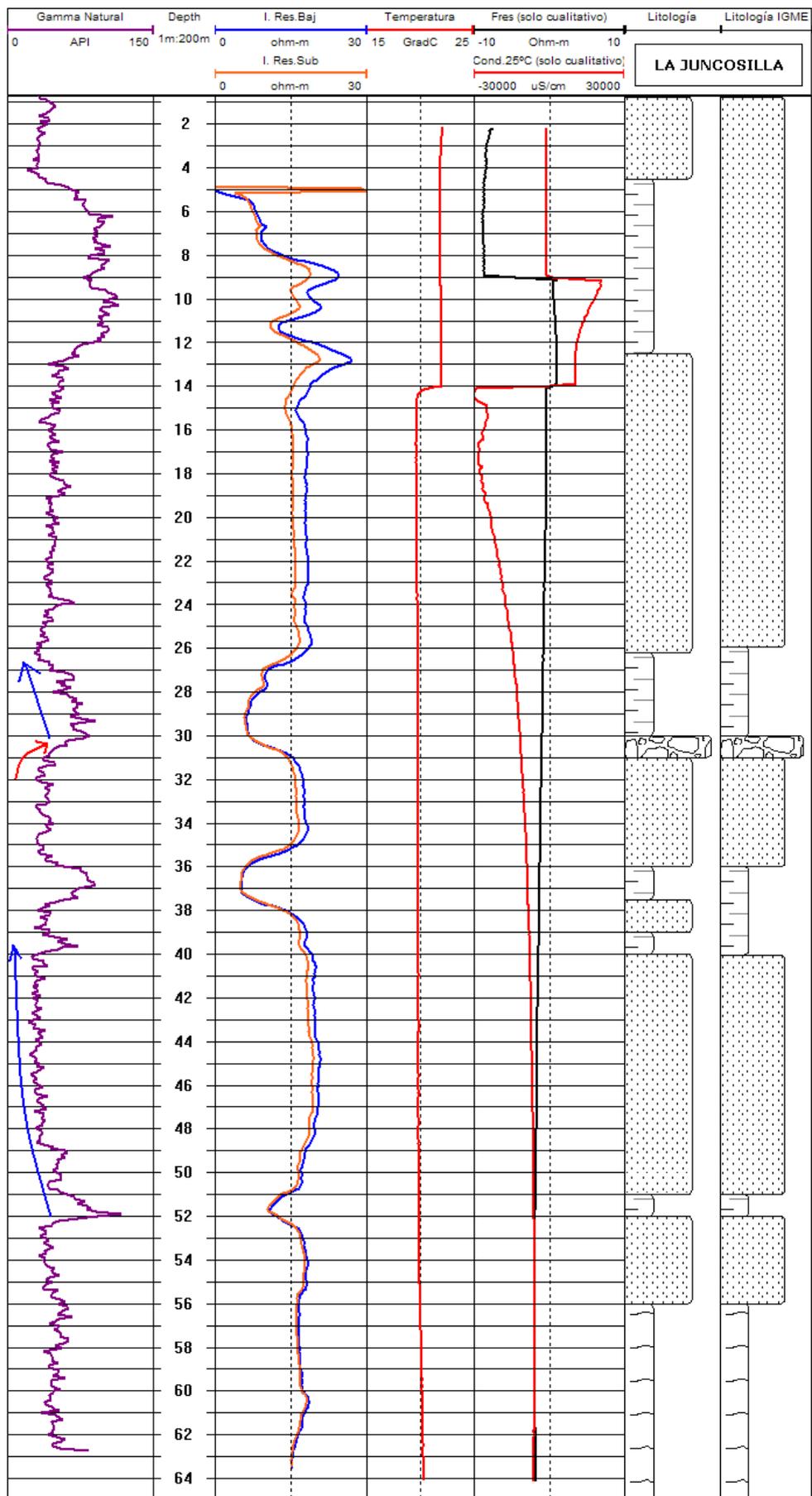


Fig. 211. Testificación en 2005 del sondeo Juncosilla

PARTIDO RESINA

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 5 m. Por debajo de esta cota, la columna litológica se compone de dos unidades litológicas alternantes a lo largo del sondeo, arenas y arcillas.

Estos niveles se diferencian en los registros geofísicos con los datos de resistividad del material y radiactividad gamma natural, en muy buena correspondencia. Se caracteriza por presentar valores altos de resistividad y bajos de radiactividad gamma en los tramos de arenas, y valores bajos de resistividad y altos de radiactividad gamma natural en los tramos arcillosos.

Finalmente, a partir de los 71 m hasta el final de la testificación existe un aumento de resistividad que, según los datos aportados por el IGME, correspondería a un nivel de areniscas, con alguna posible intercalación de materiales más gruesos entre los 71-73 m, que produce un aumento de la resistividad y una disminución de la radiactividad.

En general, la serie sedimentaria también es una alternancia de secuencias granocrecientes y granodecipientes a techo que indican el paso de zonas arcillosas a zonas arenosas y viceversa.

El nivel freático se encontraba a 16.2 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

La temperatura, una vez estabilizada, va aumentando progresivamente en profundidad de 20.7 a 22.41° C. Como se puede observar en los registros geofísicos, el parámetro de la resistividad del fluido registró datos negativos, por lo tanto sólo se tendrá en cuenta su variación relativa, distinguiéndose una brusca disminución de la conductividad del agua a los 32 m.

Debido a la falta de fiabilidad de los datos de resistividad y conductividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

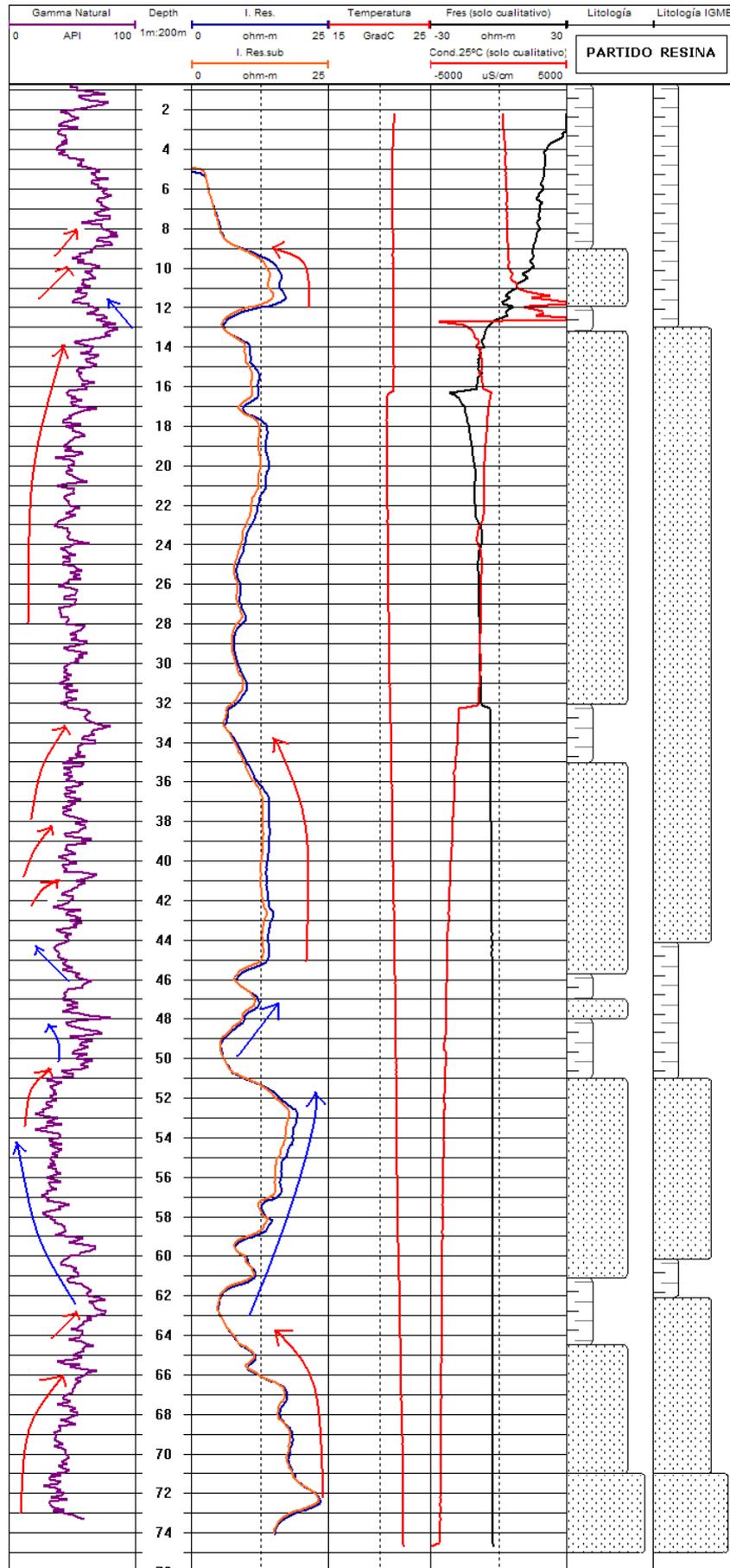


Fig. 212. Testificación en 2005 del sondeo Partido Resina

EL PESCANTE

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 10 m.

La columna litológica está compuesta principalmente de arenas con pequeños niveles de arcillas intercalados y un nivel de gravas, poco radiactivo, entre los 64 y 76 m. El nivel arenoso superior, localizado entre superficie y el metro 63, debe de estar más compactado y carecer de matriz dados los altos valores de resistividad observados.

Los niveles arcillosos se reconocen por el aumento del registro de radiactividad y disminución del registro de resistividad del terreno y son más frecuentes entre 76 y 100 m de profundidad, aunque las oscilaciones de la radiactividad no se ven bien reflejadas en las variaciones de resistividad de la formación, quizá debido a la salinidad del agua.

En la zona donde se encuentra la serie perforada por este sondeo se aprecian varias secuencias granodecrecientes a techo que muestran el paso a las zonas con mayor contenido en arcillas.

Alrededor de los 10 m de profundidad se han registrado valores negativos en el parámetro de resistividad, debido a que la sonda ha detectado algún elemento metálico en la tubería, como puede ser por la existencia de la tubería de emboquille metálica hasta esta profundidad.

El nivel freático se encontraba a 7.55 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

La temperatura va aumentando progresivamente en profundidad de 21 a 22.85° C. Como se puede observar en los registros geofísicos, el parámetro de la resistividad del fluido registró datos negativos, por lo tanto no se tendrán en cuenta estos valores a la hora de clasificar el agua de este sondeo, no obstante, la clasificación podría ser de agua salada por lo expuesto anteriormente.

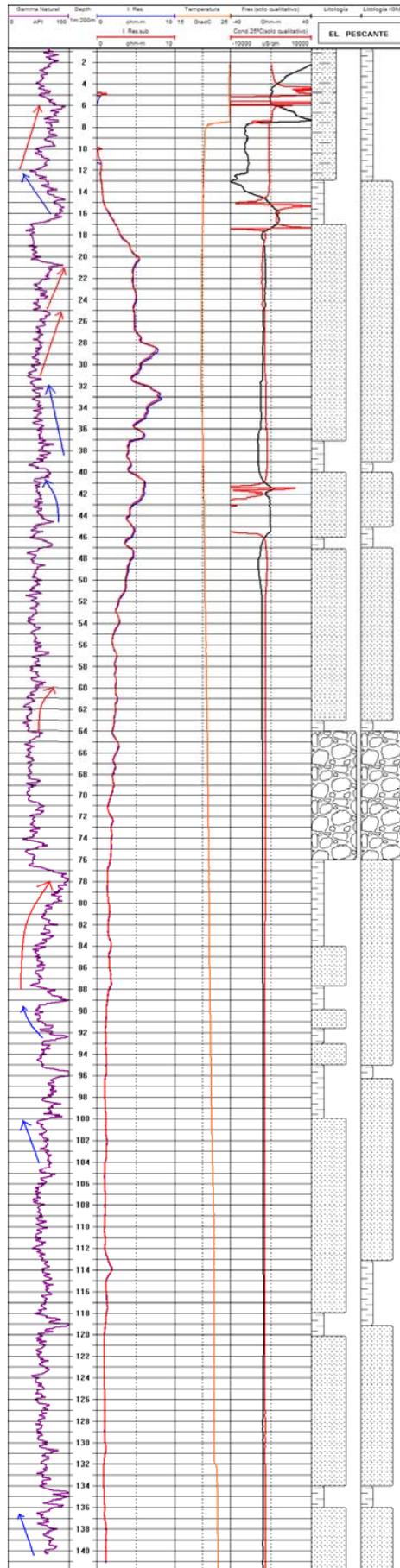


Fig. 213. Testificación en 2005 del sondeo El Pescante

SULFASAURUS

Este sondeo atraviesa una gran unidad litológica de arenas, desde la superficie hasta el final del sondeo, a 138 m de profundidad, con algún nivel intermedio con mayor contenido en arcillas.

En la serie sedimentaria se observan alternancias de tramos marcados por secuencias granocrecientes y tramos de secuencias granodecrecientes a techo lo que podría indicar que, dentro de la monotonía definida por la homogeneidad de la radiactividad, se aprecian ligeras oscilaciones en la cuenca.

En el parámetro de resistividad se observa que se han registrado valores negativos desde la superficie del sondeo hasta 105.21 m, esto es debido a que se ha usado una tubería de hierro como revestimiento del sondeo en estos metros.

El nivel freático se encontraba a 14.93 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 20° C. En este sondeo los datos de resistividad del fluido se registraron con valores negativos no siendo, por tanto, válidos.

Debido a la falta de fiabilidad de los datos de resistividad y conductividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

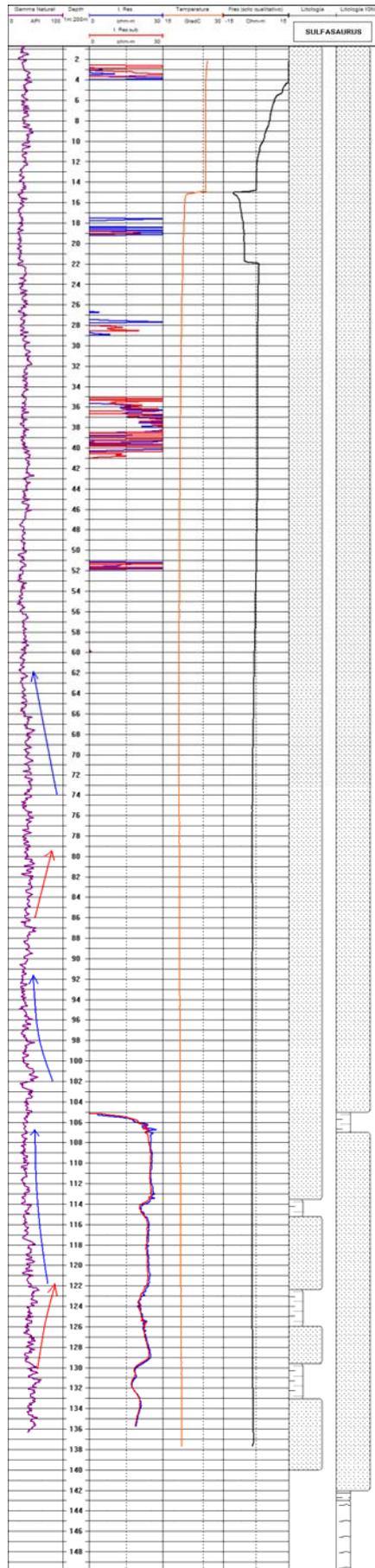


Fig. 214. Testificación en 2005 del sondeo Sulfasaurus

VETALENGUA

La columna litológica está compuesta por una sucesión de arenas, arcillas y gravas, que se reconocen por las oscilaciones en los parámetros geofísicos registrados de radiactividad y resistividad.

Desde los 2 hasta los 66 m de profundidad se observa una gran unidad de arcillas, con un nivel intermedio más resistivo, entre 17.5 y 23 m, que podría deberse a un posible contenido en gravas en ese tramo. Por debajo hay un nivel de gravas de 26 m de potencia, y otro en los metros 97 a 100.5, reconocibles por el aumento de la resistividad del terreno. Las arcillas vuelven a presentarse nuevamente, pero esta vez alternantes con arenas y unidades arcillo-arenosas, desde 107 hasta 168 m. Estas unidades arcillosas se reconocen por su alta radiactividad.

Bajo esta unidad alternancia de arenas y arcillas se encuentra una unidad arenosa, con menor radiactividad gamma natural, hasta el final del sondeo.

El nivel freático se encontraba a 3.18 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

En este sondeo sólo se midieron los parámetros de resistividad y conductividad del terreno. Por lo tanto, no hay datos de temperatura ni de conductividad del fluido.

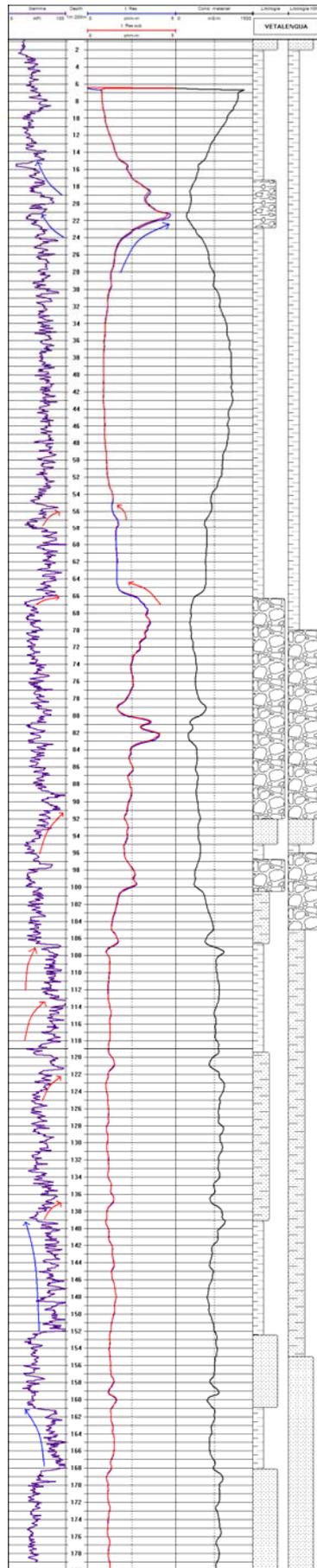


Fig. 215. Testificación en 2005 del sondeo Vetaleugua

LAGUNA MOGEA

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 5 m. Por debajo de esta cota, la columna litológica se compone básicamente de arenas, con mayor o menor compactación, como se observa en el parámetro de resistividad, y sólo se distingue un pequeño tramo margoso bajo las arenas, a los 74 m de profundidad, hasta el final del sondeo, a 77 m, que se puede reconocer en el registro geofísico por una disminución en la resistividad. A lo largo de toda la columna existen pequeñas intercalaciones arcillosas, fundamentalmente marcadas por la disminución de la resistividad (entre los 25-28.5, 35-36, 41.5-45, 51-52.5, 55.5-57, 58-60, 63-65 y 70-71 m). La casi ausencia de variación de la radiactividad en estos tramos pudiera ser debida a la naturaleza de la mineralogía de las arcillas.

En este último tramo del sondeo es donde se distingue una pequeña secuencia granocreciente que nos muestra el paso de margas a arenas. En la serie arenosa, sin embargo, las secuencias no son muy marcadas lo que da una idea de la homogeneidad de los materiales y la constancia en la evolución de la cuenca sedimentaria en esta zona.

El nivel freático se encontraba a 3.66 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura en todo el sondeo una vez estabilizada aumenta de 17.6 a 19.10° C a lo largo del sondeo. En este sondeo el parámetro de la resistividad del fluido registró datos negativos, por lo tanto, los datos de resistividad del fluido y su conversión a conductividad a 25° C sólo nos muestran la variación relativa de estos parámetros en el sondeo, careciendo de valor cuantitativo.

Debido a la falta de fiabilidad de los datos de resistividad y conductividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

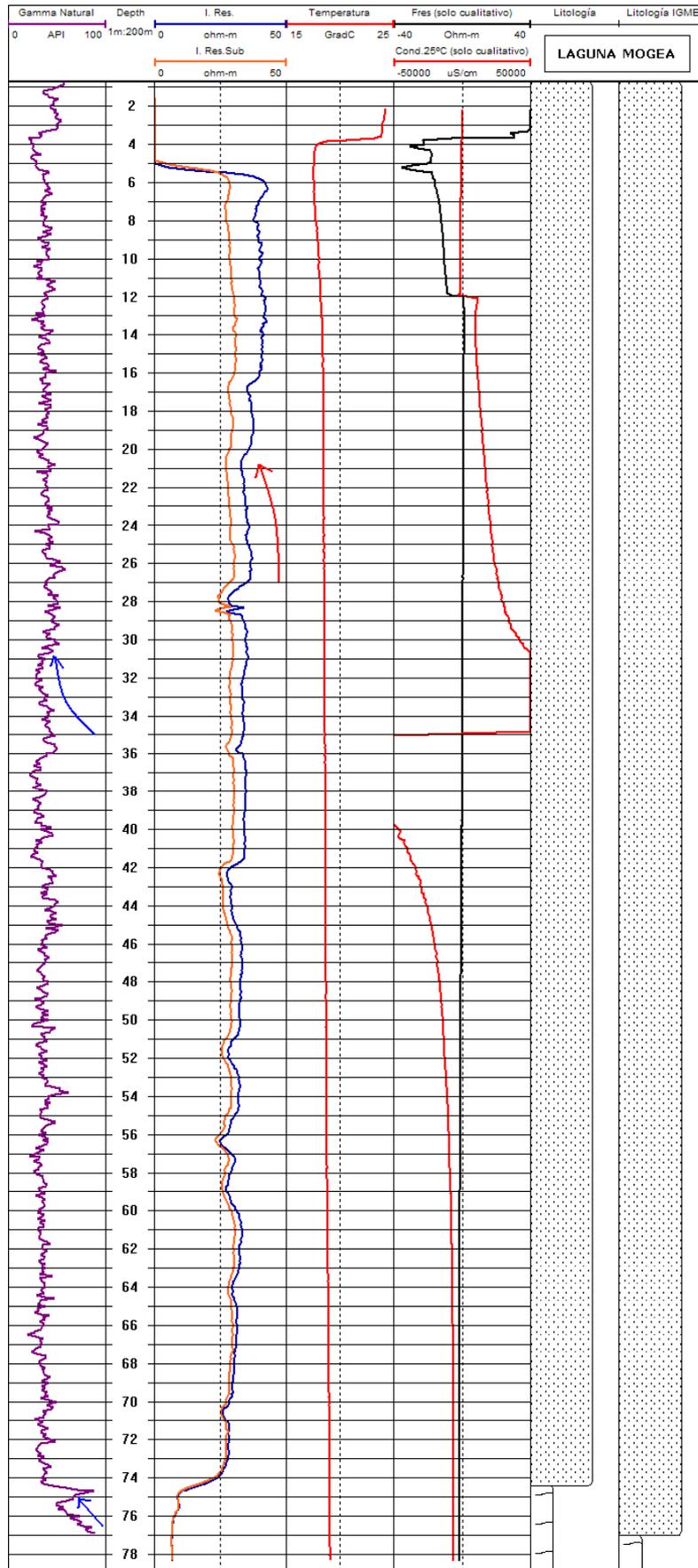


Fig. 216. Testificación en 2005 del sondeo Laguna Mogea

LOS MIMBRALES

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 6 m. Por debajo de esta profundidad se puede ver que la litología son materiales detríticos: arcillas, arenas y gravas, siendo las arenas la litología predominante, sobre todo en la parte alta y en la parte baja del sondeo.

En el registro geofísico del sondeo se observan dos tramos principales. El primero tiene 52 m de espesor y está compuesto por dos capas poco radiactivas (arenas en la parte alta y gravas en la parte baja) separadas por un nivel poco potente con predominio arcilloso. El segundo está formado por arenas y arenas con arcillas. Llega hasta la base del sondeo. Los registros geofísicos presentan una alta resistividad y variables valores de radiactividad gamma natural, indicando variaciones litológicas más acusadas que en el tramo superior.

Se han distinguido varias secuencias en este registro. Estas secuencias de primer orden suelen ser granodecrecientes a techo y secuencias verticales.

El nivel freático se encontraba a 8.6 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 19° C. La conductividad del fluido va disminuyendo progresivamente hasta los 42 m de profundidad, llegando a 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo), y comienza a aumentar, estabilizándose a los 45 m, siendo de 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado.

La clasificación en función de estas características es de agua dulce.

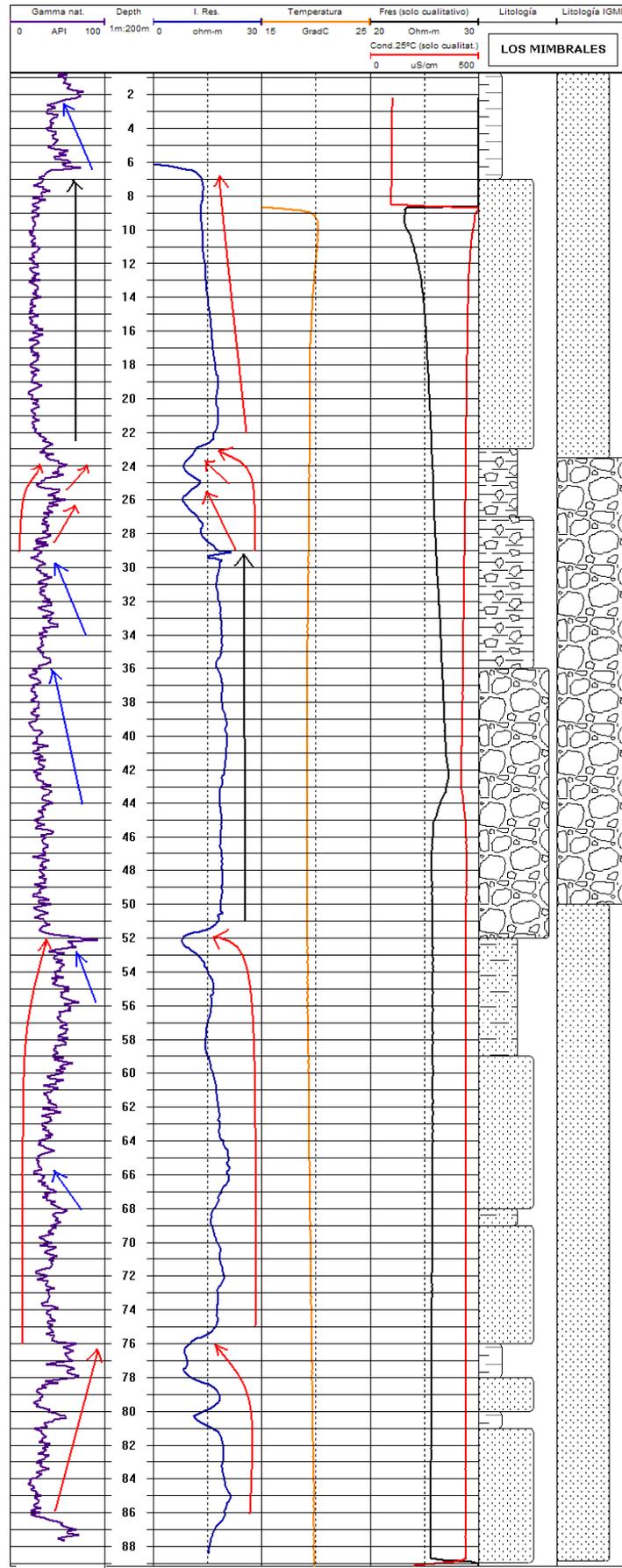


Fig. 217. Testificación en 2005 del sondeo Los Mimbrales

LA MARMOLEJA

La litología de este sondeo es fundamentalmente detrítica, de arenas, arcillas y gravas. En el registro geofísico se puede observar un tramo superior de arcillas, desde superficie hasta los 15.5 m, identificado por el aumento de los valores de radiactividad gamma y la baja resistividad de la formación.

Por debajo hay un tramo bastante homogéneo, con variaciones entre arcillas arenosas y arenas, con varios niveles de gravas reconocibles por el aumento de la resistividad del terreno, entre los 18 y 30 m de profundidad.

El tramo inferior, desde los 30 m hasta el final del sondeo está compuesto por alternancia de niveles de arenas, arcillas y arenas-arcillosas. Este tramo se caracteriza por un incremento en la radiactividad con respecto a los tramos anteriores, lo que podría traducirse en un aumento en el contenido arcilloso, y la ausencia de variación en el registro de resistividad al cambiar la litología puede deberse a un aumento de la salinidad del fluido.

La gran variación litológica permite apreciar claramente la presencia de secuencias sedimentarias tanto granodecrecientes como granocrecientes a techo.

El nivel freático se encontraba a 4 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 22° C. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda. Como consecuencia, no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

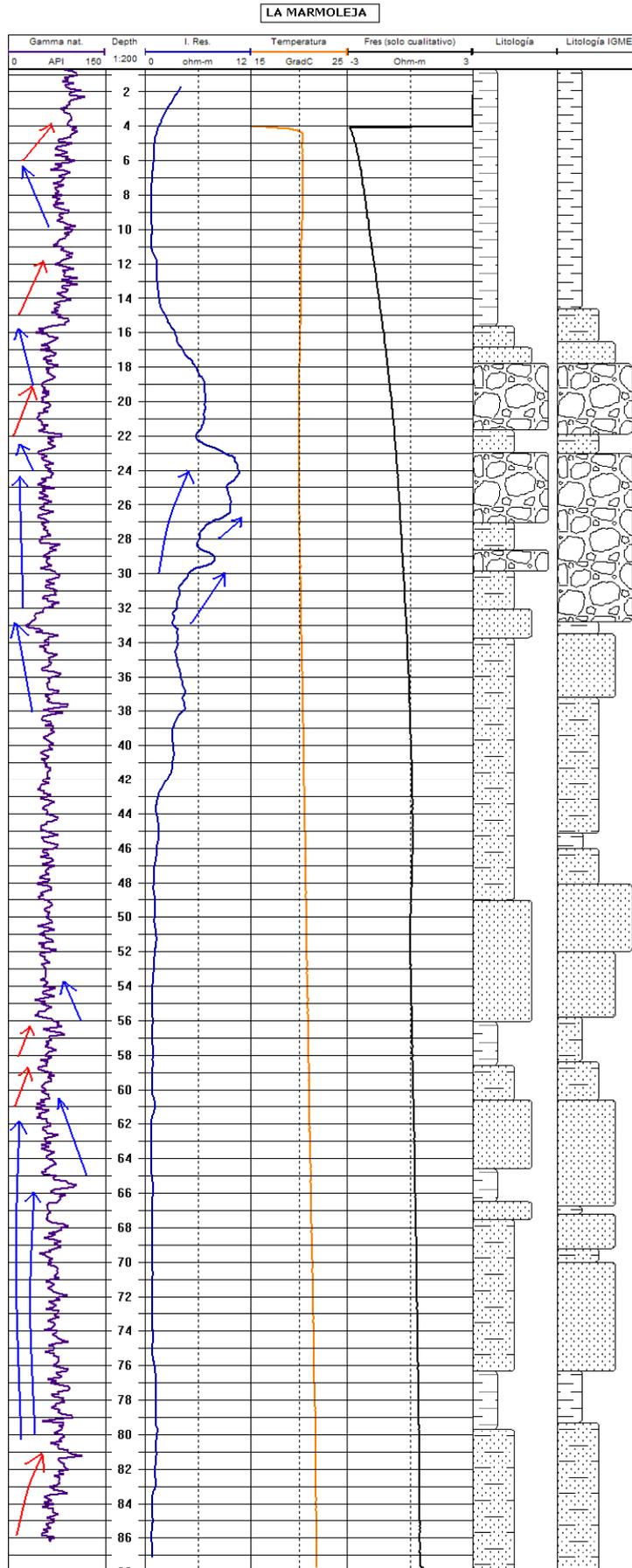


Fig. 218. Testificación en 2005 del sondeo Marmoleja

EL SEQUERO

Está constituido por materiales detríticos, arenas, arcillas y gravas. La columna litológica está formada principalmente por arenas arcillosas desde la superficie hasta el final del sondeo, a 30 m de profundidad, con niveles de gravas, caracterizado por un aumento de la resistividad, de 15.5 a 18 m y de 21.5 a 24 m, grava arcillosa, con mayor radiactividad que la anterior, de 25 a 26 m y gravilla, de menor resistividad que los niveles de gravas, de 26 a 27 m de profundidad.

Las secuencias principales son granodecrecientes a techo, de 26 a 28 m y de 15 m a la superficie, y vertical de 16 a 7 m de profundidad.

El nivel freático se encontraba a 4 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura aumenta progresivamente en profundidad, y su valor medio una vez estabilizada es de 19.5° C. Se distinguen dos zonas, de 4 a 23 m y de 23 a 30 m. El valor medio de la conductividad del fluido en la parte superior es de 4.819 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo), una vez que ya se ha estabilizado, y en la parte inferior, de 12.624 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo).

La clasificación probable en función de estas características es de agua salobre, con mayor concentración de sales a partir de los 23 m.

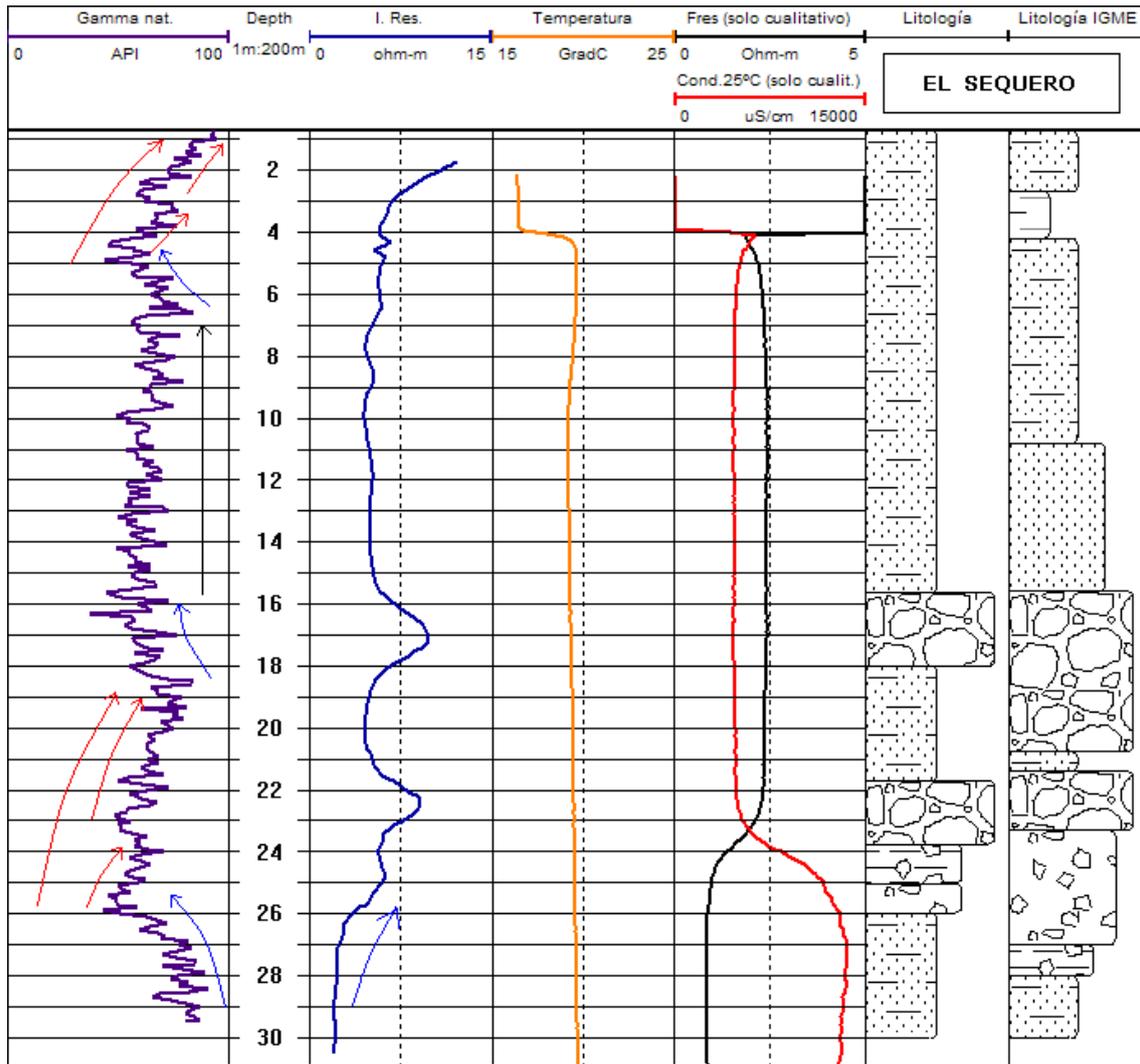


Fig. 219. Testificación en 2005 del sondeo El Sequero

FEDER 1

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 5 m. No obstante, por debajo se aprecia que está compuesto por una alternancia de materiales detríticos que incluye arenas finas, medias y gruesas, gravas y arcilla. Se han distinguido tres tramos. El tramo superior, compuesto por arcillas, es bastante homogéneo y tiene 18.5 m de espesor. Se caracteriza por tener altos valores de radiactividad gamma natural.

El segundo tramo, en posición intermedia en la columna, esta formado por arenas finas en la parte superior, que pasan progresivamente a arenas medias y gruesas en la parte inferior, con alguna capa de gravas intermedia. Su espesor es de 27 m y se caracteriza por valores de resistividad altos y bajos de radiactividad gamma natural.

El tramo inferior está constituido por arenas finas y medias y arcillas. Este tramo llega hasta la base del sondeo y se distingue por tener valores de radiactividad gamma natural más variables que los tramos anteriores.

Las secuencias sedimentarias son variables de comportamiento y espesor, pero las que dominan son granocrecientes a techo, en el primer y tercer tramo, y granodecipientes a techo, en el segundo tramo.

En el parámetro de resistividad se observan algunos tramos donde se han registrado valores negativos, esto es debido a que la sonda ha detectado algún elemento metálico en la tubería. En este sondeo se aprecia que existe una tubería de emboquille metálica hasta los 14 m y varias juntas metálicas que conectan las tubería de PVC a lo largo del sondeo.

El nivel freático se encontraba a 7.8 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 20° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 8.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo), una vez que ya se ha estabilizado, siendo ligeramente inferior entre los 9 y 16 m.

La clasificación probable en función de estas características es de agua salobre.

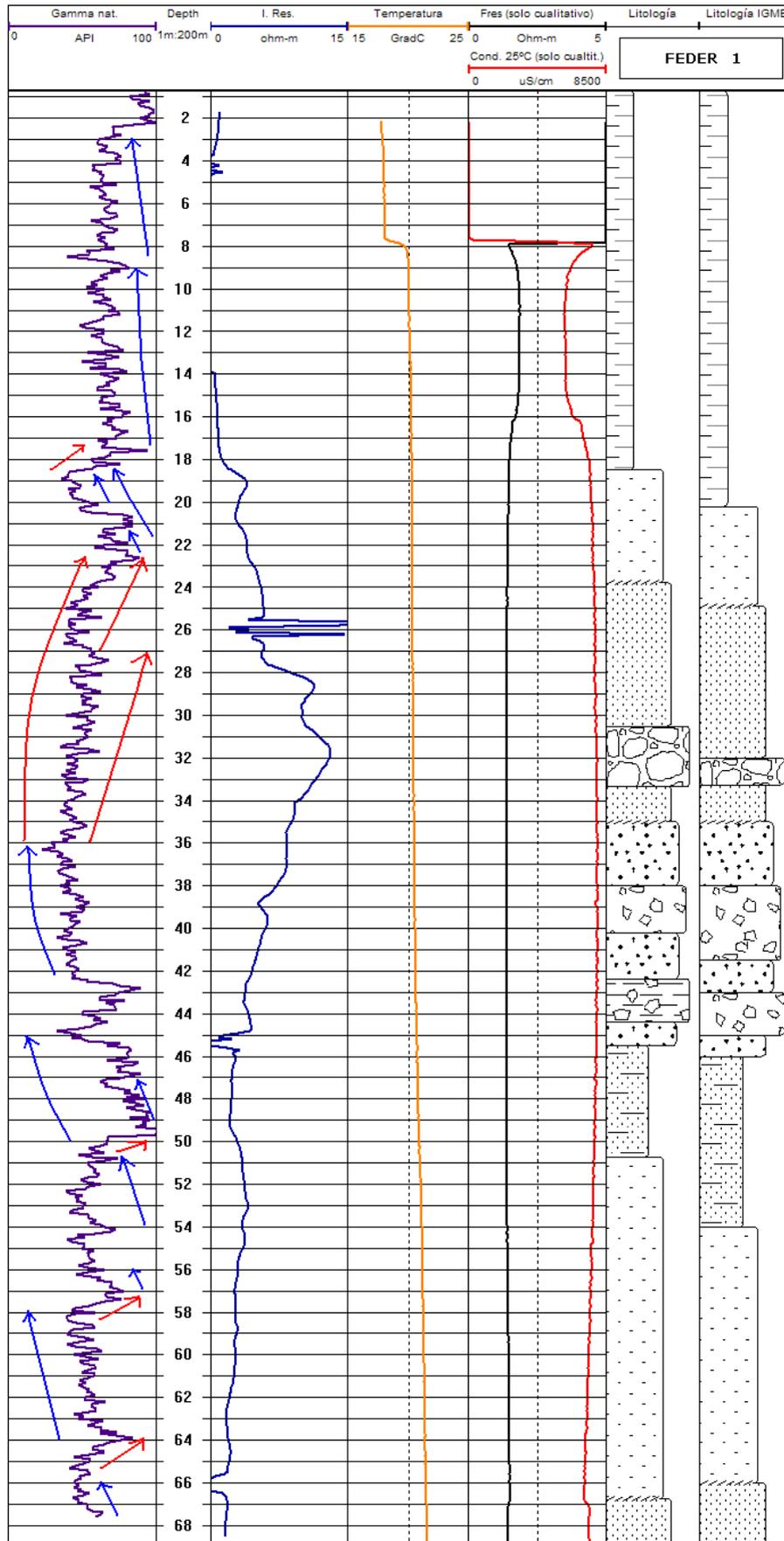


Fig. 220. Testificación en 2005 del sondeo Feder-1

ROCINA 4

Está constituido por materiales detríticos, arenas y arcillas. Se han distinguido dos tramos. El tramo superior está formado principalmente por arenas, con niveles arcillosos y arcillo-arenosos intercalados. Presenta un espesor de 54 m. Las capas de arenas se diferencian por sus valores altos de resistividad y bajos de radiactividad gamma natural, al contrario de las capas de arcillas. Se caracteriza por presentar los materiales dispuestos de tal forma que forman dos secuencias sedimentarias granocrecientes a techo (la superior, desde 0 hasta 17.5 m y la inferior, desde 17.5 hasta 37 m) y una secuencia vertical de 53 a 30 m.

El tramo inferior está compuesto por arenas arcillosas, que llegan hasta el final del sondeo. Se caracteriza por la alternancia de secuencias granocrecientes y granodecresientes a techo.

El nivel freático se encontraba a 5.5 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 22° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado.

La clasificación probable en función de estas características es de agua salobre.

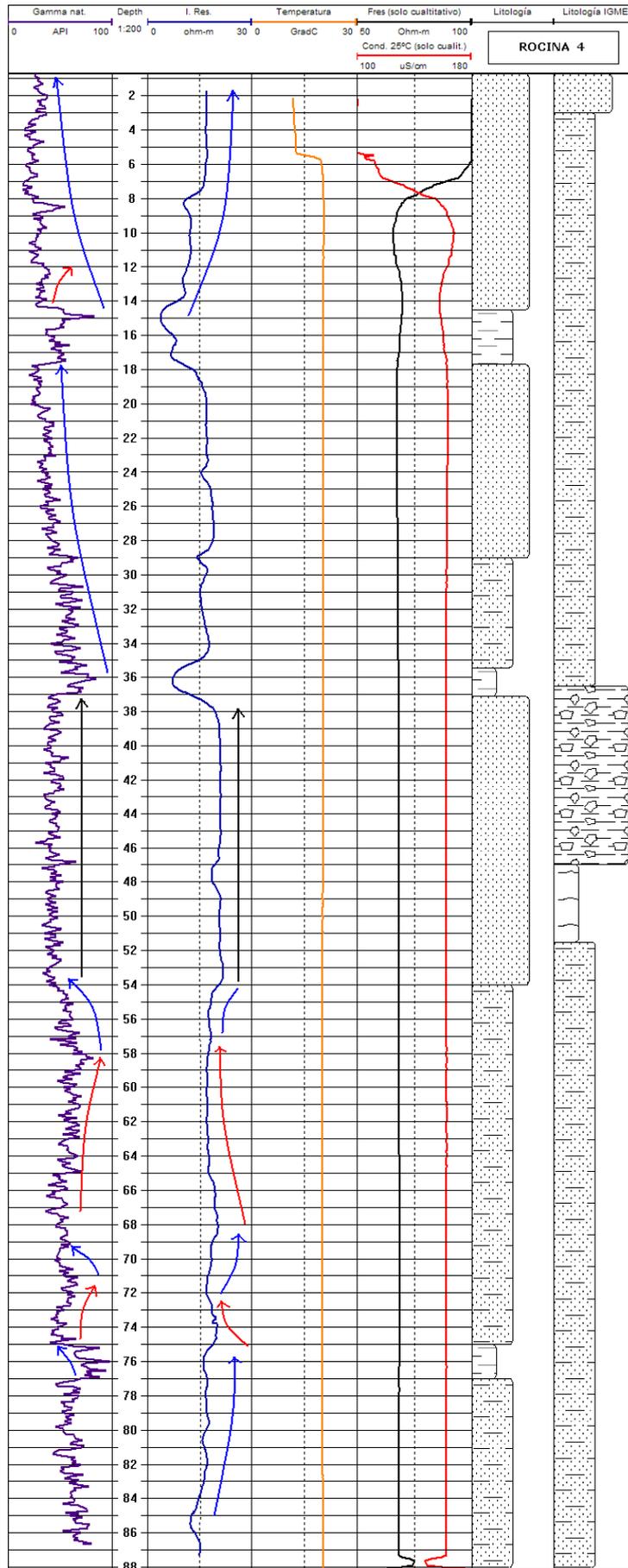


Fig. 221. Testificación en 2005 del sondeo Rocina 4

ROCINA 3

La serie atravesada por este sondeo está compuesta por materiales detríticos, variable entre arenas, gravas y arcillas. Se han distinguido tres tramos. El tramo superior está formado por arenas y arcillas. Su espesor es de 23 m y se caracteriza por valores variables entre altos, medios y bajos, tanto en el registro de resistividad como en el de radiactividad gamma natural. Se caracteriza por presentar valores altos de resistividad y bajos de radiactividad gamma en los tramos de arenas, y valores bajos de resistividad y altos de radiactividad gamma natural en los tramos arcillosos. La secuencia sedimentaria principal es granocreciente a techo.

El segundo tramo está constituido por gravas y comprende desde los 23 hasta los 49 m. Se caracteriza por tener valores de resistividad muy altos y de radiactividad gamma natural muy bajos. Es un tramo muy constante y homogéneo que sólo presenta como variación la presencia de un pequeño nivel de arcillas entre 32 y 34 m de profundidad.

El tramo inferior es más variable, como consecuencia de las alternancias de arenas y arcillas. Las secuencias también son variables, tanto granodecrescentes como granocrecientes a techo.

El nivel freático se encontraba a 4.5 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 19° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado.

La clasificación probable en función de estas características es de agua dulce.

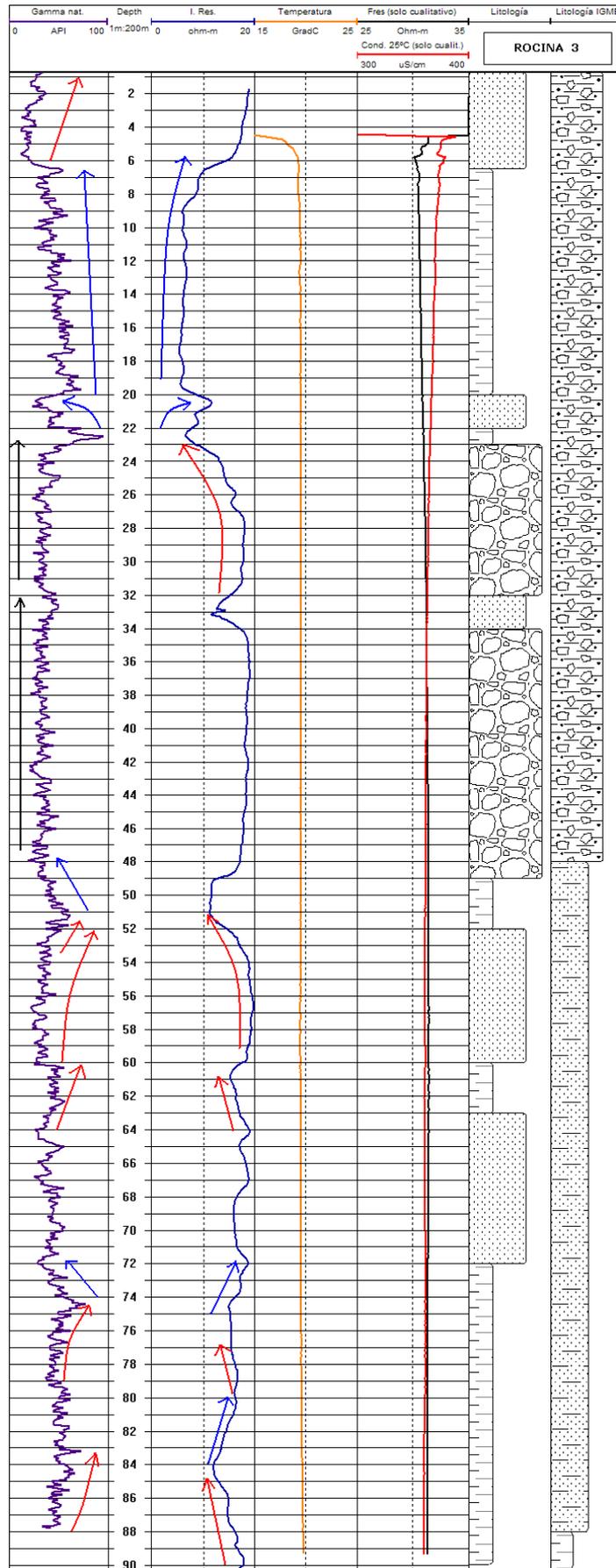


Fig. 222. Testificación en 2005 del sondeo Rocina 3

LAGUNA DE LA ANGUILA

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 5 m. Por debajo se observa que los materiales de este sondeo son principalmente detríticos, alternando entre arenas y arcillas, sobre un nivel de margas, siendo predominante la litología arenosa, sobre todo en la parte media del sondeo, donde se presenta de forma bastante homogénea formando un paquete de 32 m de potencia muy uniforme (entre 14 y 46 m de profundidad), con un tramo arcilloso intermedio entre 26 y 30.5 m.

Por encima de este paquete arenoso hay una capa arcillosa que va pasando a más arenoso en superficie, y en esta parte superior del sondeo, se distingue un tramo caracterizado por dos secuencias sedimentarias: una granodecreciente a techo (desde 26 hasta 10 m de profundidad) y otra granocreciente a techo (desde 10 m hasta superficie).

Por debajo del metro 46 la litología es variable entre arenas y arcillas y se caracteriza por la presencia de múltiples secuencias sedimentarias generalmente granocrecientes, con algunas secuencias granodecrecientes intercaladas. La columna termina con un nivel de margas a partir de los 60 m, apreciándose la disminución en la resistividad en este tramo.

El nivel freático se encontraba a 10.2 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 18° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado, con un pequeño incremento a partir de los 43 m. La clasificación probable en función de estas características es de agua dulce.

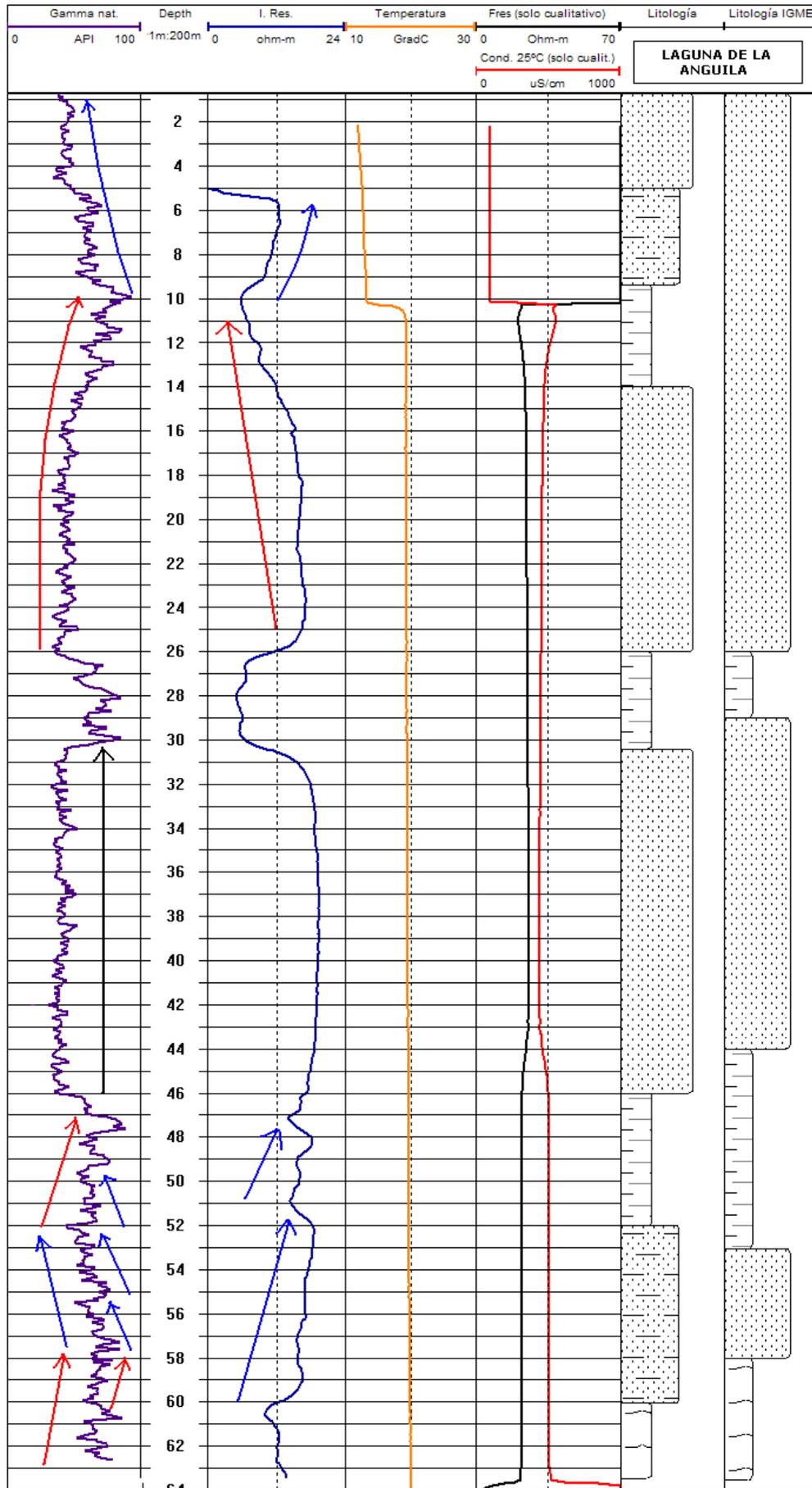


Fig. 223. Testificación en 2005 del sondeo Laguna de la Anguila

SECTOR III

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 7 m. Los materiales son detríticos, principalmente arenas con niveles más arcillosos, por lo que el comportamiento que presenta en los registros geofísicos es relativamente uniforme, al menos en el registro de radiactividad gamma natural.

En el sondeo se distinguen tres tramos: el superior alcanza desde superficie hasta los 6.5 m, donde aparece un nivel arenoso, el intermedio desde 6.5 m hasta la profundidad de 20 m, donde aparece un tramo areno-arcilloso, caracterizado por un pequeño aumento de los valores de radiactividad gamma, y el inferior, formado por arenas, alcanzaría desde esa profundidad hasta la base del sondeo.

Las secuencias primarias definidas son granodecrecientes a techo, desde el final del sondeo a 22 m y de 20 a 8 m, y dentro de ellas existen secuencias de menor magnitud, tanto granocrecientes, granodecrecientes y verticales.

El nivel freático se encontraba a 20.5 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 20° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 300 $\mu\text{S/cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado.

La clasificación probable en función de estas características es de agua dulce.

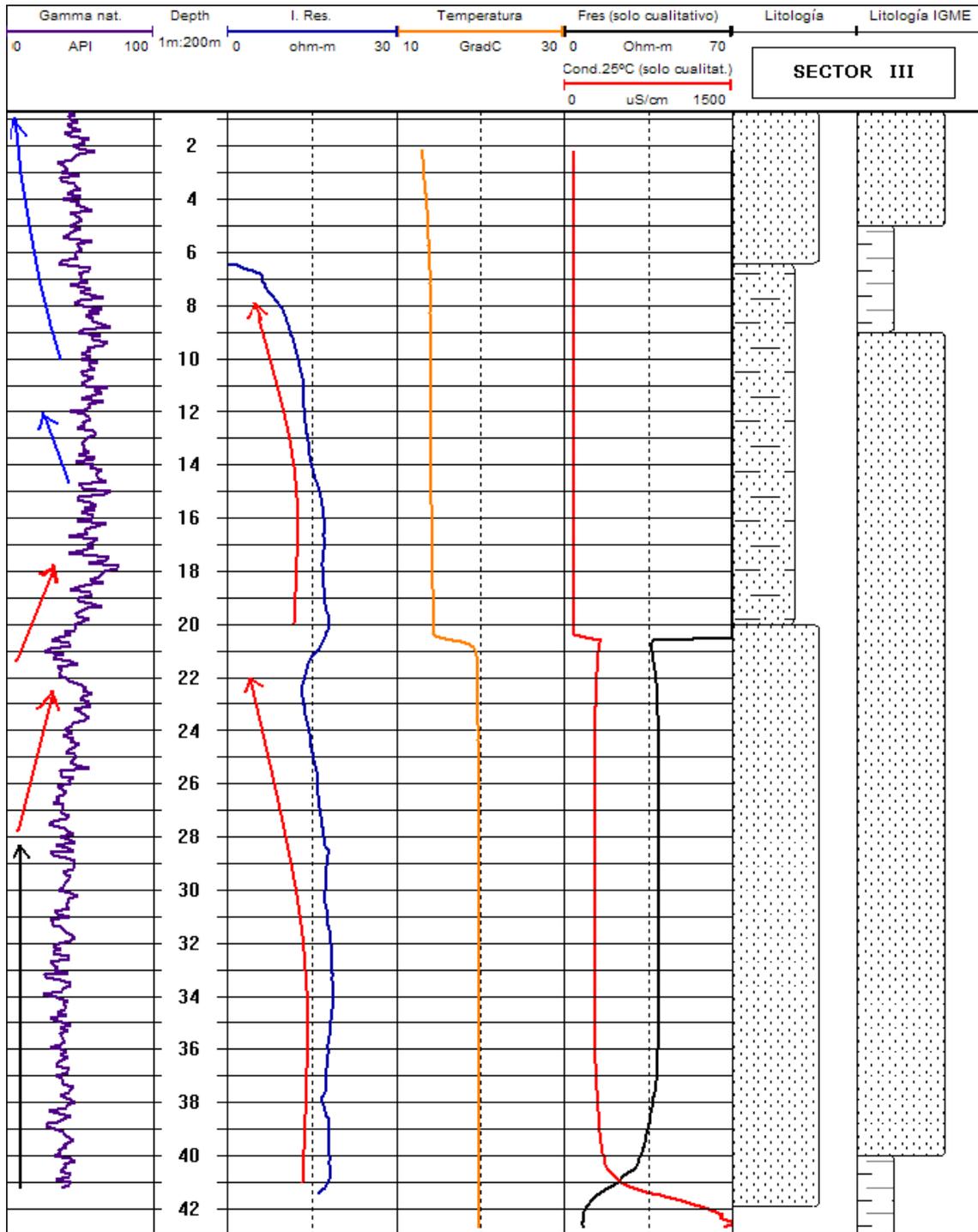


Fig. 224. Testificación en 2005 del sondeo Sector III

CABEZUELO

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 7 m.

Los materiales que constituyen éste sondeo son una alternancia de arenas y arcillas aunque son las arenas las que predominan en casi todo el sondeo, sobre todo entre el metro 7 y el metro 31, donde esta litología es casi exclusiva y muy uniforme, aunque con un claro aumento de la arcillosidad y/o disminución de la granulometría con la profundidad. Las arcillas son predominantes entre 31 y 49 m de profundidad. Los niveles arcillosos se identifican en los registros geofísicos por un aumento de la radiactividad y una disminución de la resistividad del terreno

En el tramo más superficial se distingue una secuencia primaria granocreciente a techo de 34 a 7 m de profundidad. Las secuencias sedimentarias en la parte baja del sondeo son variables, desde granocrecientes hasta granodecrecientes a techo.

El nivel freático se encontraba a 0 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 18° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 1.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado.

La clasificación probable en función de estas características es de agua salobre.

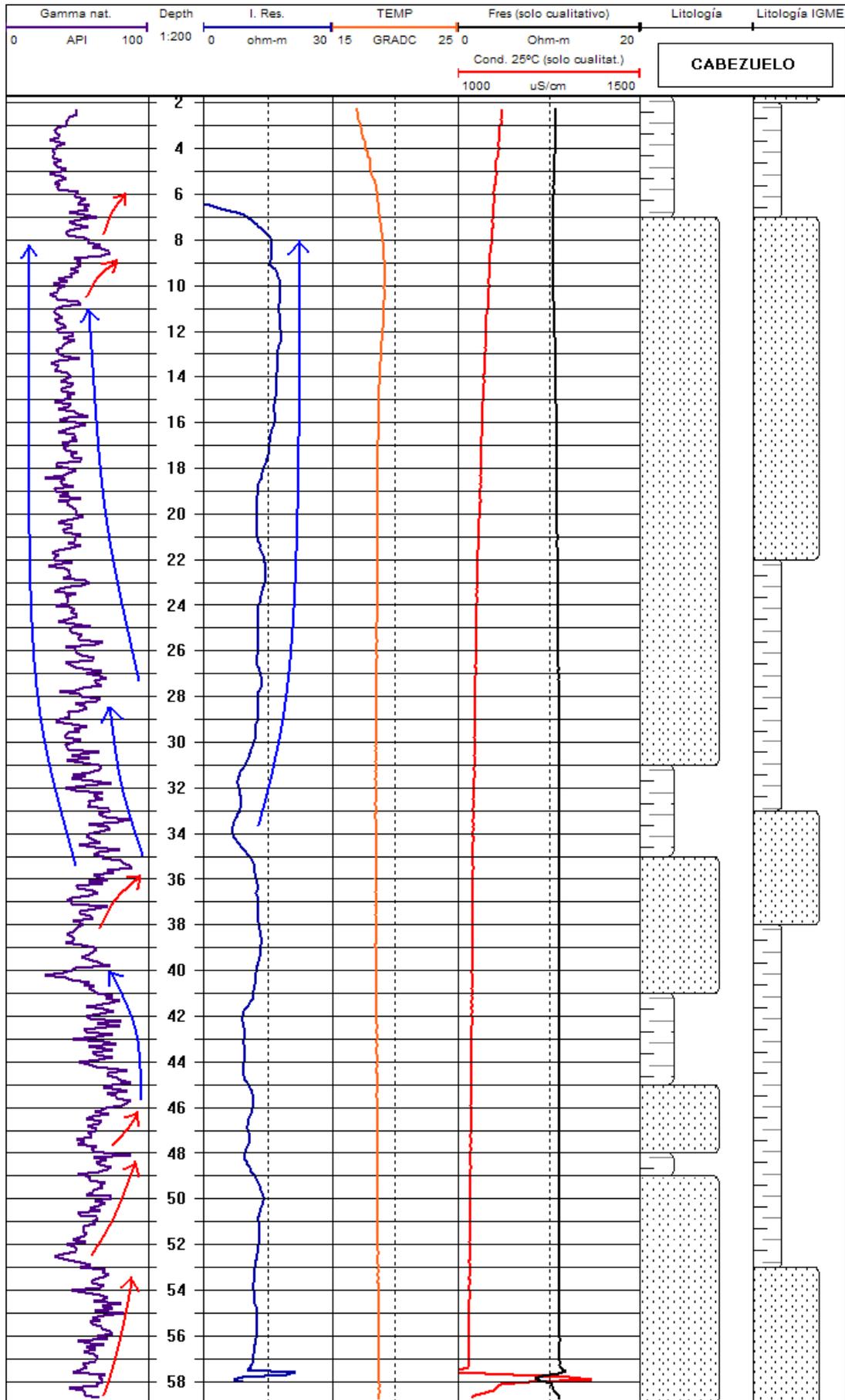


Fig. 225. Testificación en 2005 del sondeo Cabezuelo

ARROYO CAÑADA

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 5 m.

Este sondeo esta compuesto por una alternancia de arenas y arcillas, que se mantiene a lo largo de toda la serie atravesada por el sondeo. Desde superficie hasta la profundidad de 24 m se identifica un mayor predominio de arenas y arenas arcillosas, con pequeños niveles de arcilla, lo que se manifiesta en la presencia de secuencias sedimentarias granodecrescentes a techo, aunque poco definidas, siendo el valor de radiactividad gamma natural más bajo en las arenas y aumentando en las arcillas.

Por debajo de la profundidad de 24 m y hasta los 34 m los materiales son predominantemente arcillosos, con algunos niveles arenosos también poco definidos, al menos en el registro de radiactividad gamma natural, que disminuyen ligeramente en estas zonas arenosas, y otras capas fundamentalmente de arcilla, como por ejemplo entre 29-31 m. Por debajo de este tramo, las arenas son más limpias, lo que se manifiesta por una disminución el valor de la radiactividad.

El nivel freático se encontraba a 3 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 23° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado.

La clasificación en función de estas características es de agua dulce.

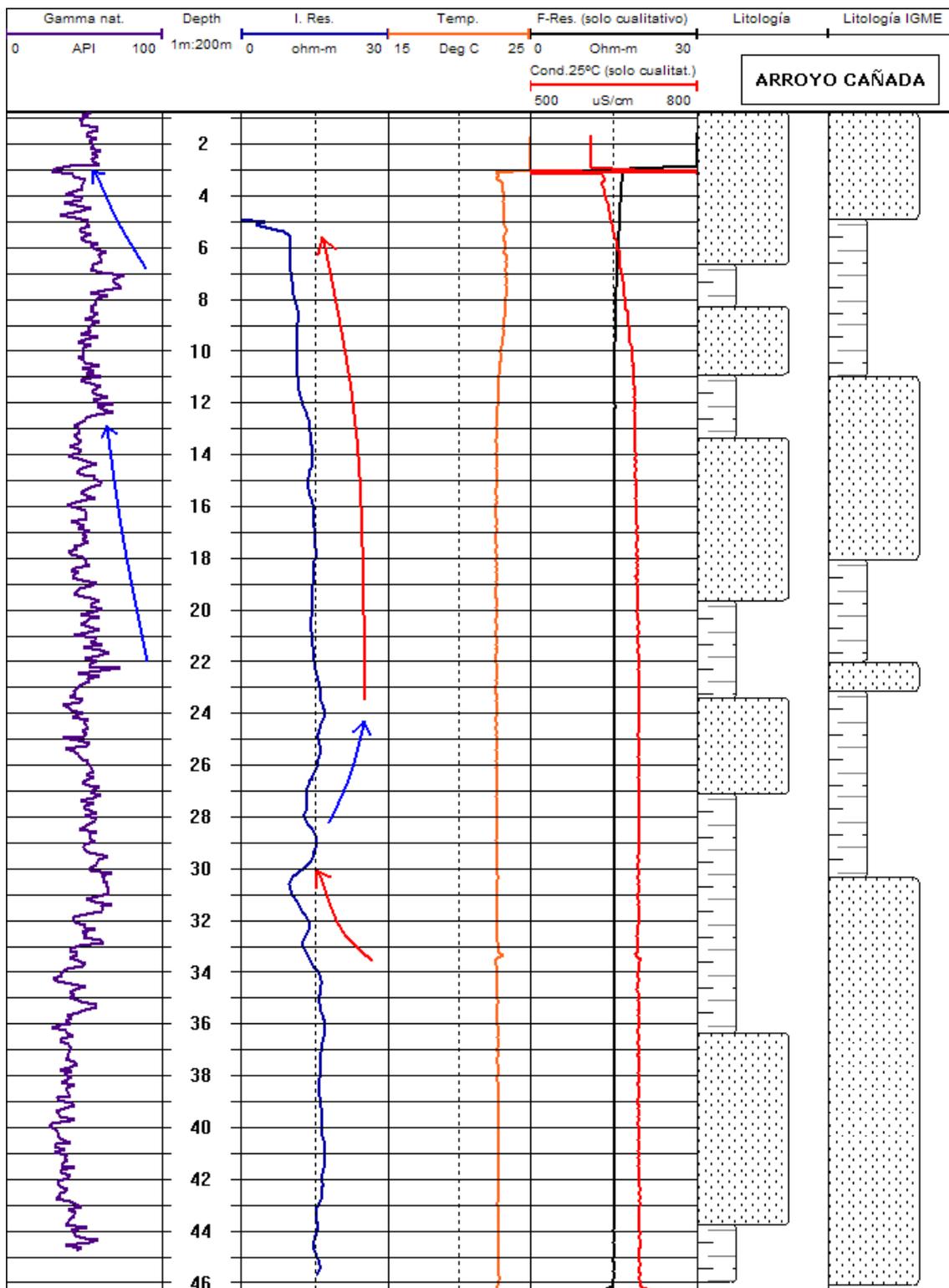


Fig. 226. Testificación en 2005 del sondeo Arroyo Cañada

LOS BODEGONES

Algún elemento constructivo del sondeo ha distorsionado los valores de resistividad de la formación en los primeros 5 m. Por debajo, este sondeo está constituido por materiales detríticos, básicamente arenas, con algún tramo arcilloso, que es difícil de distinguir, debido a la uniformidad de valores de radiactividad gamma natural y a que la resistividad es también bastante uniforme, posiblemente por un aumento de la salinidad del fluido.

Las secuencias sedimentarias granocrecientes a techo sólo se observan en la parte alta y en la parte baja del sondeo.

El nivel freático se encontraba a 2.3 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 18° C. Los valores de resistividad del fluido y, por lo tanto, de conductividad a 25° C son incoherentes debido a un fallo en el funcionamiento de la sonda. Por lo tanto, sólo se tendrá en cuenta la variación relativa de la conductividad, que va disminuyendo progresivamente con la profundidad.

Debido a la falta de fiabilidad de los datos de resistividad y conductividad del fluido no se ha podido clasificar el tipo de agua de este sondeo.

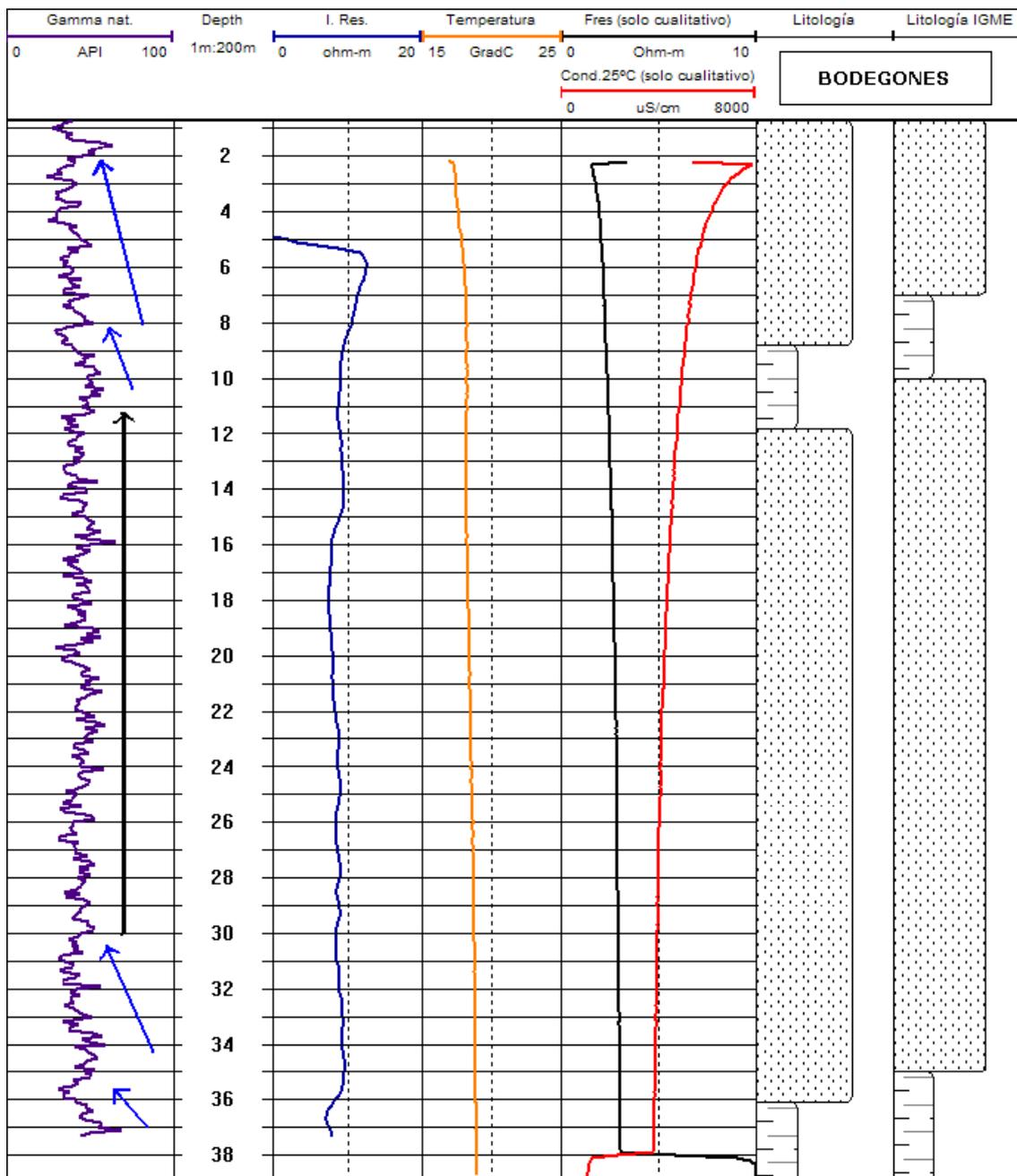


Fig. 227. Testificación en 2005 del sondeo Los Bodegones

HATOVILLA I – 2

Los materiales que se encuentran en éste sondeo son arenas finas con margas intercaladas. Se distinguen bien las capas de arenas por sus valores de alta resistividad y bajos de radiactividad gamma natural, al contrario que las margas. Las arenas predominan en casi todo el sondeo, sobre todo en los 16 metros superiores, donde forman una capa muy homogénea y uniforme.

Todo el conjunto forma un gran secuencia sedimentaria granocreciente a techo, que se compone de secuencias de menor rango, con un comportamiento sedimentario similar.

El nivel freático se encontraba a 0 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica.

El valor de la temperatura media una vez estabilizada es de 19° C. El valor medio de la conductividad del fluido es de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor relativo) una vez que ya se ha estabilizado, distinguiéndose un ligero aumento en el metro 12 y uno más brusco a partir de 28 m.

La clasificación probable en función de estas características es de agua dulce.

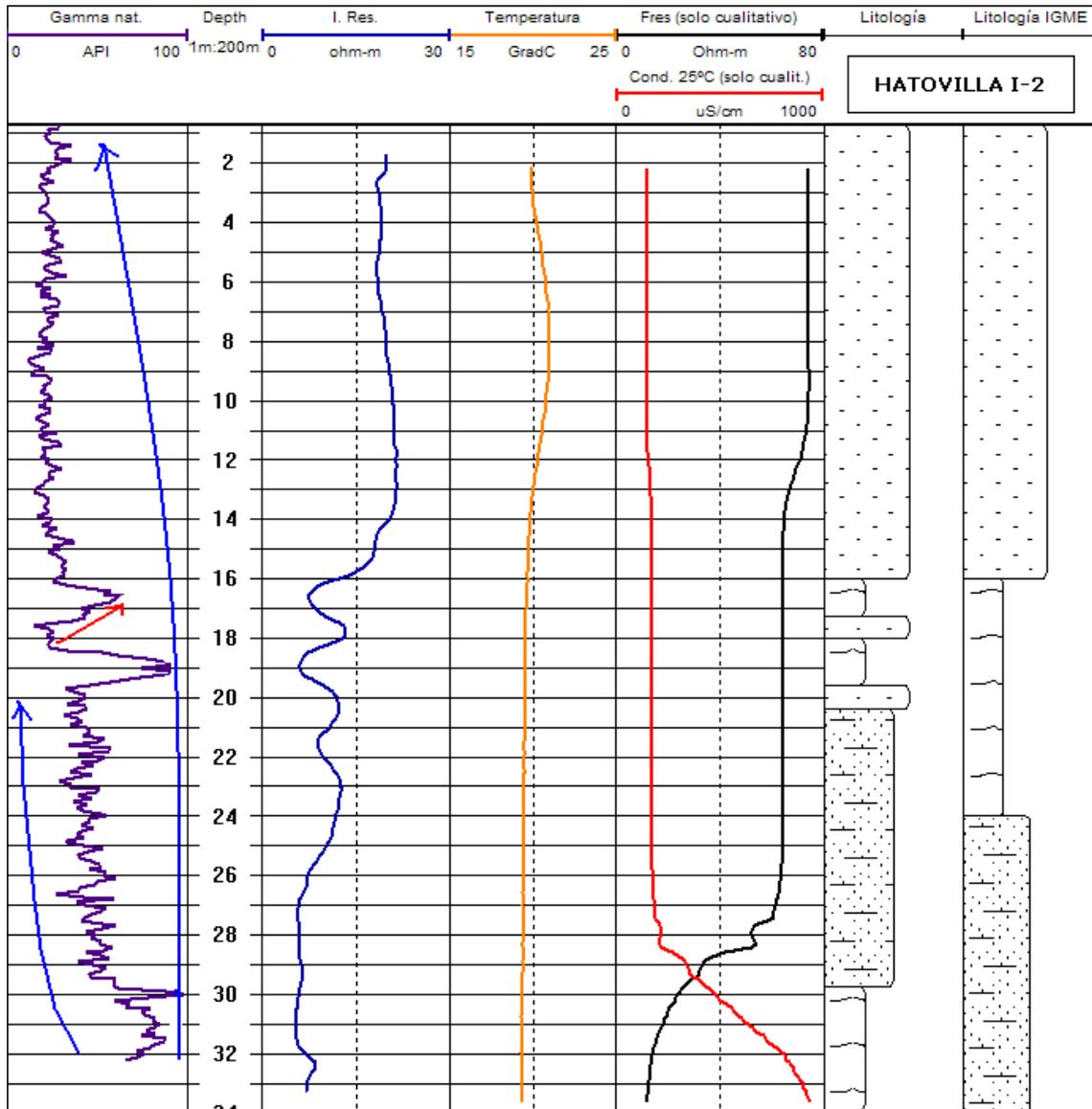


Fig. 228. Testificación en 2005 del sondeo Hatovilla I-2

IV.3 Ensayos previos por métodos eléctricos

IV.3.1 Introducción

El objetivo del presente estudio es la ejecución de medidas paramétricas en puntos de columna litológica conocida con el fin de poder definir guías de identificación de los horizontes litológicos y estratigráficos más representativos. Las mediciones de campo fueron realizadas por asistencia técnica contratada con la empresa International Geophysical Technology (IGT).

El empleo de métodos de prospección geoeléctrica en estos ensayos se consideró justificado para verificar la existencia de suficiente contraste de resistividad eléctrica entre los niveles detríticos y los materiales arcillosos en que se intercalan aquellos, con independencia de la unidad geológica a que pertenezcan. Por otra parte las zonas de transición entre agua dulce y agua salada, cuya delimitación resulta de especial interés para los objetivos del Proyecto, deben de presentar normalmente un contraste acusado en la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo. En consecuencia cabe esperar que algunos métodos de prospección geoeléctrica resulten efectivos para determinar la posición de tales interfases a partir de medidas realizadas desde la superficie del terreno y a un rango de profundidad suficiente.

Como ya se ha mencionado anteriormente, todos los trabajos geofísicos realizados en el presente Proyecto tienen carácter de ensayo para definir guías de identificación de ciertos horizontes estratigráficos mediante métodos geofísicos. La situación ideal en cualquier ensayo de métodos geofísicos es poder apoyar la interpretación de sus resultados en medidas paramétricas realizadas en sondeos localizados en las zonas de trabajo de los que se disponga de la correspondiente columna litológica, siendo este el criterio con el que han sido seleccionadas las zonas de trabajo.

IV.3.2 Breve explicación de los métodos utilizados en el estudio

[Este apartado es un extracto del Informe original presentado por la compañía IGT]

En los trabajos realizados se han utilizado los métodos de prospección geoeléctrica en sus variantes de SEDT y Tomografía o Perfiles Eléctricos. Con el fin de contribuir a la mejor comprensión de los resultados de los ensayos consideramos procedente explicar aquí aunque sea de forma resumida las características más destacables de cada uno de los métodos geofísicos empleados en el curso de estos trabajos.

IV.3.2.1 Sondeos EM de Dominio de Tiempos (SEDT)

La resistividad eléctrica de las formaciones rocosas depende de su naturaleza litológica, porosidad, saturación, salinidad del agua, etc. Por ello, y dentro de ciertos márgenes de variación, resulta posible correlacionar resistividad con litología en ambientes geológicos determinados.

Una de las variantes de la prospección geoelectrica más ampliamente utilizada es la de los Sondeos Eléctricos. De modo general el método del Sondeo Eléctrico se puede definir como una técnica de prospección capaz de determinar la distribución de la resistividad del subsuelo en la vertical del punto de medida, así como el espesor de las diversas “capas”. La correcta aplicación del método del Sondeo Eléctrico exige que el modelo geológico de la zona de estudio cumpla una serie de condiciones entre las que las más relevantes son las siguientes:

- a) Existencia de contrastes suficientes de resistividad entre las diversas capas del subsuelo.
- b) Que las referidas capas sean planas y se sitúen en disposición horizontal o subhorizontal.
- c) La extensión lateral de las capas debe ser teóricamente infinita y en la práctica muy superior a las dimensiones del dispositivo de medida que se utilice para la toma de datos.

Cuanto más se aleje la realidad de este modelo teórico, mayores serán las desviaciones o errores producidos en la interpretación de las mediciones.

Existen dos variantes principales de ejecución e interpretación de los Sondeos Eléctricos en el ámbito de profundidad que interesa a los estudios hidrogeológicos. Son las siguientes:

- a) Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)
- b) Sondeos Electromagnéticos de Dominio de Tiempos (SEDT)

El método de los SEV que es el más conocido porque se ha empleado durante varias décadas como método geofísico básico en las aplicaciones hidrogeológicas. Opera haciendo circular una corriente continua por el terreno, empleando una serie de electrodos para introducir la corriente y para medir la diferencia de potencial producida mediante un dispositivo lineal, con una longitud total varias veces superior a la profundidad a investigar. Esta forma de medida implica que aunque los resultados de las medidas se asignan de forma puntual a la vertical del punto central del dispositivo formado por los electrodos, las medidas involucran un volumen rocoso considerable en el entorno de ese punto. En la mayoría de las situaciones geológicas este hecho representa un inconveniente, porque promedia los efectos de posibles cambios laterales en la distribución de los materiales del subsuelo, pudiendo dar lugar a resultados imprecisos.

El método de los SEDT es una variante del Sondeo Eléctrico en la prospección geoelectrica, que se diferencia del SEV clásico en que opera por inducción, sin contacto eléctrico del dispositivo de medida con el terreno. De forma muy esquemática su funcionamiento es el siguiente: a través de un bucle de cable situado sobre el terreno se hace circular un pulso de corriente de alta intensidad que se interrumpe de forma brusca en el intervalo de algunos microsegundos. La interrupción de la corriente produce un campo magnético variable que a su vez induce una corriente en el subsuelo con un comportamiento de tipo difusivo. Esta corriente migra hacia zonas más profundas y se extingue en el período de algunos milisegundos. Las medidas de la f.e.m. del campo EM secundario asociado a

estas corrientes de difusión realizadas en diversas ventanas de tiempo son en consecuencia representativas de las características eléctricas (resistividad) del subsuelo. Se emplea para ello como sensor una bobina con un área efectiva equivalente del orden de 100 m² que se dispone respecto al bucle transmisor según diversas configuraciones. Algunas de las más comunes se indican en la Figura 229. Un concepto básico de este método es que tiempos de lectura crecientes corresponden a rangos crecientes de profundidad investigada.

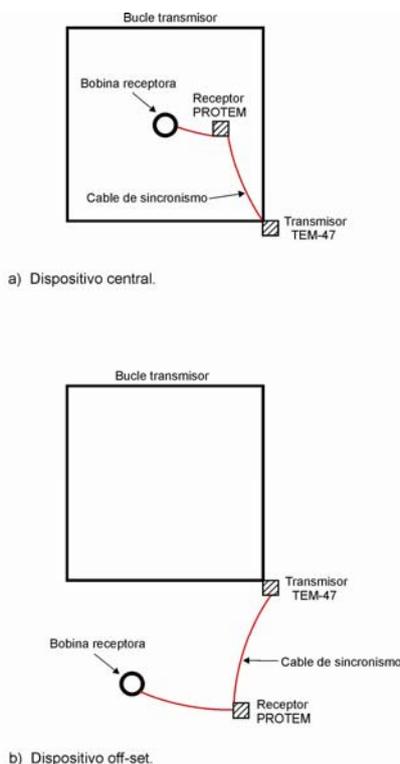


Fig. 229. Dispositivos más comunes para las medidas de SEDT

A partir de los valores de f.e.m. medidos se calculan los correspondientes valores de resistividad aparente, que representados en función del tiempo de lectura dan origen a las curvas de resistividad aparente, similares a las de los SEV. Estas curvas representan la variación integrada de la resistividad del subsuelo en función de la profundidad. La escala horizontal de las curvas de resistividad aparente expresada en función del tiempo correspondiente a los diferentes canales de medida es equivalente a una escala de profundidad ya que, como se ha dicho, la señal correspondiente a tiempos de medida crecientes involucra el efecto de los materiales del subsuelo situados a rangos crecientes de profundidad.

El método de los SEDT tiene particularidades que le diferencian del de los SEV, haciéndole más o menos ventajoso para el estudio de cada caso particular, dependiendo de las características del modelo geológico, factores logísticos, profundidad a investigar, etc. Las características diferenciadoras más relevantes entre ambos métodos son las siguientes:

- a) Las medidas de los SEDT son representativas de los materiales situados en la vertical del bucle utilizado para generar el campo EM transitorio. Este bucle es normalmente de dimensiones inferiores a la profundidad investigada. Por ello tales medidas son más focalizadas que las obtenidas mediante SEV, en los que se involucra el efecto de un considerable volumen rocoso cuando la distancia entre los electrodos de emisión AB es grande, y siempre AB es muy superior a la profundidad investigada. Esta mayor focalización contribuye a minimizar la influencia de los posibles cambios laterales de resistividad o de espesor de las capas.
- b) La capacidad de profundización de los SEDT depende directamente del tamaño del bucle y de la intensidad de los pulsos de corriente. También depende de la distribución de resistividad de los materiales del subsuelo, siendo tanto mayor cuanto mayor sea la resistividad de éstos. En cualquier caso para igualdad de profundidad investigada el tamaño del bucle requerido para la ejecución de un SEDT es muy inferior a la apertura necesaria entre los electrodos de emisión de un dispositivo de medida mediante SEV.
- c) A diferencia de los SEV, que aportan información desde los niveles más superficiales de la sección, los SEDT dejan sin resolver la zona más superficial hasta una profundidad que es directamente proporcional al tamaño del bucle transmisor, pero que puede estimarse en un pequeño porcentaje de la dimensión de sus lados.
- d) Desde el punto de vista logístico el método de los SEDT es ventajoso respecto al de los SEV puesto que, para igualdad de profundidad a investigar, el tendido de un bucle rectangular de pequeño tamaño es siempre más sencillo que el extendimiento de un dispositivo lineal a distancias muy superiores al tamaño de uno de los lados del bucle.
- e) El grado de fiabilidad y repetibilidad de las medidas de los SEDT es generalmente muy superior a las de los SEV debido a dos causas principales. Por una parte, a no estar afectadas por las condiciones superficiales del terreno por no requerir contacto físico de los electrodos con el medio rocoso, y por otra parte, más importante aún, porque las medidas en un determinado SEDT son el resultado de promediar las correspondientes a centenares de ciclos de medida que se repiten en el intervalo de algunos minutos.

IV.3.2.2 Tomografía o Perfil Eléctrico

El método geofísico de la Tomografía eléctrica o de Perfiles eléctricos tiene por objetivo determinar de forma muy detallada la distribución real de la resistividad del subsuelo en forma de sección a lo largo de un perfil y hasta un rango de profundidad que puede superar el centenar de metros, a partir de los valores de la resistividad aparente obtenidos mediante medidas efectuadas en la superficie del terreno por métodos convencionales de corriente continua.

El factor clave de esta técnica es el número y distribución de las medidas de campo ya que de ello depende la precisión de sus resultados y la profundidad investigada. Como regla general, un estudio mediante Tomografía eléctrica requiere la obtención de un número muy alto de datos, con un pequeño espaciado entre medidas para aumentar la resolución lateral y también que las medidas se realicen involucrando de forma progresiva a varios rangos diferentes de profundidad. El resultado final de este tipo de estudios es una sección con la distribución de la resistividad del subsuelo, interpretable directamente en términos comprensibles desde el punto de vista geológico-geotécnico, porque en ella son fácilmente observables los elementos tales como contactos entre unidades geológicas de diferente naturaleza, zonas de falla y accidentes puntuales que representen un contraste suficiente en la distribución de la resistividad del medio rocoso.

Las medidas de resistividad aparente para los estudios de Tomografía eléctrica pueden hacerse utilizando diversas configuraciones de electrodos del dispositivo de medida. Una de estas configuraciones o dispositivos es el denominado dipolo-dipolo, que tiene la ventaja de proporcionar una mayor resolución lateral que otros dispositivos como el Schlumberger simétrico o el polo-dipolo que también se emplean en este tipo de estudios. Para realizar las medidas con el dispositivo dipolo-dipolo, se hace circular por el terreno un pulso de corriente continua mediante dos electrodos (A,B) clavados en el suelo y se mide la intensidad (I) de esta corriente. Mediante otros dos electrodos (MN) se mide la diferencia de potencial (V) que se establece entre ellos al circular la mencionada corriente por el subsuelo. Para cada localización del dipolo emisor (AB) se miden los valores de I y de V para varias posiciones diferentes del dipolo receptor (MN). A continuación se desplaza el dispositivo completo (A,B - M,N) una distancia igual a AB y se repite el proceso de medida. Este esquema es el que se representa en la Figura 230.

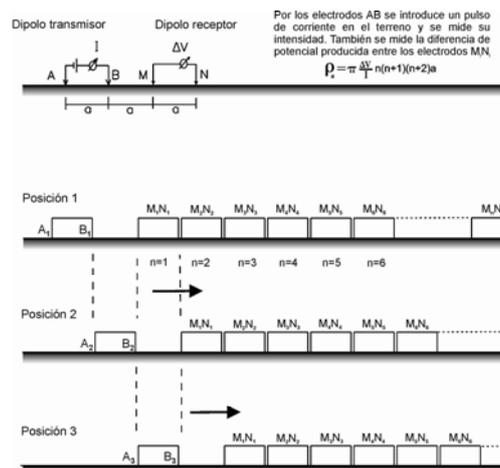


Fig. 230. Dispositivo dipolo-dipolo para las medidas de resistividad aparente en tomografía

A partir de los valores de V e I medidos sobre el terreno se calcula para cada posición de los electrodos un valor de resistividad aparente mediante la expresión $\rho_a = K \cdot V/I$, siendo K una constante geométrica que depende de las distancias entre electrodos. Estos valores de ρ_a se asignan según el

convenio que se detalla en la Figura 231.

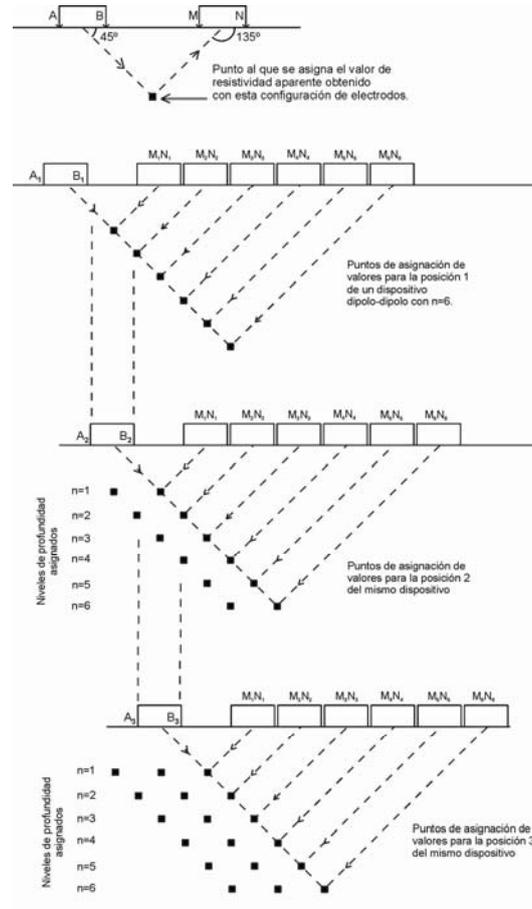


Fig. 231. Asignación de valores en las medidas de tomografía con dispositivo dipolo-dipolo.

Al desplazar el dispositivo de medida a lo largo del perfil y asignar los valores de la forma indicada se obtiene una distribución de valores de ρ_a que refleja las variaciones de este parámetro en dos dimensiones a lo largo del perfil medido. La seudosección obtenida es interpretable en los términos de interés para cada caso, de forma cualitativa y mediante modelación e inversión. La capacidad de profundización de estas medidas depende de la distancia entre los electrodos A,B (dipolo emisor) y de recepción M,N (dipolo receptor). Por su parte la capacidad de resolución lateral es tanto mayor cuanto menor sea la distancia entre los electrodos del dipolo receptor (M,N). Para la ejecución de un estudio concreto han de compaginarse ambos factores, ya que si se opera con muy pequeño espaciado entre electrodos se obtiene una buena resolución lateral pero a costa de perder capacidad de profundización. Lo opuesto ocurre en el caso contrario.

Las secciones de resistividad del terreno obtenidas mediante los estudios de Tomografía eléctrica pueden ser muy complejas dependiendo de la heterogeneidad del terreno, pero en todo caso pueden interpretarse de forma objetiva en términos geológicos o hidrogeológicos.

IV.3.3 Descripción del trabajo de campo realizado

[Este apartado es un extracto del Informe original presentado por la compañía IGT]

IV.3.3.1 Trabajos de campo

En cada zona seleccionada, cuya localización se indica en la Figura 232, se han realizado los siguientes trabajos:



Fig. 232. Plano de situación general de los ensayos previos geoelectríficos efectuados

Zona 1 - Sondeo VETALENGUA

- Tomografía eléctrica sobre un perfil de 1300 m de longitud medido con dispositivo dipolo-dipolo, con $a= 10$ metros y $n= 20$.
- 3 SEDT con bucles de 200x200 m

Zona 3 - Sondeo MARISMILLAS

- 18 SEDT con bucles de 100x100 m distribuidos contiguos y agrupados en un perfil de 1700 m de longitud.

Zona 7 - Sondeo SANTA OLALLA

- 1 SEDT con bucle de 200x200 m

Zona 8 - Sondeo PALACIO DE DOÑANA

- 3 SEDT con bucle de 200x200 m.

En cada entorno la disposición de las medidas se vio limitada por las condiciones de acceso impuestas por la Dirección del Parque Nacional de Doñana y el reducido espacio de tiempo disponible para las operaciones de campo.

Las medidas de los SEDT se hicieron en la modalidad de bobina receptora situada en el centro del bucle transmisor, operando con sincronismo mediante cable de referencia entre el transmisor y el receptor y con un tiempo de integración de la señal igual a 2 minutos. En cada SEDT se efectuaron tres series de medidas independientes correspondientes a ciclos de emisión de la corriente en el bucle transmisor iguales a 2'5 Hz (LO), 6'25 Hz (MD) y 25 Hz (HI). Para cada una de ellas se midió el decaimiento de la f.e.m. del campo EM secundario en 20 ventanas distribuidas a lo largo del tiempo según se detalla en la Tabla I, que puede consultarse en el Anexo Digital IV-3 del presente Informe.

Estas medias se hicieron en general sin ninguna interferencia electromagnética reseñable, de modo que los datos obtenidos pueden catalogarse como de buena calidad, lo cual incide sin duda en la representatividad y fiabilidad de los resultados deducidos de su interpretación. Por lo que respecta a las medidas de la resistividad aparente del terreno en el perfil estudiado mediante tomografía eléctrica en la Zona de Vetalengua cabe señalar que su ejecución resultó difícil por dos causas principales: en primer lugar la sequedad del terreno arenoso hizo que la resistencia de contacto de los electrodos del dispositivo de medida con el terreno fuera muy alta y así la intensidad de la corriente que se consiguió hacer circular por el subsuelo fue mucho más baja de lo que hubiera sido deseable. Por otra parte las diferencias de potencial medidas en los diversos dipolos receptores fueron muy bajas debido al carácter acusadamente conductor del subsuelo a partir de los primeros metros. En consecuencia las medidas de diferencia de potencial fueron poco fiables a partir de los dipolos números 10-12, dependiendo de las zonas. No obstante en todos los casos se intentó obtener medidas hasta el dipolo número 20.

IV.3.3.2 Instrumentación empleada

Para la realización de estos ensayos se han utilizado los equipos geofísicos propiedad de International Geophysical Technology, S.L. que se relacionan a continuación.

El equipo para medidas de los SEDT ha consistido en un sistema PROTEM fabricado por Geonics Ltd, compuesto por los elementos siguientes:

- Transmisor modelo TEM-57 alimentado por un generador Honda de 4 KVA
- Receptor PROTEM
- Bobina receptora de baja frecuencia con un área equivalente a 100 m²
- Cables especiales y elementos auxiliares

El equipo para medidas de Tomografía eléctrica estuvo constituido por los siguientes elementos:

- Transmisor Vip-3000 de la marca Iris Instruments alimentado por un generador de 3 KVA. Opera con pulsos de corriente cuadrados y dipolares de duración variable e intensidad entre 0.04 y 4 A seleccionables por el operador.
- Receptor Elrec-10 de la marca Iris Instruments. Permite la medida simultánea de diferencia de potencial en diez dipolos y realiza el almacenamiento de los datos en forma digital en su memoria interna, además del análisis estadístico de las repeticiones de las medidas en cada dipolo.
- Electrodo de acero (AB) para la inyección de corriente en el subsuelo y (MN) para las medidas de diferencia de potencial. Sistema de cables especiales multiconductor desarrollado por IGT con salidas múltiples para medida simultánea con varios dipolos seleccionables mediante un conmutador especial del tipo *roll-along* que los conecta al receptor modelo Elrec-10.

IV.3.4 Procesado de los datos y presentación de los resultados

[Este apartado es un extracto del Informe original presentado por la compañía IGT]

IV.3.4.1 Sondeos EM de Dominio de Tiempos (SEDT)

Las curvas de resistividad aparente que constituyen el documento básico para la interpretación de los SEDT en términos de interés geológico se calculan a partir de los valores de f.e.m. del campo EM transitorio obtenidos en las medidas sobre el terreno, mediante la ecuación:

$$\rho^a = \mu / m^{2/3}$$

siendo $\mu = 4 \pi \cdot 10^{-7}$

$m = (4 \pi t \times 0.4 \mu \cdot TxM) / (t \text{ dBz}/dt)$

TxM = Momento magnético en el bucle transmisor.

Una vez obtenidas las curvas de resistividad aparente, el primer paso en el proceso interpretativo es su análisis cualitativo, mediante el cual se deducen los rasgos relevantes del corte geoelectrico en el punto de medida, tales como número de capas y relación de resistividades entre ellas. Al mismo tiempo, comparando las curvas correspondientes a diferentes puntos de medida se pueden identificar cambios representativos de variaciones geológicas dentro de la zona de estudio. Esta fase del estudio ha de apoyarse ineludiblemente en la información geológica disponible respecto a la zona de trabajo.

Sin embargo, la parte fundamental del análisis cualitativo de las curvas de resistividad aparente es establecer un modelo geoelectrico de capas del terreno como punto de partida para la interpretación cuantitativa. En esta fase del proceso interpretativo se trata de determinar el espesor y la resistividad de cada una de las capas de la sección geoelectrica investigada en cada SEDT. A partir del modelo geoelectrico definido en el análisis cualitativo, el proceso de interpretación cuantitativa se realiza calculando la respuesta teórica de tal modelo para condiciones de operación iguales a las de la toma de datos. Esta respuesta teórica se compara con los datos de campo. Teniendo en cuenta las posibles discrepancias entre ambas curvas de resistividad se modifican los parámetros del modelo (número de capas y sus espesores y resistividades) y se repite el proceso de cálculo y comparación, que posteriormente se ajusta mediante inversión hasta conseguir el mejor ajuste entre la curva de campo y la curva teórica. En ese punto se adopta como interpretación del SEDT en cuestión el modelo cuya respuesta teórica muestra mejor coincidencia con los datos de campo. No obstante, una curva de resistividad aparente puede admitir más de una interpretación, y por ello es interesante conocer los rangos de variación de los espesores y resistividades de las capas de la sección geoelectrica capaces de producir un ajuste similar entre su curva teórica y los datos de campo. Esta información se obtiene a partir del análisis de equivalencia. El proceso interpretativo tal como se ha descrito en los párrafos precedentes se ha realizado mediante el programa TEMIX (Interpex).

Los resultados del proceso interpretativo se presentan en gráficos del tipo de los de la Figura 234, dando la curva de valores medidos resistividad aparente- tiempo, a la que se superpone una línea de trazo continuo que corresponde a la respuesta teórica del modelo de capas adoptado como interpretación del SEDT en cuestión. Este modelo se incluye en la parte derecha del gráfico en forma de diagrama resistividad-profundidad, fácilmente interpretable en términos de unidades litológicas representativas para los objetivos de este estudio.

IV.3.4.2 Tomografía eléctrica

El tratamiento de los datos de la resistividad aparente del terreno obtenidos según la metodología anteriormente descrita comprende dos etapas diferenciadas que son las siguientes:

- a) Representación de la pseudosección de resistividad aparente aplicando el convenio descrito en la parte inferior de la Figura 231. Esta forma de presentación de los datos de campo no es directamente interpretable o comprensible en términos geológicos porque se basa en un

simple convenio de asignación de valores y produce una distorsión respecto a la distribución real de resistividad.

- b) Interpretación de la seudosección anterior para obtener un modelo con la distribución real de la resistividad del subsuelo, comprensible en términos geológicos. Esta fase se realiza mediante modelización e inversión de los datos de campo y es la esencia del método de la Tomografía eléctrica.

El procesado de los datos consiste en establecer un modelo de distribución de la resistividad del subsuelo coherente con la información geológica disponible y en calcular la seudosección de resistividad aparente que tal modelo produciría operando con un dispositivo de medida igual al empleado en campo para obtener los datos a interpretar. En función de los desajustes que puedan existir entre los datos de campo y la seudosección teórica así calculada se modifican los parámetros del modelo (resistividad, geometría y disposición de las diversas unidades) y se repite el proceso de cálculo hasta conseguir progresivamente la mayor similitud entre ambas seudosecciones. El ajuste final del proceso se realiza mediante inversión de los datos para obtener como resultado una sección con la distribución real de resistividad del subsuelo. En la Figura 233 se da un ejemplo del proceso descrito, pudiendo apreciarse la notable diferencia existente entre los datos de campo (seudosección con los valores de la resistividad aparente) y la sección con la distribución de los valores de la resistividad real, correspondiente en este ejemplo a unos datos ajenos a este estudio.

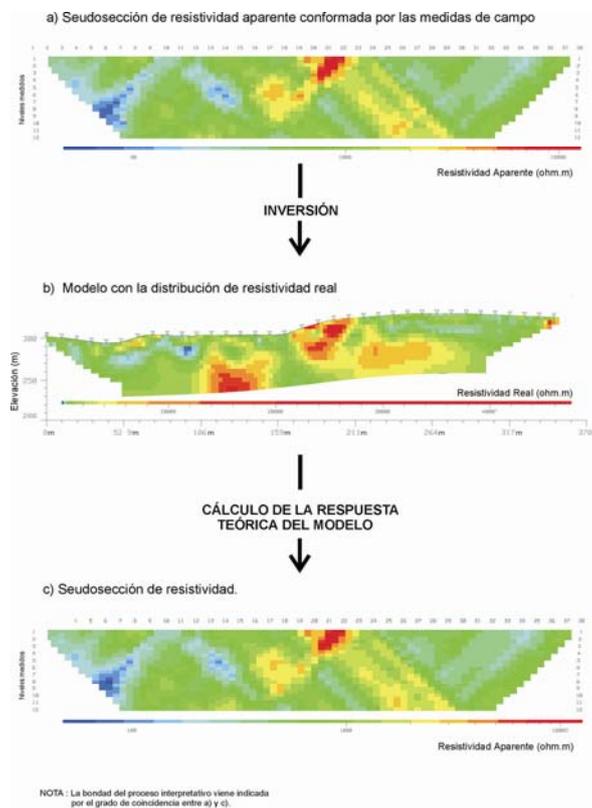


Fig. 233. Esquema del proceso de inversión de los datos de resistividad aparente en tomografía eléctrica.

IV.3.4.3 Ficheros digitales

Todos los datos y resultados de este estudio se encuentran en forma digital en el Anexo Digital de este capítulo, que consta de los siguientes ficheros: Texto del informe (Doñana.doc en Word y Doñana.wpd en Word Perfect); Figuras del informe en formato jpg y formato Corel Draw 7.0; Planos en formato jpg y formato Corel Draw 7.0; datos de campo: Tomografía en ficheros de datos de formato txt ; SEDT: ficheros Doñana 1, Doñana3, Doñana 7 y Doñana 8 en formato tmx.

IV.3.5 Resultados del estudio

Los resultados obtenidos de estos ensayos quedan detallados en las diversas secciones geoelectricas, para cuya valoración se ha añadido en cada caso las referencias geológicas conocidas a partir de los sondeos mecánicos más próximos.

Con carácter general, hay que considerar que la ejecución de las medidas de la resistividad aparente del terreno mediante técnicas de superficie es problemática en el área de Doñana, al margen de los condicionantes de tipo logístico. El carácter conductor o muy conductor del terreno afecta notablemente a las medidas realizadas por técnicas de corriente continua mediante dispositivos de electrodos conectados al terreno, haciendo que las señales (diferencias de potencial) sean muy bajas aunque la intensidad de la corriente pueda ser alta, cosa que no siempre se consigue. En consecuencia es de la mayor importancia el ensayo de diversos dispositivos de medida para conseguir la mejor relación señal/ruido y aumentar la profundidad de investigación. Este aspecto no se ha podido abordar en el curso de este estudio y en nuestra opinión es ineludible llevarlo a cabo en otras fases inmediatas. Esta característica de la baja resistividad eléctrica del terreno también afecta a las medidas realizadas mediante métodos EM y en concreto a los SEDT. Contribuye en principio a aumentar la f.e.m. del campo EM secundario y con ello la amplitud de la señal pero la migración de las corrientes de difusión hacia abajo puede ser relativamente lenta y con ello se reduce proporcionalmente la profundidad de investigación aún en el caso de operar con pulsos de corriente de bajas frecuencias en el bucle transmisor.

Otro aspecto general a considerar es que la interpretación de las curvas de resistividad aparente de los SEDT apoyada en la información de los correspondientes sondeos mecánicos da lugar a secciones geoelectricas que, en principio, pueden considerarse coherentes porque permiten establecer la continuidad lateral de las principales unidades litológicas atravesadas por aquellos. Sin embargo estos resultados son un tanto engañosos porque precisamente han venido condicionados por el hecho de apoyar la interpretación en los datos de los sondeos. Conviene aclarar, y éste es un punto importante de los resultados de este estudio, que en ausencia de esta información de apoyo la interpretación de las curvas de los SEDT podría haberse hecho según otros modelos geoelectricos diferentes llegando a otros resultados igualmente correctos desde el punto de vista geofísico, aunque posiblemente no lo fueran en términos geológicos o al menos serían diferentes a lo que indican los sondeos. Este hecho viene motivado por los débiles contrastes y por los bajos valores de las curvas

de resistividad aparente de los SEDT medidos en los diversos emplazamientos. A fin de ilustrar en la medida de lo posible los comentarios anteriores presentamos en la Figura 234 diversas posibilidades interpretativas de un SEDT del área de Vetalegua. Como puede verse en algunos de estos gráficos las diferencias en los modelos geoelectricos son notables aunque todos ellos den lugar a una curva de resistividad aparente prácticamente idéntica.

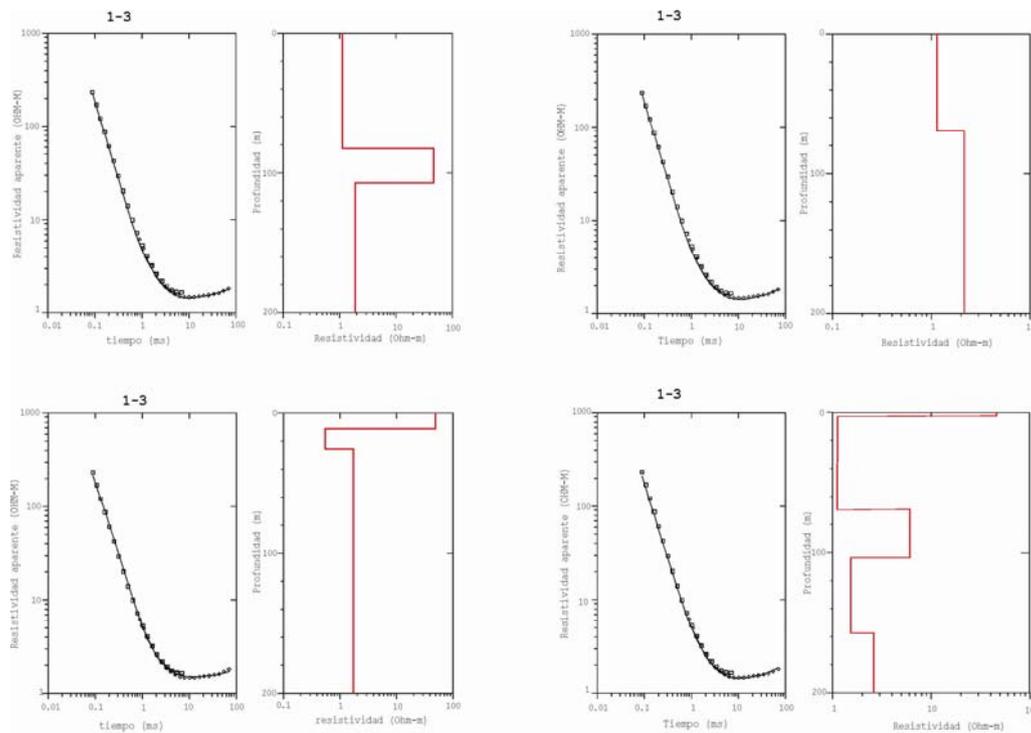


Fig. 234. Ambigüedad en la interpretación de un SEDT en la zona de Vetalegua.

Nuestra conclusión en términos prácticos a la vista de estos resultados es que si los contrastes de resistividad entre las unidades geoelectricas a diferenciar no son suficientemente intensos puede existir una importante ambigüedad en la interpretación convencional 1D de las curvas de los SEDT.

IV.3.5.1 Zona de VETALENGUA

En la Figura 235 se presenta la sección de resistividad obtenida en el perfil de tomografía estudiado en la proximidad del sondeo Vetalegua S-57, conjuntamente con el perfil geoelectrico elaborado a partir de la interpretación de los SEDT. Esta zona está situada en el contacto con la Marisma, siendo el principal objetivo estudiar la viabilidad de estudiar la extensión de las aguas salobres, así como la identificación geoelectrica de las diversas litologías. La testificación disponible del sondeo S-57 permite apreciar que en superficie el agua es salobre, con 10 mS/cm, pero a partir de 30-40 m pasa a 40 mS/cm (salinidad del mar).

En la forma de las curvas resistividad aparente-tiempo de los SEDT presentadas en la Figura 235 puede apreciarse la ambigüedad de cualquier inversión, ya que se trata de una secuencia monótona de resistividad decreciente, en la que la intercalación de cualquier otra capa de mayor resistividad

resulta posible, pero no forzosamente justificada. En efecto, la inversión presentada ha tratado de ajustarse a los cambios de resistividad a las profundidades dadas por los cambios litológicos del sondeo S-57, dando un resultado congruente con la información disponible: los tramos de arenas y gravas se diferencian por su mayor resistividad respecto de la arcilla, siendo además la resistividad decreciente con la profundidad, de acuerdo al aumento de salinidad del agua. Esta solución de inversión permite además una buena correlación entre los tres SEDT efectuados, e indicaría que la salinidad del agua se mantiene con iguales características en toda la sección investigada.

No obstante, la pretendida profundidad de investigación conseguida en la inversión de estos SEDT es poco fiable, siendo posiblemente más fruto de un mero cálculo matemático que de la realidad física de penetración de la corriente inducida en el terreno, dada la baja resistividad del mismo.

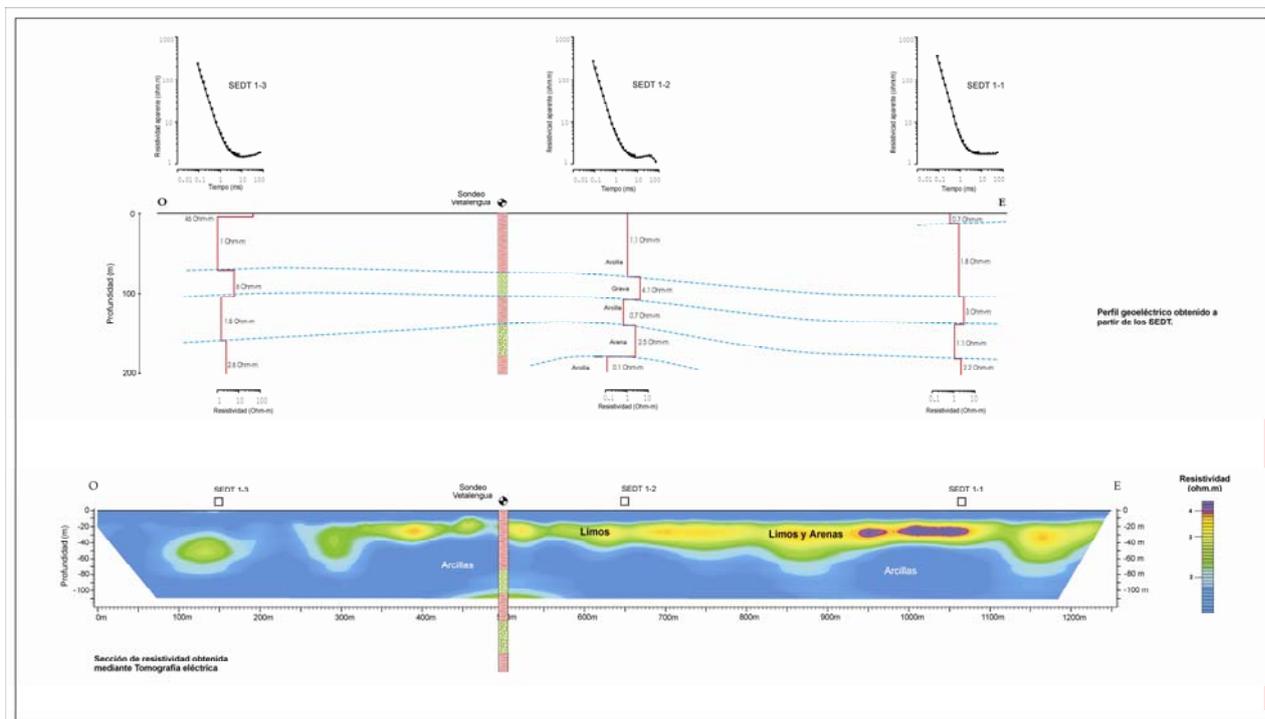


Fig. 235. Secciones geoelectricas obtenidas mediante SEDT y tomografía en el área de Vetelengua.

La inversión de la sección de resistividad o perfil de tomografía ha sido realizada en 2D (los SEDT sólo se han podido invertir en 1D), presentando una acusada discrepancia con la sección de SEDT, al localizarse un nivel de limos-arenas entre los 20-50 m de profundidad, con ligera mayor resistividad que las arcillas, y no referenciado en el sondeo mecánico.

La sección de resistividad o Perfil Eléctrico no ha superado los 100 metros de profundidad de investigación, pero sus resultados dejan entrever muy interesantes posibilidades de aplicación de este método en esta zona siempre que el dispositivo de medida sea el adecuado, lo que requiere la ejecución de nuevos ensayos.

Una nueva inversión de los SEDT, presentada en la Figura 236, ratifica que es posible encontrar para estos una solución que incluya dicho nivel, aunque como ya ha sido anteriormente comentado esta solución geoelectrica equivalente es poco fiable para el tipo de curvas encontradas.

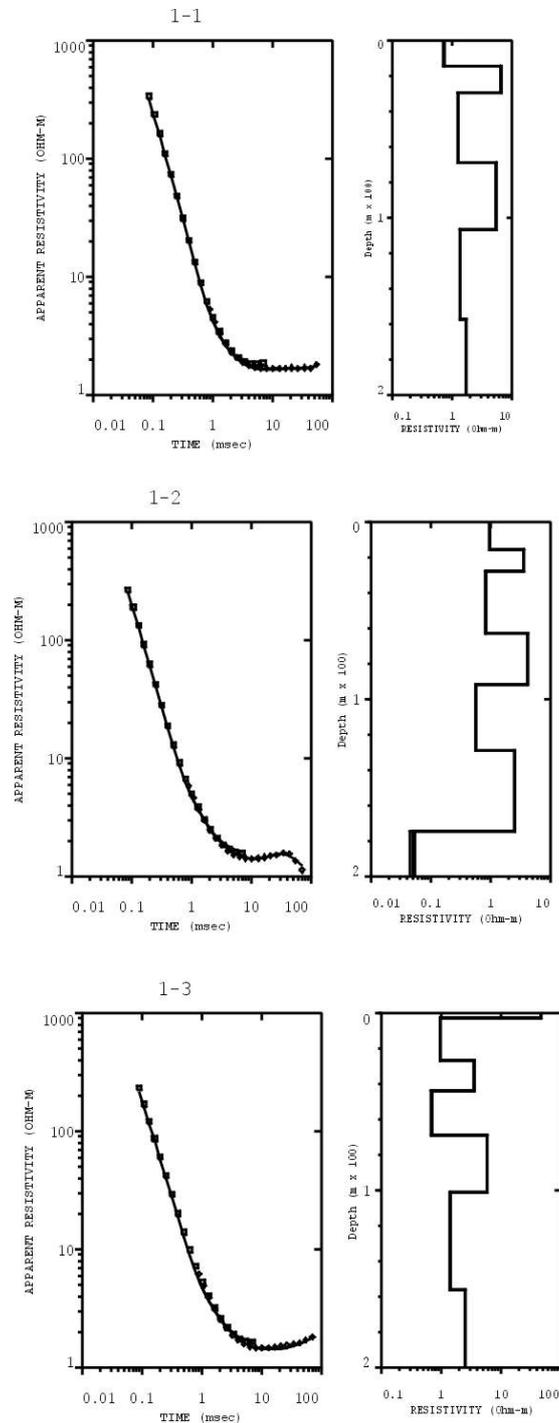


Fig. 236. Nueva inversión de los SEDT de Vetalegua, que permite incluir el nivel de limos-arenas entre 20-50 m de profundidad.

IV.3.5.2 Zona de MARISMILLAS

Los SEDT aquí efectuados son de 100x100 m de bucle, pero colindantes, de forma que pueden presentarse como un perfil continuo, correlacionando los resultados de los 18 SEDT; debe tenerse no obstante en cuenta que su inversión ha sido realizada utilizando un modelo 1D. Presentamos este perfil y sus correspondientes curvas de resistividad aparente en la Figura 237, donde se ha situado además la columna del sondeo S-59. El perfil se sitúa entre las dunas de arena al sur-oeste, donde el agua es dulce, y las proximidades de la Marisma, donde el agua puede ser salobre.

La testificación de conductividad de agua del sondeo pone en evidencia que el recubrimiento de arenas eólicas tiene ya una salinidad elevada (15-20 mS/cm), con una posterior zona de transición de unos 30 mS/cm, hasta llegar a los 60 m, donde el agua tiene más de 100 mS/cm. En estas condiciones, la resistividad de las rocas debería ser muy baja, y así lo indican las curvas resistividad-tiempo obtenidas.

Su interpretación se ha realizado intentando ajustar los cambios a los litológicos dados por el sondeo mecánico. El primer paquete, más resistivo, se corresponde bien con la información disponible; a continuación, la resistividad de 1 ohm.m es concorde con la salinidad conocida para el agua, no pudiendo diferenciarse el paquete de margas intermedias; el cambio tan sutil de 1 ohm.m a 0.6 ohm.m quiere presentar el paso a mayor salinidad del agua de formación, situado a un mayor profundidad que en la columna de agua del sondeo.

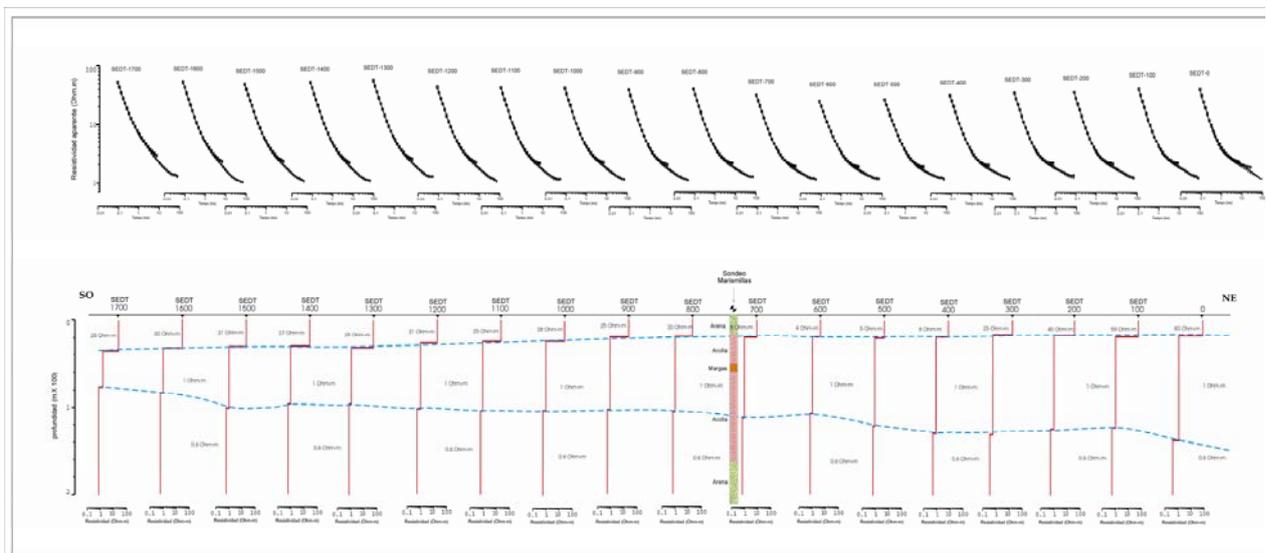


Fig. 237. Sección geoelectrica obtenida mediante SEDT en el área de Marismillas.

La baja resistividad del paquete de arcillas no ha permitido que la corriente haya penetrado lo suficiente en el terreno, por lo que el nivel de arenas, objetivo de la investigación, no ha sido detectado.

IV.3.5.3 Zona de SANTA OLALLA

La inversión del SEDT 7-1, realizado en bucle de 200x200 m en la proximidad del sondeo Santa Olalla, se ha efectuado con dos hipótesis interpretativas equivalentes, representadas en la Figura 238. Aunque no se dispone de la columna litológica del referido sondeo (posible CM 2001), ambas interpretaciones son muy semejantes, dando una primera capa resistiva (posibles arenas finas) de unos 200 ohm.m, que a los 80 m de profundidad baja a 20 ohm.m, (posibles arenas con limos) hasta los 360 m, donde la resistividad vuelve a bajar a unos 4 ohm.m. La mayor resistividad de esta zona, respecto de otros entornos de este mismo trabajo, permite una mayor profundidad de investigación.

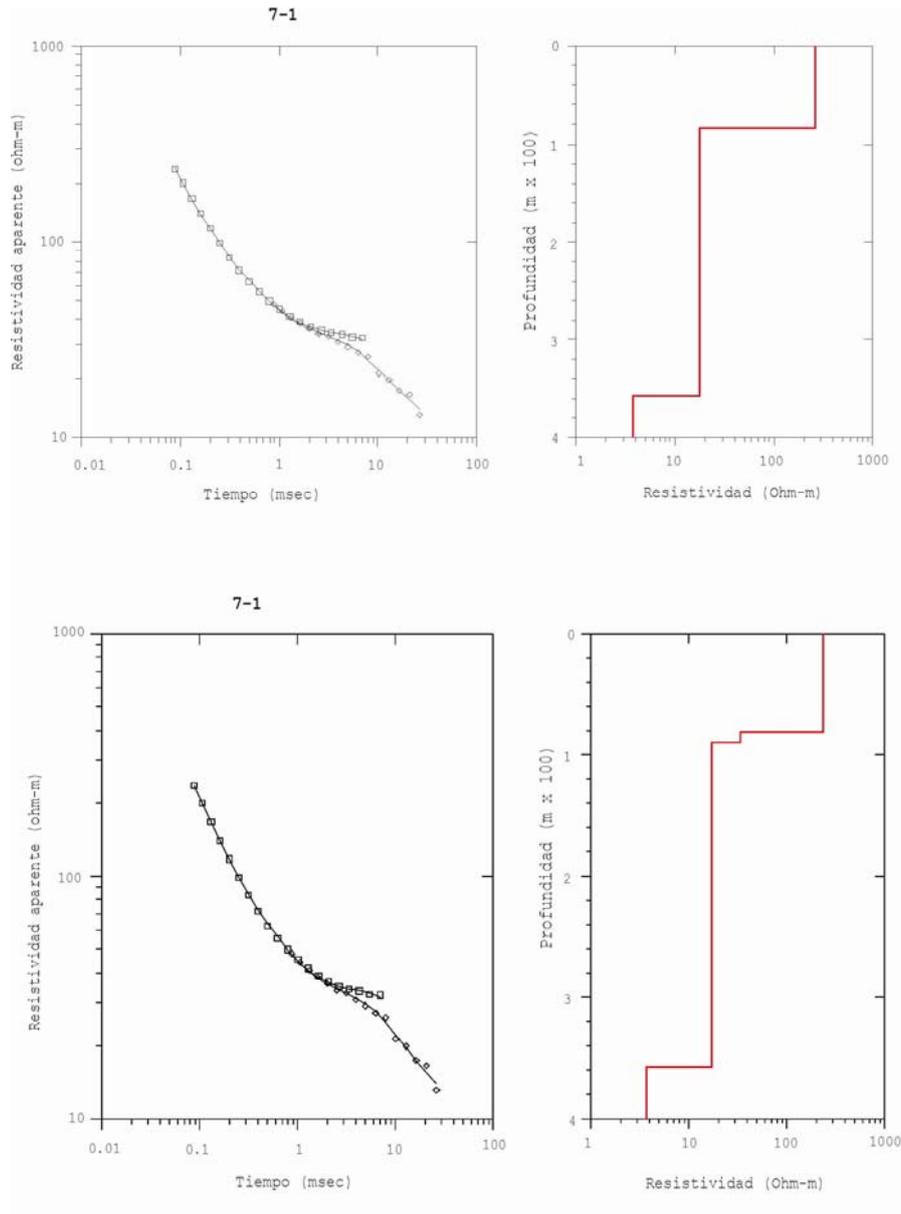


Fig. 238. Posibles interpretaciones del SEDT medido en Santa Olalla.

IV.3.5.4 Zona del PALACIO DE DOÑANA

El perfil geoelectrico obtenido en Palacio de Doñana, por correlación de los 3 SEDT con bucle de 200x200 m realizados, se presentan en la Figura 239, incluyendo la columna litológica simplificada del sondeo S-49.

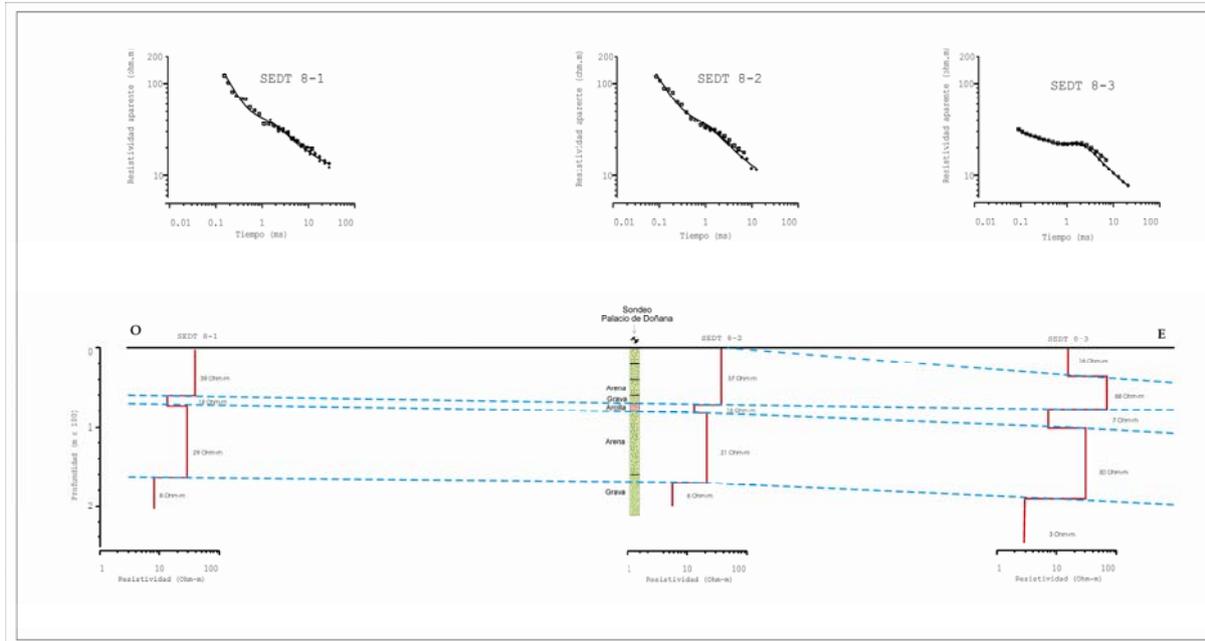


Fig. 239. Sección geoelectrica obtenida mediante SEDT en el área de Palacio de Doñana.

La inversión efectuada para el SEDT-8-2 se ajusta bien a la profundidad de los cambios litológicos dados por la información de la columna del sondeo mecánico S-49, con resistividad decreciente con la profundidad, lo que refleja el aumento de la granulometría y contenido en agua, lo que puede contrarrestar el efecto de que el agua es más dulce en profundidad (0.3 mS/cm) que en superficie, donde puede llegar a 0.8 mS/cm. La curva del SEDT admite otra interpretación, sin forzar a la aparición del tramo de arcillas, pero con el mismo significado: tras un tramo de 50 ohm.m para las capas superiores a la arcilla, la resistividad baja a 10 ohm.m, hasta llegar a la zona de gravas, donde disminuye nuevamente a 1 ohm.m. Con la interpretación presentada en la Figura 239 se puede establecer una buena correlación entre los tres SEDT.

En conclusión, en nuestra opinión el trabajo realizado ha sido útil en todos sus aspectos aunque insuficiente para dar respuesta a todos los problemas planteados antes de su ejecución y a otros que han surgido al analizar los resultados obtenidos. Será necesario ensayar nuevas variantes de los dispositivos de medida para estudios mediante Tomografía eléctrica, tratando principalmente de incrementar la profundidad de investigación hasta el orden de 200 metros si es posible y sin perder resolución lateral de forma excesiva.

La utilización de los SEDT, como mejor alternativa que los SEV para trabajar en el entorno que Doñana por no ser necesario el extendimiento de grandes longitudes de cable, ha encontrado el

problema de los bajos valores de resistividad encontrados, lo que por un lado dificulta la profundidad de penetración deseable, y por otro da lugar a curvas resistividad aparente-tiempo de ambigua interpretación.

Sería conveniente asimismo aplicar nuevas técnicas de procesado a las curvas de resistividad aparente de los SEDT para sacar el máximo partido a la capacidad de este método para investigar hasta el rango de profundidad que interesa a este Proyecto. Concretamente consideramos interesante la técnica de la inversión conjunta en 2D de todas las curvas de SEDT de un mismo perfil para obtener como resultado final una sección con la distribución de los valores de la resistividad eléctrica del terreno, semejante a la obtenida mediante Tomografía eléctrica. De este modo se podría salvar el principal inconveniente de los SEDT que es su ambigüedad interpretativa que conlleva la resolución del problema directo según modelos 1D para las condiciones del área de Doñana.

IV.4. Perfiles de sísmica de reflexión

IV.4.1 Objetivos de los ensayos con el método de sísmica de reflexión

En los experimentos de geofísica por métodos geoelectrónicos llevados a cabo en el presente Proyecto se ha podido comprobar la poca operatividad de los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT), debido a las bajas resistividades de muchos entornos, lo que produce una pobre penetración del método, así como a la gran ambigüedad en la interpretación de los datos de campo al presentarse normalmente secuencias de disminución continua de la resistividad; por otra parte, los métodos de corriente continua, con son los SEV, no son siempre viables de ejecutar debido a las dificultades logísticas (extender grandes longitudes de cable) que supone trabajar dentro del entorno del Parque Natural. En cuanto a los Perfiles de Resistividad (también llamados de Tomografía eléctrica), se ha observado que los modelos geoelectrónicos conseguidos no son en muchas ocasiones capaces de informar adecuadamente de las alternancias litológicas realmente existentes, ya que los contrastes de resistividad esperados entre diferentes formaciones no se producen, como consecuencia de su contenido en agua de diferente salinidad (esta misma dificultad se presentó a la hora de interpretar los registros de resistividad de la formación efectuados en las campañas de testificación de sondeos, aunque en ese caso la existencia de registros de gamma natural permitía, en determinadas ocasiones, efectuar la deseada identificación litológica).

La utilización del método sísmico de reflexión debe, en principio, presentar las siguientes ventajas respecto de los anteriormente empleados:

- Es previsible que exista un contraste de impedancias acústicas entre las diferentes capas, debido a su diferente litología, contenido en agua y grado de consolidación.
- Las condiciones del área de Doñana son excepcionalmente buenas para la aplicación de este método: medio granular saturado y prácticamente llano, con mínimo nivel de ruido sísmico ambiental.
- Es previsible que puedan eliminarse las ambigüedades y limitaciones de los métodos geoelectrónicos, ya que los contrastes de impedancia acústica no se ven afectados (o al menos lo son de forma despreciable) por los cambios de salinidad del agua.

En consecuencia, se ha planificado la realización de diversos perfiles de ensayo con el método sísmico de reflexión, en los mismos lugares donde se midieron y se pretende seguir efectuando mediciones geoelectrónicas, a fin de obtener conclusiones fidedignas que permitan comparar la eficacia de cada método en estos entornos.

Los sitios propuestos para llevar a cabo las mediciones son el área de Palacio de Marismillas, Palacio de

Doñana, sondeo BG-8 y zona de Casa Bombas, en el norte.

Como apoyo para la interpretación de estas secciones, se planificó igualmente la medición de velocidad de las ondas sísmicas a través de ensayos denominados de “down hole” en los sondeos mecánicos de Marismillas (S-59), Santa Olalla, Palacio de Doñana (S-49) y Feder-4. Estos datos se midieron en la campaña de testificación llevada a cabo en 2002, según se indica en el capítulo IV-2.2 del presente Informe. Sin embargo, la obtención de los permisos necesarios por parte de las autoridades de Parque de Doñana para llevar a cabo los experimentos de sísmica de superficie, obligaron a demorar éstos más de un año sobre la fecha inicialmente prevista.

IV.4.2 Resultados de las mediciones de velocidad por “down hole”

Fueron efectuados en 2002, mediante asistencia técnica con la compañía IGT, en los sondeos mecánicos de Marismillas (S-59), Palacio de Doñana (S-49) y Feder-4, no siendo posible su realización por razones técnicas en el sondeo Santa Olalla.

Para las mediciones de Down-Hole se utilizó una cadena de 24 hidrófonos de la marca Geotomographie, a intervalos de 1 m (Figura 240), disponiéndose de un cable que permite efectuar mediciones hasta 120 m de profundidad. Como fuente de energía se empleó un explosivo pirotécnico de 200 g en un taladro de unos 60 cm de profundidad, situado a no más de 3-4 m de la boca del sondeo. Las mediciones se efectuaron cada 0.5 m. El tiempo cero se obtuvo mediante un geófono situado junto al punto de tiro; esta práctica, al irse deteriorando el terreno en las sucesivas explosiones, puede producir retrasos aparentes en las lecturas entre registros, que serán tenidos en cuenta debido al solape entre los mismos, para que no afecten a la medición de velocidades. Para el registro se empleó el sismógrafo Geometrics StrataView de 24 canales.



Fig. 240. Cadena de hidrófonos utilizados para las mediciones de velocidad en sondeos “down hole”

Los registros de Down-Hole, de muy buena calidad, han sido sometidos al siguiente tratamiento:

- identificación de primeras llegadas
- construcción del gráfico distancias (punto de tiro-geófono) – tiempo
- cálculo de la velocidad de las ondas P (pendiente de la curva anterior)

Puesto que la velocidad así calculada se refiere a grandes tramos del subsuelo, la determinación de variaciones de velocidad en tramos de menor potencia se ha calculado mediante la diferencia de tiempos de llegada a dos geófonos separados una distancia fija, habiéndose probado intervalos de 2 a 4 m, seleccionando finalmente como el más adecuado el de 3 m. En las Figuras 241, 242 y 243 se muestran estos resultados para cada sondeo, en un gráfico conjunto con los valores:

- curva distancias-tiempo, cuyas variaciones de pendiente son indicativas de variaciones de velocidad
- curva V_P calculada para intervalos de 3 m.

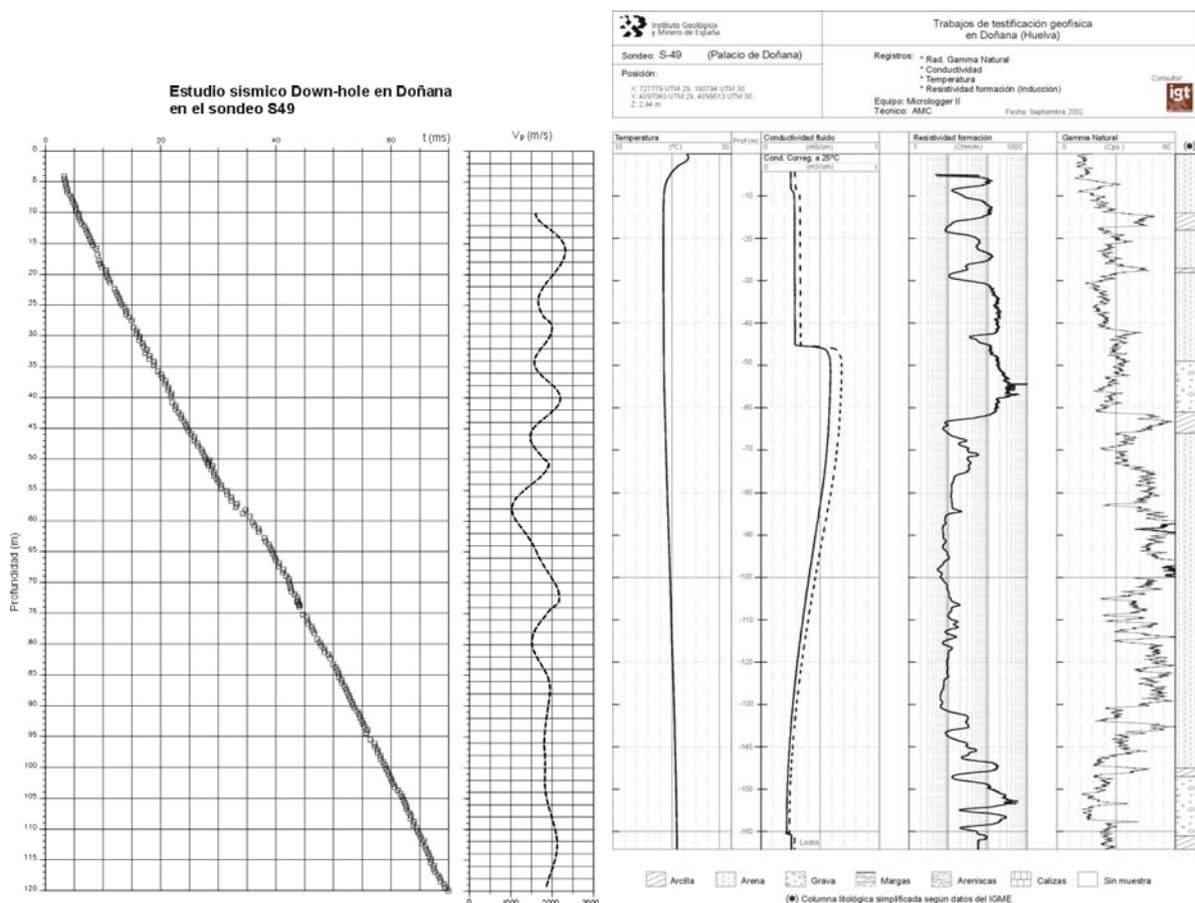


Fig. 241. Resultado del down-hole en el sondeo Palacio de Doñana (S-49) y su testificación geofísica

En el sondeo Palacio de Doñana (S-49), Figura 241 es muy probable que exista un desfase en los tiempos medidos (falso tiempo cero), de tal forma que la alternancia de velocidades calculada está situada a profundidades diferentes de las que realmente le deberían de corresponder en la columna litológica. Dicha columna queda bien reflejada por la testificación de gamma natural y resistividad de la formación, que añade a la litología conocida una pequeña capa de arcillas entre los 42-45 m y un mayor contenido en arcillas en las arenas por debajo de los 75 m. Con esta salvedad del desfase en profundidades, las arenas de la parte superior presentan una velocidad de 2200-2400 m/s, con intercalaciones de arcilla de unos 1500-1700 m/s; la velocidad del paquete de gravas aumenta hasta los 2700 m/s, situándose las arenas-arcillas de la parte inferior (por debajo de los 75 m de profundidad) a unos 1800 m/s, con menores variaciones que probablemente no darán lugar a reflexiones. La alternancia de la parte superior presenta una secuencia de posibles reflectores, marcados por capas de baja velocidad, prácticamente cada 5 m de hasta los 55 m, para cuya resolución se precisa utilizar y conservar altas frecuencias.

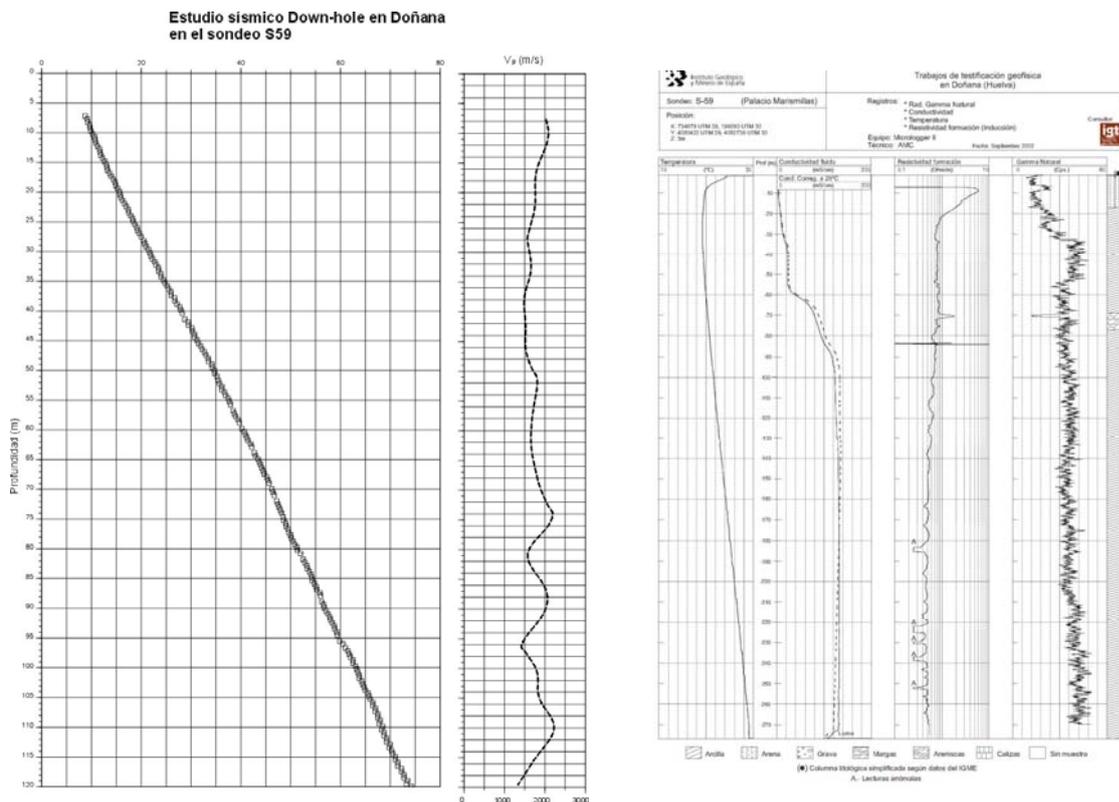


Fig. 242. Resultado del down-hole en el sondeo Palacio de Marismillas (S-59) y su testificación geofísica

En el sondeo Marismillas (S-59), Figura 242, existe menor alternancia de contrastes de velocidad, de acuerdo con su columna litológica, corroborada por la testificación geofísica; las arenas iniciales tienen una velocidad de unos 2600 m/s, pasando a unos 1500 m/s en las arcillas en el tramo entre 30-50 m, donde la radiación gamma natural detecta una mayor arcillosidad, que aumenta luego a unos 1700 m/s;

en la intercalación de margas (sobre los 70 m de profundidad) la velocidad llega a unos 2200 m/s; en el tramo inferior, de arcillas con 1500 m/s, se observan varias intercalaciones de mayor velocidad, posiblemente de margas, lo que no se ve confirmado por la testificación. En consecuencia, en este tipo de secuencia no cabe esperar la presencia de reflexiones hasta por debajo de los 70 m de profundidad, y si el comportamiento en velocidades indicado es cierto, significaría que este parámetro es más sensible a ligeras variaciones litológicas que la resistividad y radiación gamma.

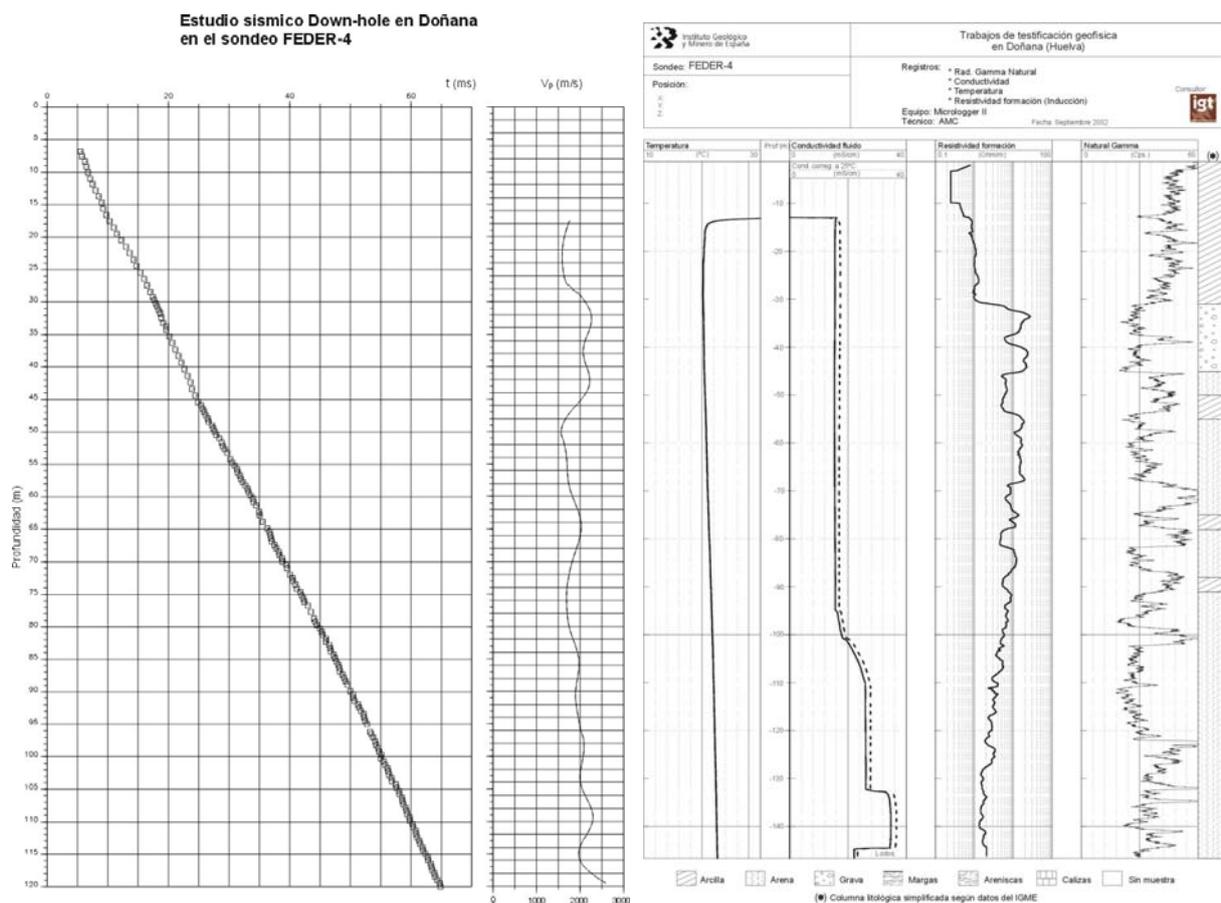


Fig. 243. Resultado del down-hole en el sondeo Feder-4) y su testificación geofísica

En el sondeo Feder-4 las variaciones de velocidad también se corresponden con bastante exactitud con las variaciones litológicas de la columna del sondeo Figura 243, sobre todo al tener en cuenta la posición real de las capas según la testificación de gamma natural y resistividad de la formación. Las arcillas existentes hasta los primeros 30 m de profundidad tienen unos 1700 m/s, pasando a unos 2300 m/s en las gravas; la bajada de velocidad de nuevo a los 1700 m/s a partir de los 45 m se corresponde con la presencia de arcillas, identificadas en la testificación (en la columna inicial figuran como arenas); la entrada realmente en arenas se produce sobre los 55 m, con una velocidad que llega a unos 2000 m/s,

reflejando sus variaciones a valores inferiores la presencia de capas de arcilla, según detectan los valores de las diagráfias. Se aprecia un ligero aumento de la velocidad con la profundidad. La capa de gravas, de mayor velocidad entre los 27 y los 50 m, debe dar lugar a reflectores. Los contrastes de la parte inferior del sondeo no es probable que sean suficientes como para reflejar la suficiente energía.

En resumen, las arcillas presentan velocidad en el rango 1500-1800 m/s, las arenas 2000-2600 m/s, las gravas entre 2300-2700 m/s y las margas 2200 m/s. Estos valores son suficientes para dar lugar a coeficientes de reflexión importantes, dependiendo la resolución real alcanzable de la potencia de las capas y de su secuencia.

IV.4.3 Ensayos de diversas fuentes de energía para la generación de las señales sísmicas.

[En este apartado se sintetiza parte del informe presentado por la compañía IGT]

La toma de datos en campo de los trabajos de sísmica de reflexión efectuados en este Proyecto ha sido llevada a cabo mediante contrato de Asistencia Técnica con la empresa International Geophysical Technology, S.L. (IGT), durante 2002.

Por requerimiento de las autoridades del Parque Nacional de Doñana, el estudio ha constado de una primera fase para ensayar diversas fuentes de energía para la generación de las señales sísmicas, con el fin de seleccionar la más adecuada desde el punto de vista de impacto ambiental. Una vez autorizada la fuente a utilizar, se procedió a la medición de los perfiles previstos.

Para el rango de profundidad a investigar en este Proyecto (algunos centenares de metros), existen diversas posibilidades para la producción de las señales sísmicas, con diferentes características y grados de eficacia. Durante la planificación de los trabajos de este estudio se consideraron diversas opciones para las particulares condiciones del área de trabajo (suficiente energía de acuerdo con los objetivos, y mínimo impacto ambiental). Las opciones finalmente consideradas fueron las siguientes:

- Sistema de impacto de una masa acelerada sobre el terreno. En concreto se había previsto utilizar el equipo modelo EWG-1417-3 fabricado por Bison Instr, del que dispone el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. No fue factible ensayar este sistema por cuestiones administrativas y también porque al ir instalado de forma permanente sobre un vehículo, su empleo sólo era factible sobre las pistas y caminos. En su lugar se optó por realizar las pruebas utilizando una maza de 6 kg golpeando sobre una base metálica. Su uso fue descartado, tanto debido a que la baja velocidad y compactación de las arenas es bastante probable que no permitieran el paso de la suficiente energía hasta la profundidad deseable, como por el ruido producido, no adecuado a las condiciones ambientales.

- Sistema VIBSIST-50 (Figura 244) fabricado por la Sociedad VIBROMETRIC OY, basado en la técnica SIST (Swept Impact Seismic Technique) con semejanzas conceptuales y operativas al sistema miniSosie desarrollado en los 80 por la Compañía General de Geofísica.

- Explosivo pirotécnico (Figura 245 y 246), Aunque hubiera sido deseable, desde el punto de vista técnico, utilizar explosivos convencionales, se descartó esta posibilidad por las complicaciones administrativas que conlleva su adquisición y también su empleo, especialmente en un medio tan sensible como es un Parque Natural. El explosivo pirotécnico es menos efectivo pero su adquisición y empleo son más sencillos. Las cargas fueron utilizadas en el interior de un taladro de unos 60-80 cm, retacando el cartucho en su interior, haciendo pruebas utilizando arena y arcilla para el retacado.



Fig. 244. Fuente sísmica vibratoria VIBSIST-50



Fig. 245. Cartuchos y detonadores utilizados (izquierda). Perforadora para hacer el taladro donde introducir los cartuchos (derecha)



Fig. 246. Introducción de la carga en la perforación y análisis en campo de los registros obtenidos

Para obtener la autorización correspondiente, se llevaron a cabo demostraciones ante los responsables del Parque empleando todas estas fuentes de energía (Figura 247). La maza fue descartada, ya que produce un ruido bastante notable (se utilizó un stacking de 10 golpes) en ambientes tan tranquilos; por otra parte, el registro obtenido indica que sería necesario un mayor peso y mayor número de golpes para conseguir la suficiente energía. Desde el punto de vista ambiental tanto la fuente de vibración como los cartuchos recibieron la conformidad para su empleo, demostrándose que las cargas utilizadas no producían ni ruido ni proyecciones que pudieran perturbar los hábitos y apacible vida de la fauna del Parque. Como puede apreciarse en la Figura 247, la señal conseguida es mejor con el empleo de cartuchos, por lo que se decidió utilizar dicha fuente en el registro de los perfiles programados.

No obstante, por razones de interés técnico, y para aprovechar los elevados costos que supuso la importación temporal del equipo VIBSIST-50 desde Canadá, se hicieron más pruebas con el mencionado equipo en el denominado Perfil 1 (área norte, sondeo Casa Bombas), que se midió en su totalidad empleando explosivo pirotécnico y parcialmente mediante la referida fuente vibratoria. Durante la ejecución de los trabajos se comprobó que el sistema VIBSIST-50, aunque con notables más altas frecuencias, produce, como fuente superficial, una importante onda aérea y ground-roll (Figura 247), además de resultar muy lento en condiciones de operación que podrían definirse como normales ó incluso muy buenas por la facilidad de acceso, ausencia de accidentes del terreno, etc. Además este equipo sufrió diversos problemas y averías que demostraron, en nuestra opinión, que tal sistema no estaba todavía desarrollado en condiciones plenamente operativas en ese momento (Octubre-02).

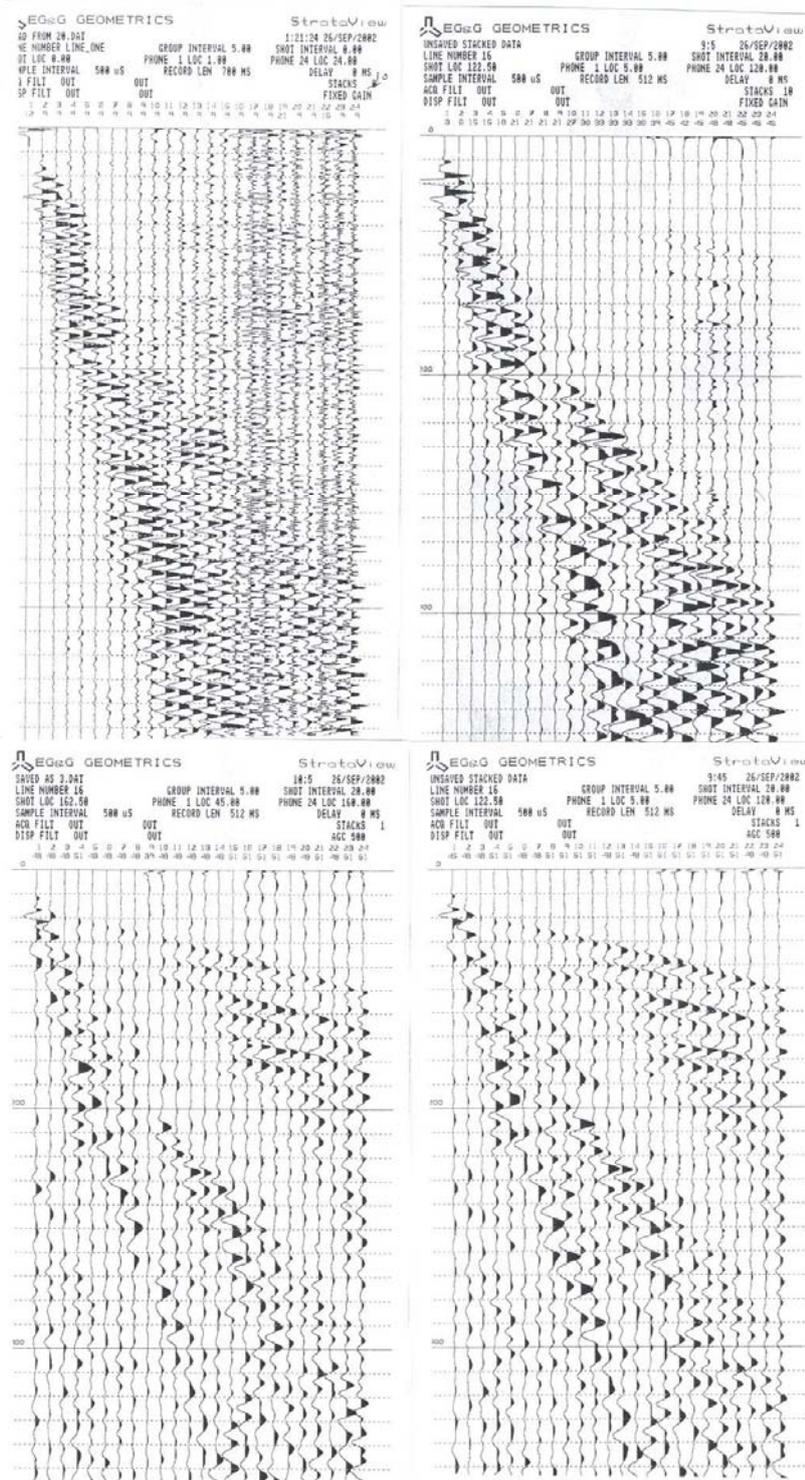


Fig. 247. Ejemplo de registros obtenidos con las distintas fuentes. Parte superior: izquierda- Sistema VIBSIST-50, con 10 impactos; derecha- maza de 6 kg, con adición de 10 golpes. Parte inferior: izquierda- cartucho retacado con arena; derecha- cartucho retacado con arcilla.

IV.4.4 Ejecución de la campaña de medidas en los perfiles

[En este apartado se sintetiza parte del informe presentado por la compañía IGT]

Una vez que se comprobó que la eficacia y rapidez de ejecución de los registros sísmicos utilizando explosivo pirotécnico eran superiores a las del sistema VIBSLST-50, se procedió a la ejecución sistemática de las medidas en los perfiles seleccionados. Antes de comenzar las operaciones de registro se realizaron las operaciones necesarias para puesta a punto de los equipos los trabajos (selección de intertraza, offset, y otros parámetros de registro).

IV.4.4.1 Parámetros de registro

Se empleó un dispositivo de medida de 24 canales con un espaciado de 6 metros entre geófonos, con tiro en extremo cada 6 metros y con una distancia entre punto de tiro y el geófono más próximo (*offset*) igual a 24 metros. De acuerdo con lo anterior la operación se realizó con cobertura 12, es decir que se registraron 12 trazas independientes para diversas combinaciones punto de tiro-sensor provenientes de un mismo punto del reflector.

Al objeto de incrementar la relación señal/ruido de los registros se emplearon dos geófonos conectados en serie en cada punto de recepción. La longitud de los registros fue de 500 ms, con intervalo de muestreo de 0.5 ms. El explosivo pirotécnico mediante el que se generó la señal sísmica se detonó en el fondo de pequeños taladros, de 70 a 80 cm de profundidad, convenientemente retacados con arena y arcilla con el fin de que la mayor parte de la energía liberada por la explosión se transmitiera hacia abajo. La detonación de estas cargas explosivas se produce mediante una pequeña descarga eléctrica empleando una pila de 1'5 V, descarga que produce la incandescencia instantánea de una resistencia eléctrica situada dentro de la carga explosiva (detonador o iniciador eléctrico). Se descartó iniciar la explosión de los cartuchos mediante el explosor del sismógrafo porque en tal caso la señal de tiempo cero grabada en los registros sería la del instante en que se produce el cierre del circuito en el explosor, mientras que la señal sísmica propiamente dicha se produce varios milisegundos después, debido al retardo con que se produce la explosión, retardo que además puede variar de unos a otros cartuchos. El empleo del explosor para marcar el tiempo cero de los registros solo está justificado cuando se utilizan detonadores sísmicos específicos sin retardo. Así pues para el control del tiempo cero de los registros se empleó un geófono que se emplazó sobre el terreno en la proximidad inmediata al punto de tiro, conectado al cable del indicador (switch) del sismógrafo. Entendemos que este procedimiento aunque imperfecto, fue el más correcto de los posibles para evitar o al menos minimizar posible errores en el tiempo cero de los registros. Sin embargo la experiencia demostró que también este sistema producía errores en el tiempo cero de los registros. Otra alternativa que se rechazó por su lentitud fue enrollar un cable de muy pequeña sección alrededor del cartucho pirotécnico y conectarle al cable del iniciador. Cuando se produce la explosión el cable se rompe y la pérdida de continuidad genera la señal de tiempo

cero en los registros sísmicos. Para la ejecución de este estudio se empleó un sismógrafo de 24 canales modelo StrataView R24 fabricado por Geometrics Inc, geófonos modelo SM-7/U-GT con una frecuencia natural de 50 Hz fabricados por Input/Output y un conector múltiple (rollalong) modelo RS-96/24 fabricado por Geostuff.

Las condiciones de medida durante la ejecución de los trabajos de campo pueden catalogarse en general como buenas por las particularidades superficiales del terreno y por el bajo nivel de ruido ambiental, con la única excepción de ciertos puntos del Perfil 4 donde la existencia de depósitos de arenas sueltas y secas con varios metros de espesor produjo una apreciable atenuación de la señal sísmica. Al mismo tiempo estos depósitos de arenas representaban ligeros cambios de cota en el relieve que no se midieron lo cual puede originar algunos errores durante el procesado de los registros (corrección estática).

IV.4.4.2 Mediciones realizadas

En total se han registrado 9078 m de perfil, cuya localización se indica en la Figura 248. Como origen de distancias de cada perfil se ha tomado el primer punto de tiro y como extremo final la posición del último geófono. Mediante un receptor GPS portátil modelo Garmin e-Trex Summit cuya precisión teórica es de ± 5 metros se tomaron las coordenadas de algunos puntos característicos de cada perfil, recogidos en la tabla adjunta. En el **Anexo IV-4** del presente Informe se incluyen los gráficos correspondientes con indicación de las coordenadas de los referidos puntos.

| Perfil | distancia a origen | X UTM 30 | Y UTM 30 | nº tiros | longitud |
|--------------------------------|--------------------|----------|----------|-----------|----------|
| Perfil 1- Zona Norte | 507 | 735613 | 4110272 | 471 expl. | 2826 m |
| | 650 | 735754 | 4110278 | 209 vibro | 1254 m |
| | 1397 | 736498 | 4110292 | | |
| | 2138 | 737238 | 4110317 | | |
| | 2388 | 737487 | 4110335 | | |
| | 2889 | 737980 | 4110342 | | |
| Perfil 2-BG-8 | 0 | 721212 | 4097022 | 167 | 1002 m |
| | 600 | 721321 | 4097591 | | |
| | 1030 | 721460 | 4097995 | | |
| Perfil 3-P. Doñana | 0 | 726638 | 4097006 | 157 | 942 m |
| | 450 | 727098 | 4097035 | | |
| | 942 | 727587 | 4097096 | | |
| | 1098 | 727738 | 4097075 | | |
| Perfil 4-P. Marismillas | 0 | 732477 | 4080626 | 509 | 3054 m |
| | 530 | 732994 | 4080564 | | |
| | 1030 | 733486 | 4080637 | | |
| | 1530 | 733908 | 4080844 | | |
| | 2036 | 734434 | 4080918 | | |
| | 2540 | 734946 | 4080977 | | |
| | 3000 | 735404 | 4080998 | | |

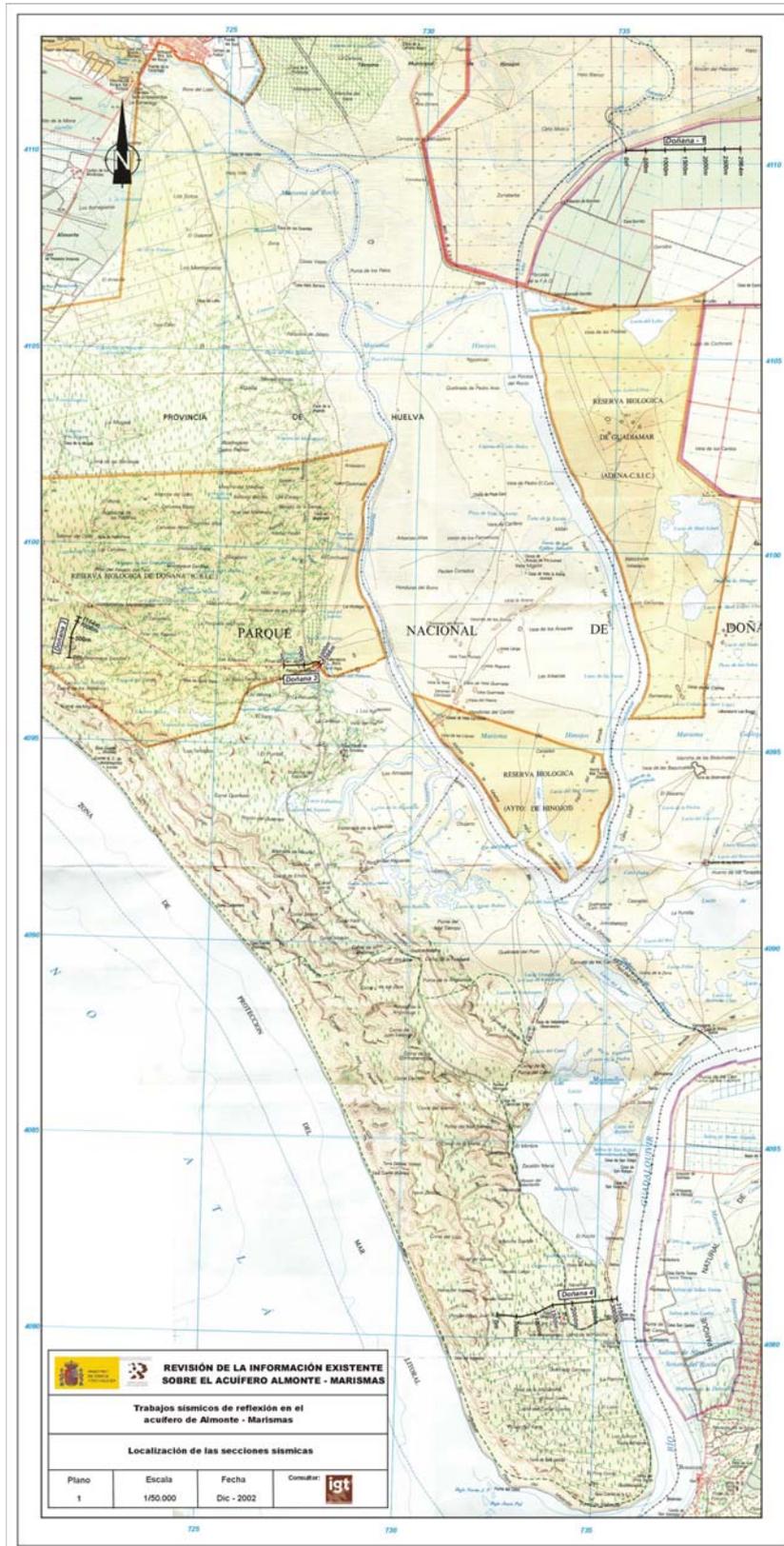


Fig. 248. Posición general de los perfiles sísmicos efectuados

IV.4.4.3 Procesado de los registros y presentación de los resultados

El procesado de los registros para la obtención de las secciones sísmicas ha sido realizado por el Dr. Jacque Jenny, experto en sísmica de reflexión de la Sociedad Geo2P. Los parámetros de procesado quedan detallados en la tabla que acompaña a cada una de las secciones sísmicas, y responde a la siguiente secuencia:

- Lectura y ordenación de los ficheros que contienen los registros digitales de campo, con especial cuidado en la descripción detallada de la geometría del dispositivo de medida, coordenadas relativas de los puntos de tiro y geófonos , etc.
- Eliminación de las primeras llegadas mediante aplicación de un borrado lineal (surgical muting).
- Aplicación de un filtro pasa-banda para eliminar el ruido de los registros. Principalmente se trata de limitar las frecuencias a la banda 55-140 Hz.
- Eliminación de trazas problemáticas o defectuosas debidas a fallos en el sistema de registro o afectadas por ruido puntual particularmente intenso.
- Agrupación de trazas CDP, es decir de todas las correspondientes a un mismo punto del reflector.
- Aplicación de la corrección estática.
- Análisis de velocidad y corrección de n.m.o (normal move out).
- Suma de trazas CDP para obtener una traza única por grupo.
- Agrupamiento de las trazas suma resultantes de cada grupo CDP para conformar la sección sísmica distancia-tiempo.
- Cálculo y representación de la sección sísmica distancia-profundidad.
- Filtrado FK, promediado de trazas, etc.

Los documentos finales de este estudio son las secciones sísmicas distancia-tiempo y distancia-profundidad. Estas últimas se han calculado a partir de la sección distancia-tiempo, utilizando las velocidades de intervalo determinadas en la fase de análisis de velocidad en diversos puntos de cada sección. Se ha optado por no producir exageración en la escala vertical de las secciones sísmicas distancia-profundidad, que se ha mantenido 1/5.000 igual que la horizontal (en las secciones recogidas en el **Anexo IV-4**), reproduciéndose en pequeño tamaño en las Figuras 249 a 253.

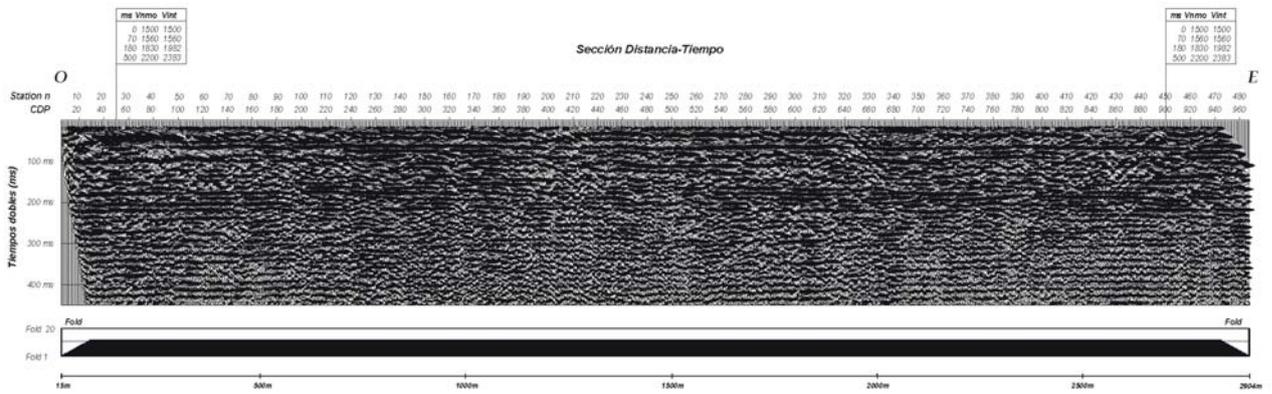


Fig. 249. Perfil Doñana 1 registrado con explosivo pirotécnico. Sección distancia-tiempo

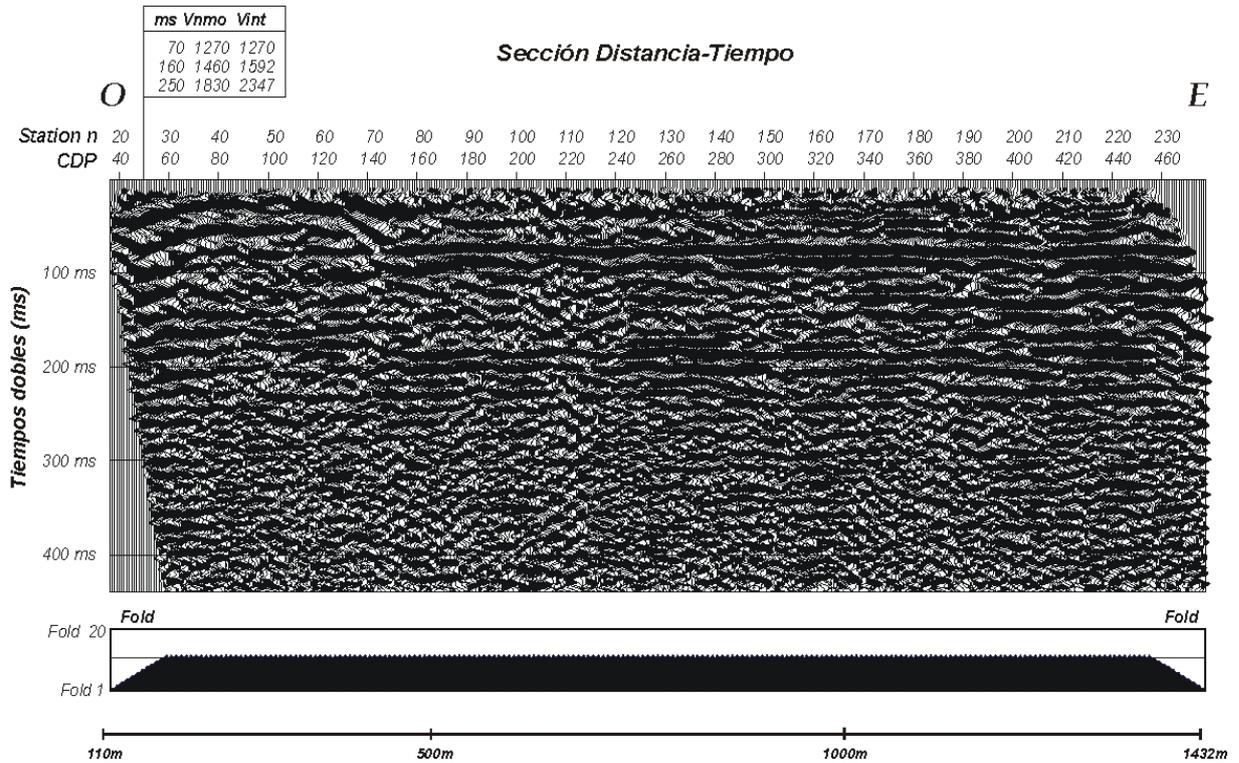


Fig. 250. Perfil Doñana-1 registrado con Vibro. Sección distancia-tiempo

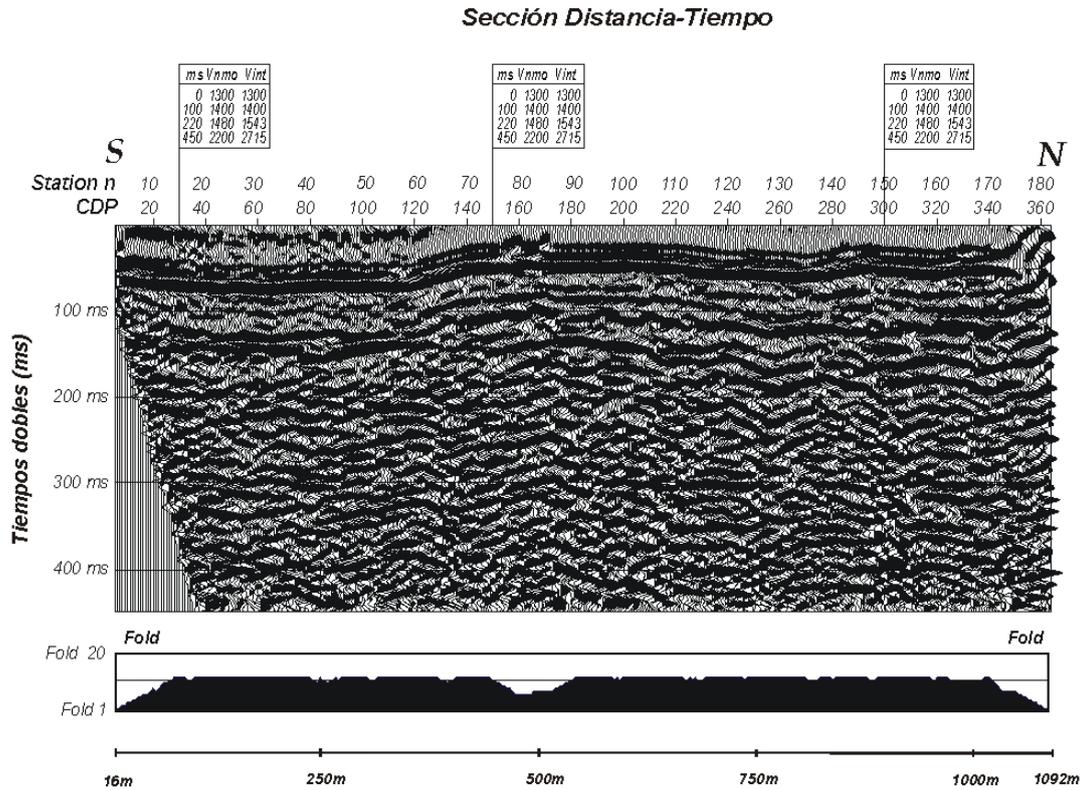


Fig. 251. Perfil Doñana 2. Sección distancia-tiempo

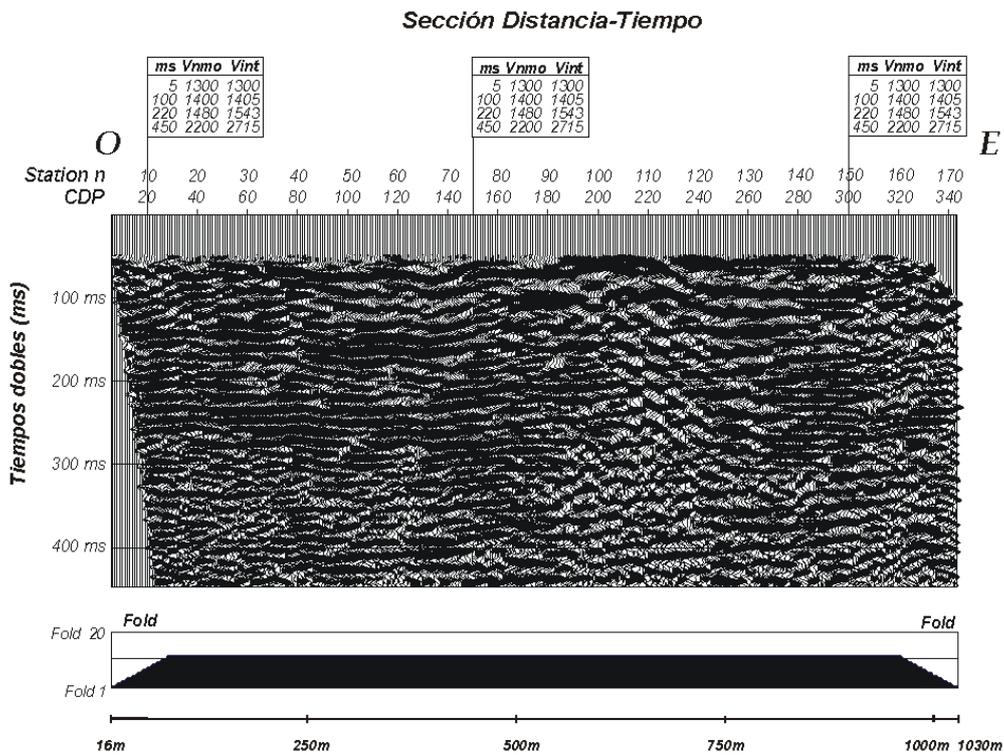


Fig. 252. Perfil Doñana-3. Sección distancia-tiempo

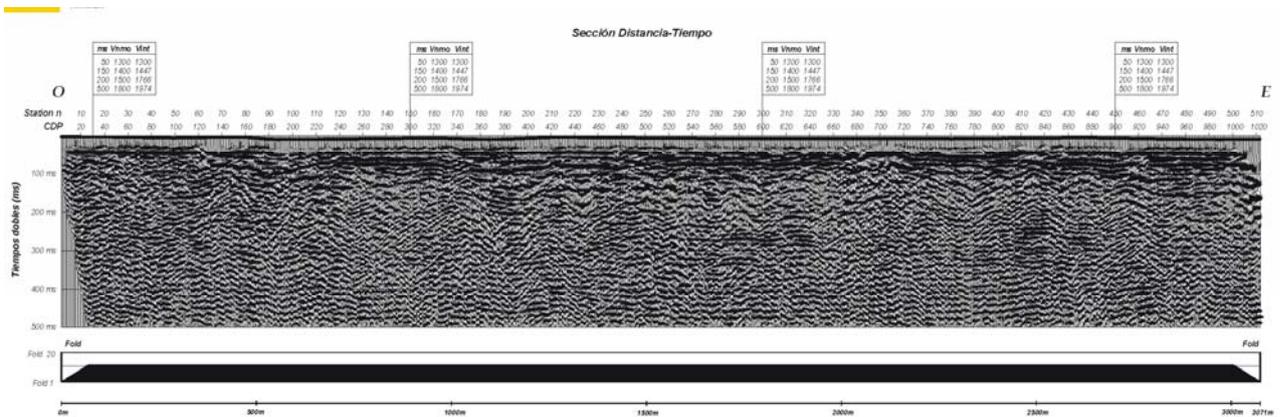


Fig. 253. Perfil Doñana 4. Sección distancia-tiempo

IV.4.4.4. Ficheros digitales

En el Anexo Digital del este apartado se encuentran todos los ficheros, tanto de datos de campo, proceso, como imágenes de las secciones finales y demás mapas de posición presentados en este capítulo. Los ficheros digitales con los datos de campo y con los resultados del estudio son los siguientes:

Datos de campo: tienen extensión .DAT en los registros correspondientes a las medidas realizadas con explosivo y extensión SEG2 para las medidas con el sistema Vibrometric.

Geometría, en formato Excel: Geometría D1.xls, Geometría D1A Vibro.xls, Geometría D1B Vibro.xls, Geometría D2.xls, Geometría D3.xls y Geometría D4.xls

Secciones distancia-tiempo: en formato CorelDraw v7 y v9, así como en formato jpg.

Secciones distancia-profundidad: en formato CorelDraw v7 y v9, así como en formato jpg.

Con el objetivo de proporcionar información que contribuya a la mejor interpretación de las secciones sísmicas se presentan en el Anexo Digital los registros de una serie de tiros representativos de cada línea cada 25 tiros, así como y también varios espectros de frecuencias correspondientes a grupos de 15 trazas de diversos conjuntos CDP.

IV.4.5 Comparación de resultados entre fuentes de energía

La toma de datos de sísmica de reflexión en ambientes sedimentarios con múltiples secuencias de variación litológica requiere el uso de fuentes de energía que proporcionen una señal rica en altas frecuencias. Por otra parte, para trabajar en zonas cubiertas en superficie por materiales muy sueltos (arenas o limos), se precisa utilizar fuentes de alta energía (explosivos) o que permitan un elevado número de adición de señales. La selección de cuál es la fuente más adecuada para una determinada zona es un problema que sólo puede resolverse mediante la evaluación de los resultados obtenidos con varios tipos de fuente. Este tipo de experimentos es relativamente normal, existiendo en la literatura geofísica una suficiente referencia, siendo la conclusión obtenida en todos los casos de que no se pueden dar normas universales. No podía ser de otra forma, ya que la señal emitida por la fuente tiene que viajar por el medio hasta ser registrada en los geófonos, y son por lo tanto las características de las rocas en su manera de atenuar la señal emitida la que en definitiva valida o no una determinada fuente en cada entorno geológico.

Dentro de este Proyecto se ha planteado la necesidad de resolver no solamente este tema, sino que se ha añadido un nuevo factor poco común en los trabajos de campo: condicionantes medioambientales que pueden poner severas restricciones al uso de fuentes que emplean explosivos, aun cuando estos no causen ningún daño. Por estas razones se llevó a cabo el experimento mencionado en el apartado 4.3 de este capítulo. Es de especial interés, por su total novedad, analizar las diferencias finalmente obtenidas mediante los registros con explosivos (realmente cartuchos pirotécnicos, en este caso) y los obtenidos con el método VIBSIST-50 de VIBROMETRIC Swept Impact Seismic Technique (Canadá). Esta fuente es una combinación de vibroseis y MiniSosie: la señal se produce como una serie de pulsos según una secuencia programada, en intervalos irregulares (unos 5 a 18 impactos por segundo en el modelo 20 y 10 a 30 en el modelo 50), con frecuencias de 50 Hz hasta 2500 Hz (modelo 20) o 1500 Hz (modelo 50). El movimiento es producido de forma electromecánica, de poco ruido. Requiere efectuar la correlación del tren de impulsos con la señal emitida. La fuente es transportable a mano. El modelo 20 es válido hasta 200 m y el 50 hasta 500 m. El sistema consta de un controlador que transfiere la secuencia diseñada en un ordenador de campo al martillo (Figura 244); el propio martillo es movido por un motor eléctrico alimentado por un generador; y el modulo de impacto, que se coloca sobre una placa acoplada al suelo de forma fija (existen dos modelos de placa, para terreno duro o blando). El sweep o barrido de frecuencias es controlado por software, siendo específico del sistema el decodificador para efectuar la deconvolución de la traza registrada con la señal emitida. El conjunto tiene un peso de 21 kg (modelo 20) o 51 kg (modelo 50).

El Perfil 1 (área norte, sondeo Casa Bombas), se midió en su totalidad empleando explosivo pirotécnico y parcialmente mediante el referido sistema VIBSIST-50, hasta el tiro de la estación 230.

Para su análisis se presentan algunos registros para los mismos puntos de tiro (Figuras 254 a 257), así como los espectros de frecuencias para algunos conjuntos de trazas CDP, agrupando 15 trazas (Figuras 258 y 259).

De la inspección de los espectros resulta claro que el contenido en frecuencias se encuentra fundamentalmente en la banda 40-90 Hz, llegando las frecuencias útiles en la fuente pirotécnica hasta los 100 Hz, mientras que en la fuente vibratoria se llega hasta los 130 Hz, aunque con algo menos de energía.

Esto se verifica en los registros: los obtenidos con el sistema vibratorio presentan mejor resolución (frecuencias más altas), aunque menor amplitud; en los registros de cartuchos pirotécnicos se aprecia más la onda aérea y algo de ground-roll en las primeras trazas a partir de los 350 ms.

DOÑANA 1

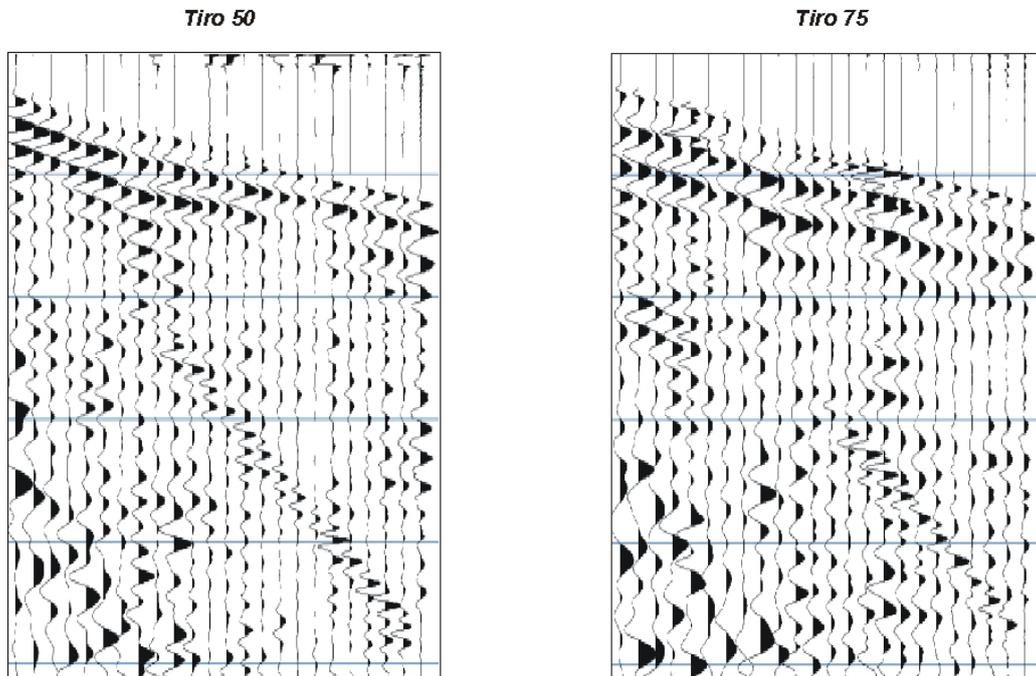


Fig. 254. Registros obtenidos con cartucho pirotécnico en el perfil Doñana-1

DOÑANA 1 VIBRO

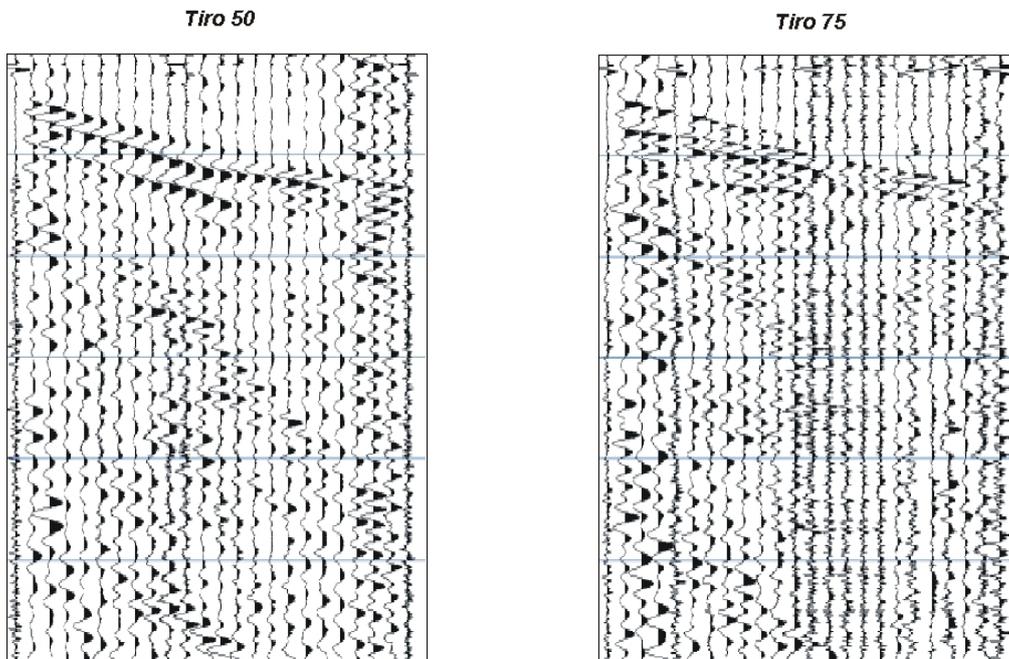


Fig. 255. Registros obtenidos con vibro VIBSIST-50 en el perfil Doñana-1

DOÑANA 1

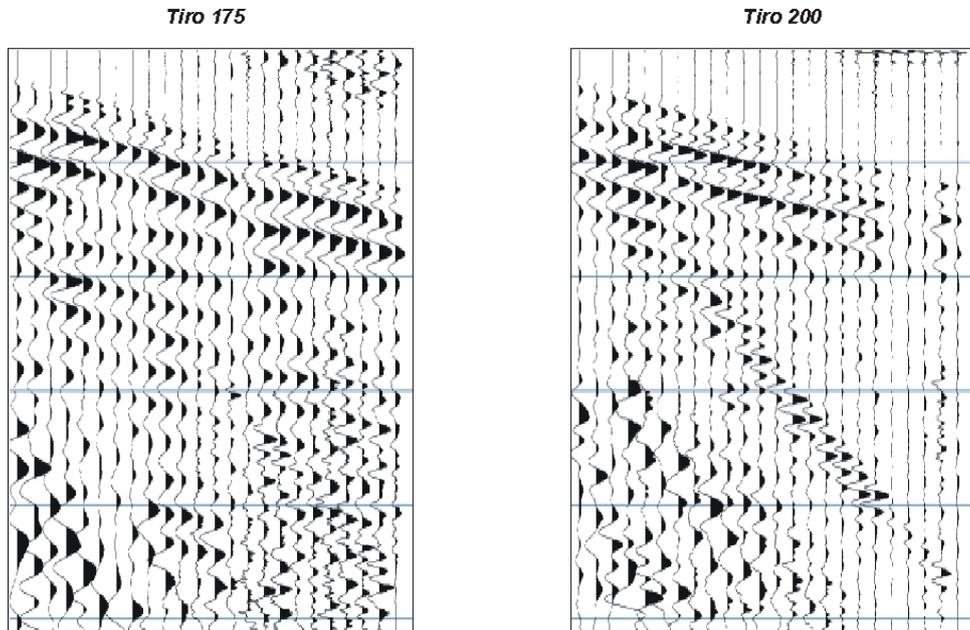


Fig. 256. Registros obtenidos con cartucho pirotécnico en el perfil Doñana-1

DOÑANA 1 VIBRO

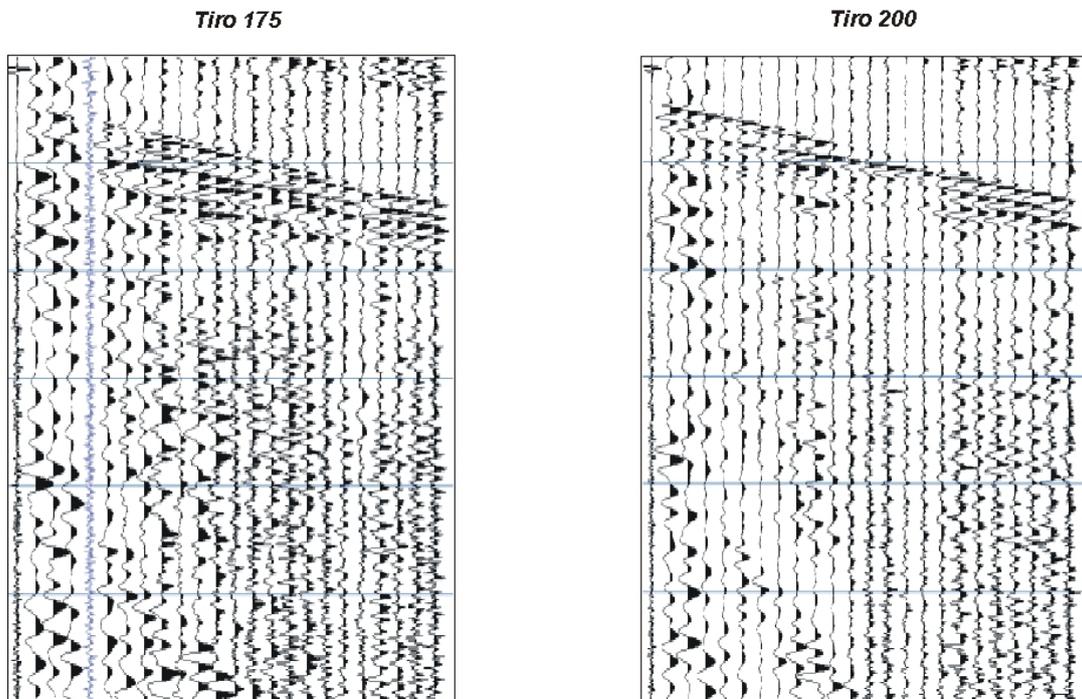


Fig. 257. Registros obtenidos con vibro VIBSIST-50 en el perfil Doñana-1

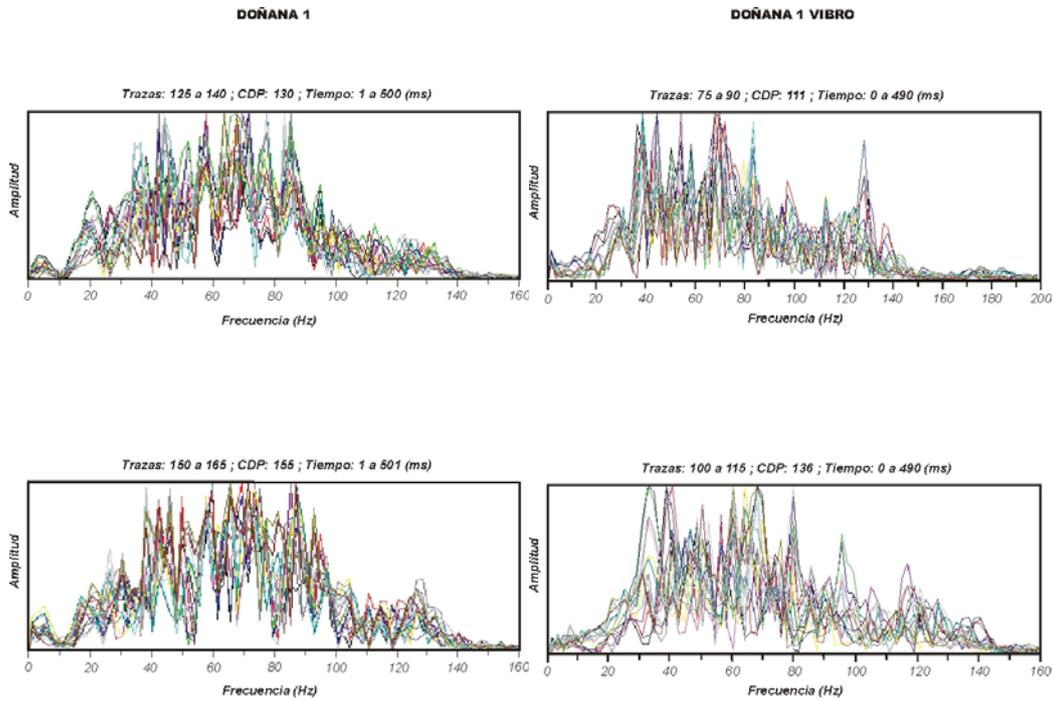


Fig. 258. Ejemplo de espectro de frecuencias para varios conjuntos de 15 trazas registradas con cartucho pirotécnico en el perfil Doñana-1 (izquierda) y vibro VIBSIST-50 (derecha)

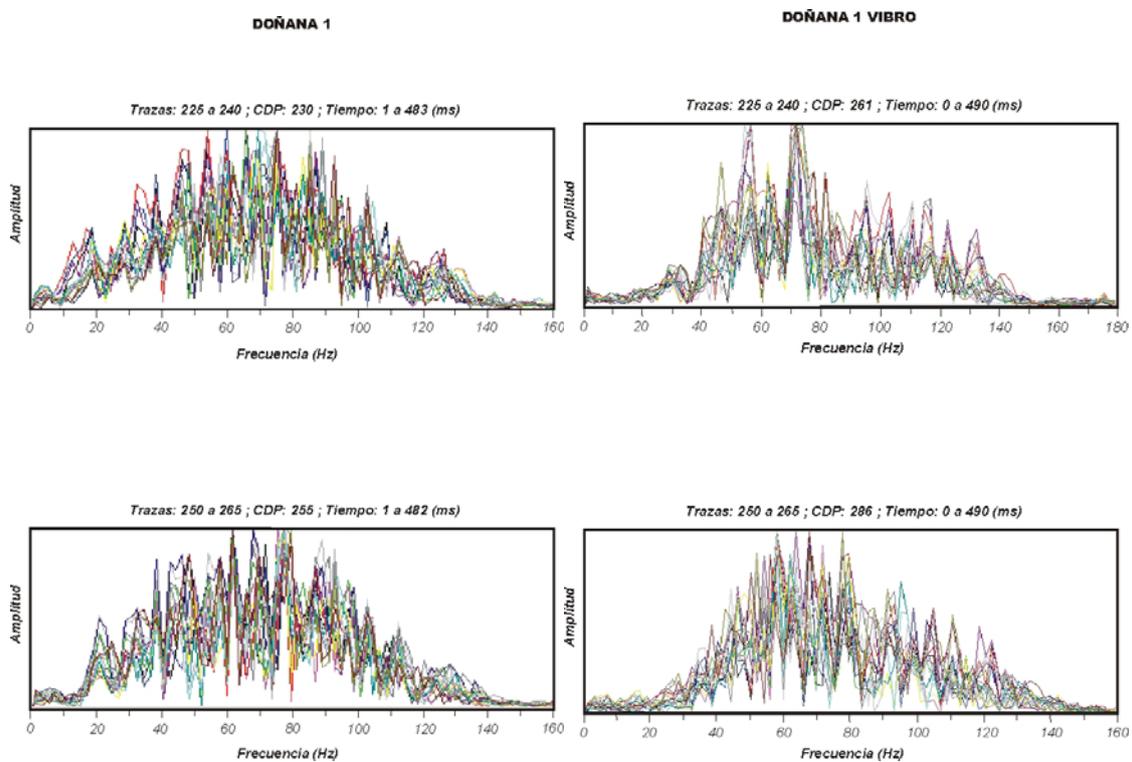


Fig. 259. Ejemplo de espectro de frecuencias para varios conjuntos de 15 trazas registradas con cartucho pirotécnico en el perfil Doñana-1(izquierda) y vibro VIBSIST-50 (derecha)

Las porciones comunes del perfil Doñana-1 registradas con ambas fuentes se reproducen en la Figura 260. En el proceso de datos de ambas secciones se ha aplicado un filtro pasa-banda en la gama 30-55-140-150 Hz. Contrariamente a lo cabría esperar a la vista del análisis de los registros antes del proceso y de sus respectivos espectros de frecuencia, se aprecia una mayor resolución en la sección obtenida con cartucho pirotécnico. Hasta los 200 ms los reflectores obtenidos son comparables, pero no ocurre así para mayores tiempos de registro, para los que la sección obtenida con vibro VIBSIST-50 es mucho menos reflectiva, posiblemente debido a ser de menor energía. Llama la atención el diferente resultado del análisis de velocidad, con valores inferiores en los registros obtenidos con el sistema vibratorio, lo cual carece de sentido, ya que esta cuestión es independiente de la fuente de energía utilizada, y sólo está indicando el diferente criterio adoptado durante el proceso de datos.

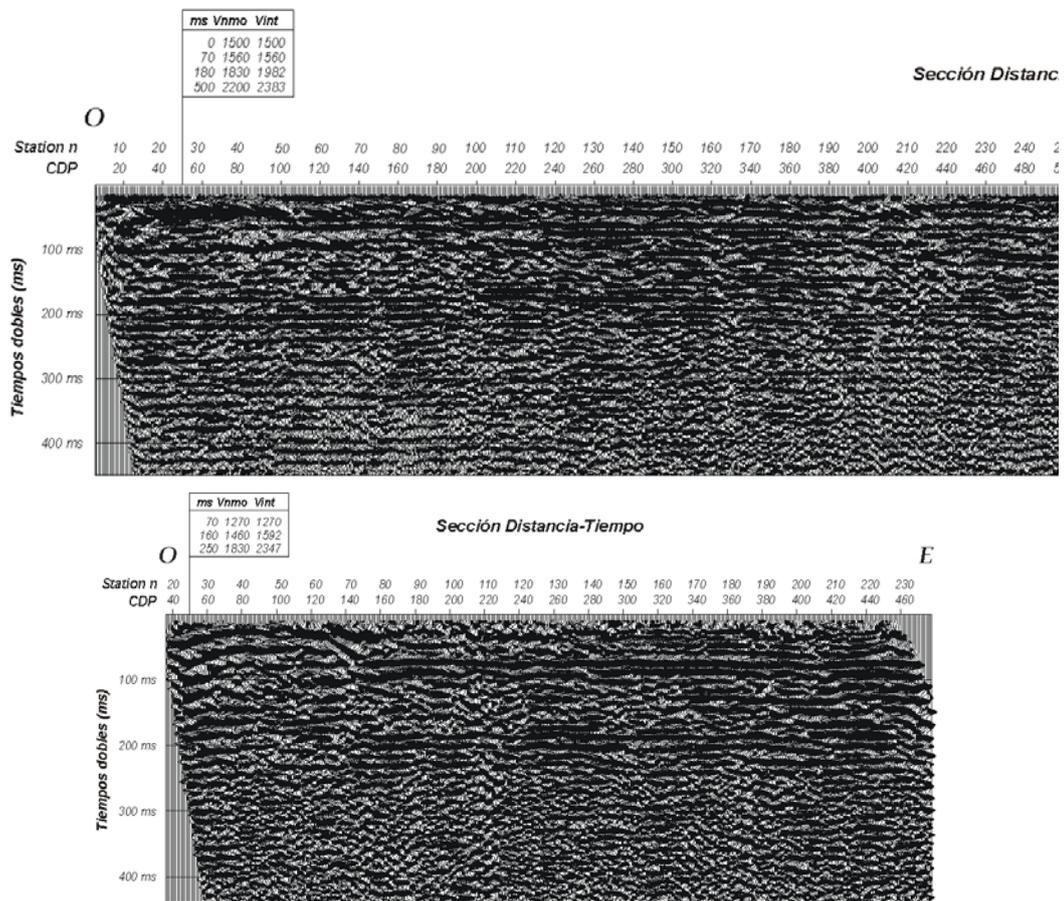


Fig. 260. Porción de la sección sísmica Doñana-1 registrada con diferentes fuentes: parte superior con cartuchos pirotécnicos; parte inferior con vibro VIBSIST-50 .

Se corrobora, por lo tanto, la impresión obtenida durante la toma de datos en campo, de que no resulta evidente la mejora introducida por esta fuente vibratoria, mucho más costosa y difícil de manejar en campo.

IV.4.6 Análisis de las secciones

Utilizando las velocidades de intervalo obtenidas a partir del análisis de velocidad para calcular la velocidad de stacking o corrección de n.m.o., las secciones tiempo-distancia se han convertido en secciones profundidad-distancia. Estas secciones serán las utilizadas preferentemente para su análisis, ya que resultan más fácilmente interpretables en términos geológicos. Se tendrán en cuenta también los sondeos mecánicos próximos a los perfiles, en donde se llevaron a cabo mediciones de down-hole (párrafo IV-4.2), que dieron como resultado que las arcillas presentan velocidad en el rango 1500-1800 m/s, las arenas 2000-2600 m/s, las gravas entre 2300-2700 m/s y las margas 2200 m/s. Las discrepancias de estos valores con los obtenidos en el proceso de datos serán comentadas en cada sección.

Todas las secciones son muy ricas en reflectores, que forman una secuencia de sedimentación de litologías muy alternantes, y normalmente de forma continua al menos en toda la longitud cubierta por los perfiles sísmicos efectuados. La no existencia de información de sondeos profundos y la correspondiente información de testificación sísmica asociada, imposibilita la asignación de reflectores a capas litológicas concretas, por lo que el análisis que va a efectuarse es más de tipo cualitativo, tratando al menos de identificar las facies sísmicas según fueron definidas en el párrafo III-2.3.

IV.4.6.1 Sección Doñana-1 (Zona Norte)

El perfil 1 ha sido ejecutado a lo largo de un camino de arena-arcilla dura, con trazado recto y horizontal; tiene orientación Oeste-Este, con origen en el Oeste. Su situación general puede verse en la Figura 248, y con detalle en la Figura 261. Los sondeos mecánicos testificados más próximo son el M-6-6 (de sólo 50 m), situado a menos de 100 m del perfil, en su parte del Este (frente a la distancia 2500 m); alineado con el perfil y 500 m hacia el Este se sitúa el sondeo Casa Bombas (S-2, de 170 m), y 300 m al norte del mismo está el sondeo Feder-4 (de 145 m, Figura 243) (pueden verse las columnas y testificaciones de todos estos sondeos en el apartado IV-2.2.2).

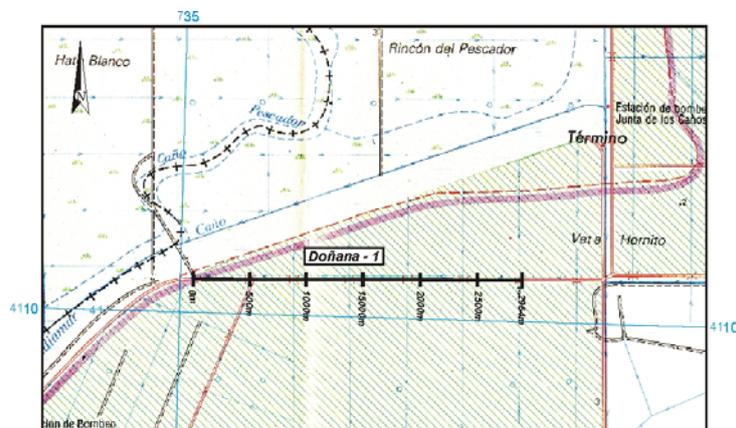


Fig. 261. Posición de detalle del Perfil Doñana-1, en la zona Norte (Casa Bombas)

En el análisis de velocidad para corrección dinámica se obtienen velocidades muy bajas (Figura 249): de 1500-1560 m/s hasta los 180 ms (unos 140-150 m de profundidad a esas velocidades), pasando posteriormente a 1982 m/s. De acuerdo con los resultados de las mediciones down-hole efectuadas en sondeos (apartado IV-4.2), estas velocidades corresponden a terrenos fundamentalmente arcillosos. La información suministrada por lo sondeos mecánicos presenta una capa de arcillas hasta los 42 m (en M-6-6) o 60 m (en S-2), pasando posteriormente a arenas con numerosas intercalaciones de gravas y arcillas; en el sondeo Feder-4 la testificación gamma natural manifiesta claramente la existencia de muchos más paquetes de margas de lo que indica la columna litológica conocida, lo que puede justificar la baja velocidad de estas “arenas”. En la medición de down-hole (referente a los primeros 120 m de profundidad (apartado IV-4.2)) se miden 1700 m/s para las arcillas, y 2000-2300 m/s para las arenas y gravas, por lo que la velocidad es algo mayor que la dada por el análisis del proceso de datos.

En la sección sísmica convertida a profundidad (Figura 262) se identifica un primer reflector (marcado en color amarillo), sobre los 50 m de profundidad, que podría ser la base de la primera capa de arcillas; en la sección obtenida con la fuente sísmica de vibración, de mayor resolución, se aprecian algunos reflectores por encima del marcado, que corresponderían a la presencia de intercalaciones de gravas.

Sobre los 150 m de profundidad se ha marcado un segundo reflector continuo (en verde), situándose entre ambos una secuencia bastante reflectiva, pero de menor continuidad, con aparentes cambios marcados por superficies de discontinuidad (en rojo) buzando hacia el Este; este tramo se debería a las arenas arcillosas, con intercalaciones discontinuas, como corrobora la difícil correlación entre sondeos mecánicos, de tramos de gravas, margas y arcillas. Por debajo de los 150 m se presenta una secuencia potente de reflectores de amplia amplitud y continuidad, con un leve buzamiento hacia el Oeste y que sobrepasan los 450 m de profundidad; existen algunas zonas de menor coherencia (p.e. entre las estaciones 150 y 180, probablemente debidas a fallos en la corrección estática y de n.m.o motivados por los errores en el tiempo cero aludidos en el párrafo 4.4.1.

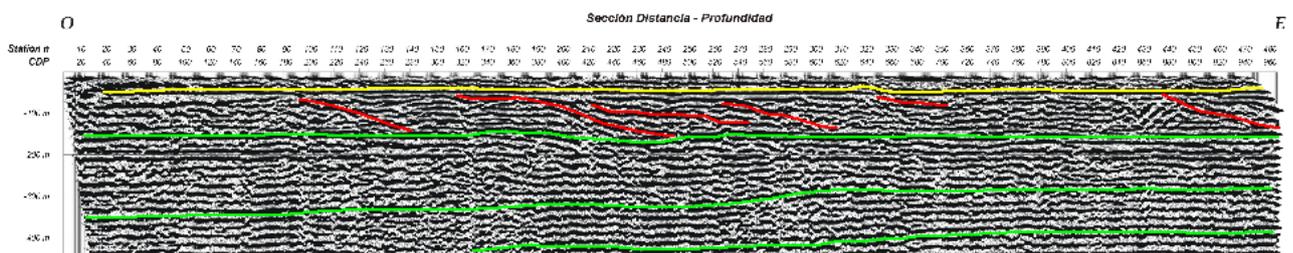


Fig. 262. Sección distancia-profundidad del perfil Doñana1 (Casa Bombas), con reflectores interpretados.

De acuerdo con la secuencia de facies sísmica definida en el párrafo III-2.4, deducida de las secciones realizadas para hidrocarburos (capítulo III, Figura 76), y con la información suministrada por los sondeos

mecánicos profundos (párrafo III-2.3 y Figura 73), la zona por debajo de los 150 m se correspondería con la facies 5, perteneciente a la unidad de tipo deltáico, pudiéndose deducir que esta sección sísmica no ha llegado a recoger la presencia de las margas del mioceno. El tramo superior, por encima de los 150 m, se correspondería con la facies tipo 6, siendo el reflector que separa ambos tramos el correspondiente al reflector nº 7 de la Figura 73 (separación entre el Grupo Marismas y el Grupo Andalucía).

Las discontinuidades con buzamiento hacia el Este observadas en el primer tramo no habían sido anteriormente vistas en las secciones sísmicas existentes, con menor detalle que las actuales; tampoco se aprecian en la sección obtenida con la fuente vibratoria en este mismo perfil, por lo que su posible significado geológico como superficies de trasgresión-regresión puede resultar aventurada, ya que puede tratarse de artefactos sin mayor significado.

IV.4.6.2 Sección Doñana- 2 (Zona sondeo BG-8)

El perfil 2, ejecutado sobre un camino de arena suelta, tiene un ligero quiebro (despreciable, o al menos causante de poca distorsión en la sección) en el centro, donde se sitúa el sondeo BG-8; su orientación es Sur-Norte, con origen en el Sur, y con ligeras pendientes ascendientes hacia el centro. Su situación general puede verse en la Figura 248, y con detalle en la Figura 263. La columna y testificación del sondeo mecánico BG-8 puede verse en el apartado IV-2.2.2, aunque por encontrarse el sondeo colmatado no pudo realizarse más que hasta los 40 m de profundidad, representándose su columna completa en la Figura 264.

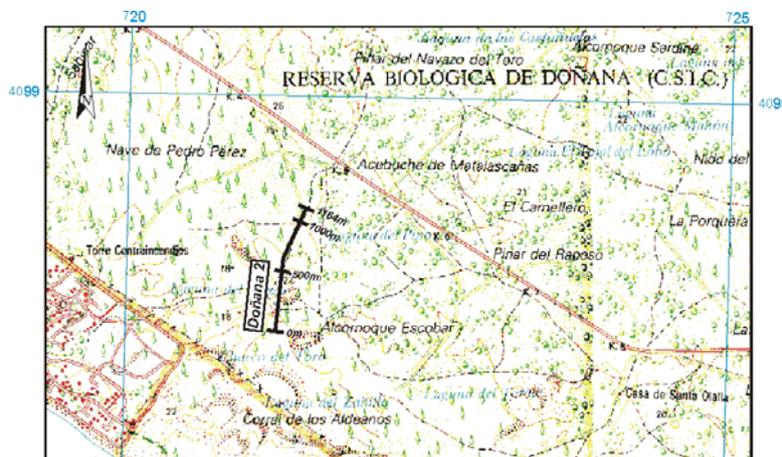


Fig. 263. Posición de detalle del Perfil Doñana-2, en la zona del sondeo BG-8

En el análisis de velocidad para corrección dinámica se obtienen velocidades excesivamente bajas (Figura 251), de 1300 a 1500 m/s hasta los 450 ms (unos 325 m de profundidad a esas velocidades), pasando posteriormente a 2700 m/s. Las bajas velocidades corresponderían a arenas muy sueltas, y por lo tanto muy amortiguadoras de la energía; este tipo de arenas no estaban presentes en los ensayos de

velocidad efectuados en sondeos (apartado IV-4.2). La velocidad a mayor profundidad corresponde a la presencia de gravas o arenas muy compactas. La información suministrada por el sondeo mecánico BG-8 (Figura 264) es una secuencia de arenas, con enriquecimientos en margas y arcilla comprobados por la radiación gamma natural, donde se detectan aun más intercalaciones que las indicadas en la columna litológica inicial, sobre todo por debajo de los 150 m. La sección en distancia-profundidad pierde bastante resolución (Figura 265), probablemente debido a que las arenas tan sueltas han amortiguado mucho las altas frecuencias, siendo mejor en este caso realizar la interpretación con la sección distancia-tiempo (Figura 266).

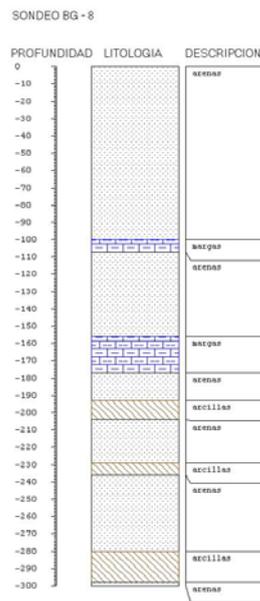


Fig. 264. Columna litológica del sondeo BG-8

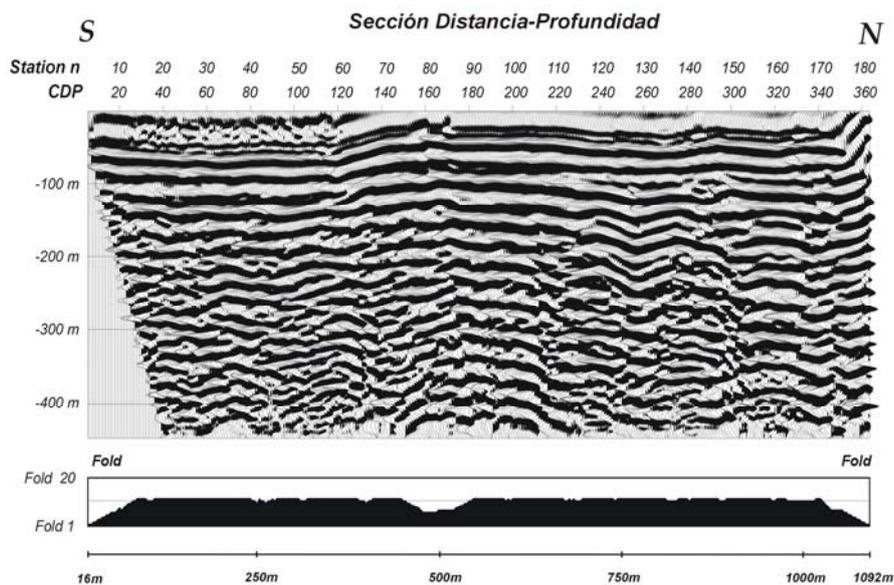


Fig. 265. Sección Doñana-2 (BG-8) en distancia-profundidad.

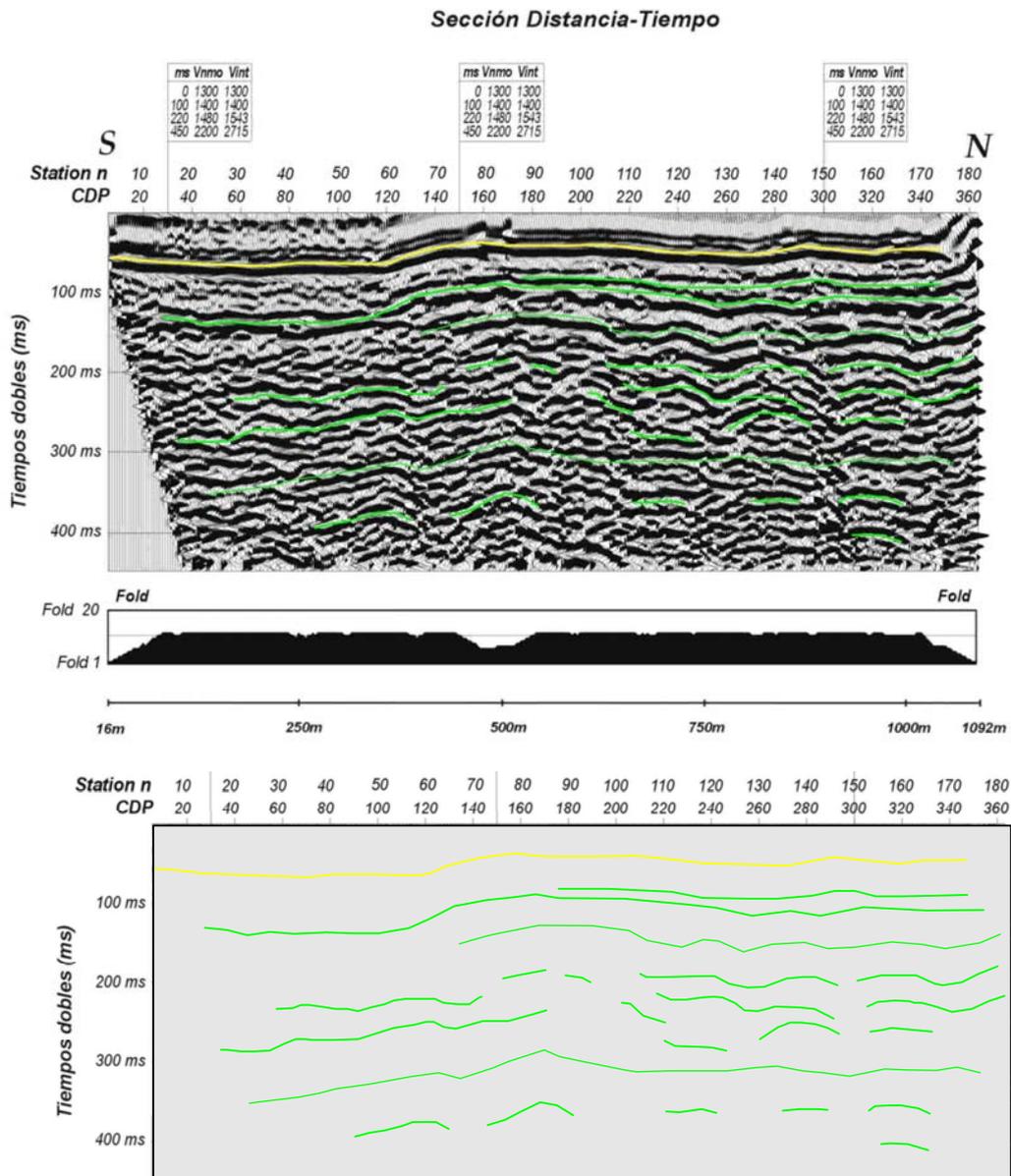


Fig. 266. Sección Doñana-2 (BG-8) en distancia-tiempo. En la parte inferior de la Figura se ha dejado solamente el picado de reflectores efectuado.

La primera superficie reflectante (margas) debe situarse a más de 100 ms (para 1300-1400 m/s), por lo que el primer reflector (trazado en color amarillo) situado sobre los 65 m de profundidad en el extremo Sur (profundidades calculadas usando las velocidades de intervalo Vint) debe representar la base de las arenas secas; el siguiente reflector (en color verde), situado a unos 80 m en el extremo Sur de la sección, marca la aparición de una secuencia, hasta el fondo de la sección, caracterizada por reflectores de gran continuidad y ligero buzamiento hacia el sur, que deben ser motivados por las numerosas intercalaciones de margas y arcillas. Los dos primeros reflectores presentan un relieve, con máximo en el centro del

perfil, que también se insinúa en los reflectores más profundos. Debe tenerse en cuenta la disminución de cobertura que indica el diagrama de explotación entorno de los 500 m de distancia (por la curvatura del perfil), y que coincide en posición con algunos de los supuestos “accidentes” del relieve, sobre todo en los reflectores profundos; no obstante, deben ser considerados con sentido real geológico. Es probable que la zona inferior de la sección (reflectores marcados en color verde) se corresponda con la facies sísmica tipo 5, representando la zona superior la unidad eólica y dunar.

IV.4.6.3 Sección Doñana- 3 (Zona Palacio de Doñana)

El perfil 3 está realizado a lo largo del borde del camino de acceso al Palacio de Doñana, sobre arena semi-compactada, horizontal; su orientación es Oeste-Este, con origen en el Oeste; los primeros 650 m son rectilíneos, curvándose posteriormente para bordear los edificios existentes. Su situación general puede verse en la Figura 248, y con detalle en la Figura 267.

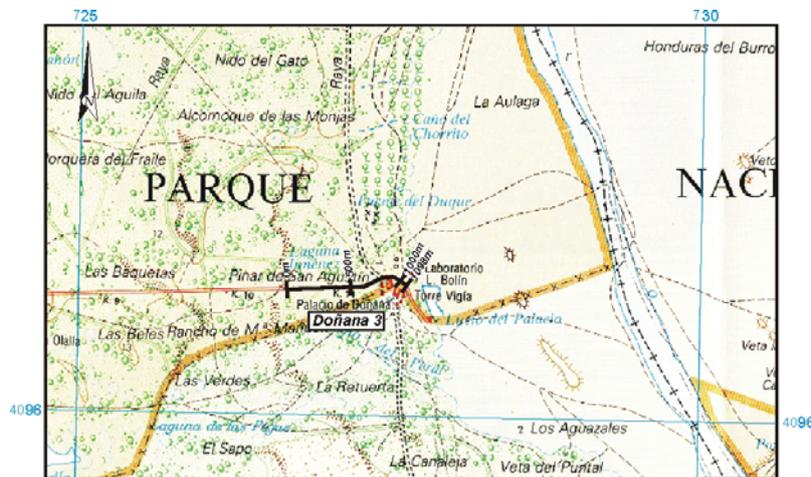


Fig. 267. Posición de detalle del Perfil Doñana-3, en la zona del Palacio de Doñana

El sondeo mecánico S-49, de 160 m de profundidad, se sitúa en el extremo Este del perfil; su columna litológica y testificación (Figura 241) indican la presencia de arenas en toda su profundidad, con alguna pequeña capa de arcillas y un paquete de 10 m de gravas a los 50 m; la testificación gamma natural detecta sin embargo la presencia de arcillas entre los 75 y 100 m de profundidad. Las velocidades deducidas de los ensayos de down-hole (párrafo IV-4.2) son de 2200-2400 m/s para las arenas, 2700 m/s para las gravas y 1500-1700 m/s para las arcillas; el resultado del análisis de velocidad (Figura 252) vuelve, nuevamente en este perfil, a dar velocidades inferiores a 1500 m/s hasta los 450 ms (lo que supone unos 315 m a 1400 m/s). En cualquier caso la profundidad máxima alcanzada por el sondeo mecánico se vería en los primeros 230 o 190 ms de sección (tomando 1400 m/s o 1700 m/s para la velocidad media de los primeros 160 m), y el primer reflector previsible (gravas a los 50 m de profundidad) sería visible a los 71 o a los 58 ms, cuestión imposible de dilucidar en la sección obtenida (Figura 252). La interpretación se va a efectuar por lo tanto tomando la sección distancia-profundidad

(Figura 268), con todas las reservas que los aspectos comentados sobre la discrepancia de velocidades impone a dicha "profundidad".

Se ha diferenciado un primer reflector (marcado en color amarillo), buzante hacia el Oeste, que marca el cambio de una secuencia superior, con más altas frecuencias que la inferior, mejor observable en esta sección que en la de tiempos. Dado que, como ya se ha comentado, el único reflector posible de identificar en la columna del sondeo se encontraría sobre los 70 ms, no es posible adjudicar a qué tramo pertenece este primer conjunto. Por debajo de este reflector, la secuencia deposicional es de mayores potencias, buzantes también hacia el Oeste, y pueden corresponderse nuevamente con la ya mencionada formación del Grupo Andalucía. La falta de coherencia entre los 500 y 750 m de distancia puede ser debida a la gran curva que forma el perfil en su mitad oriental, que puede ser también la causa de la aparente estructura que aparece en la parte final de la sección.

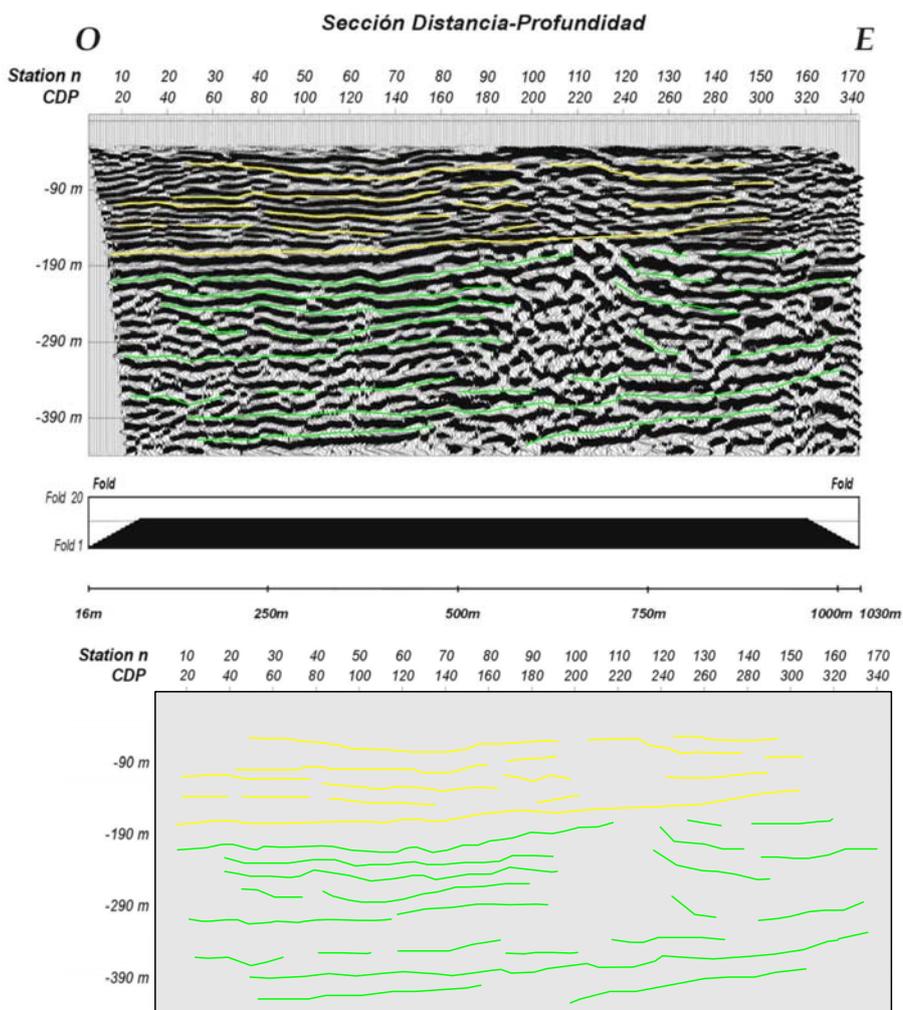


Fig. 268. Sección Doñana-3 (Palacio de Doñana) en distancia-profundidad. En la parte inferior de la Figura se ha dejado solamente el picado de reflectores efectuado.

IV.4.6.4 Sección Doñana- 4 (Zona Palacio de Marismillas)

El Perfil 4 se efectuó a lo largo de un cortafuegos, sobre arena muy suelta, orientación Oeste-Este, comenzando en el Oeste; forma una amplia curva en su primera mitad, pasando luego a ser rectilíneo; el relieve forma ligeros altibajos. Su situación general puede verse en la Figura 248, y con detalle en la Figura 269. El sondeo mecánico S-59, de 270 m de profundidad, se sitúa a unos 300 m hacia el Sur, aproximadamente en el centro del perfil. Su columna y testificación puede verse en el apartado IV-4.2, Figura 242.

Excepto los primeros 18 m de arenas, el resto son arcillas, con una intercalación margosa entre los 68-78 m. Las velocidades medidas son de unos 1500 m/s para las arcillas, que en profundidad alcanzan los 1700 m/s; las arenas tienen 2600 m/s y las margas 2200 m/s. Las velocidades obtenidas en el proceso de datos (Figura 253) vuelven a ser bastante inferiores: entre 1300 m/s y 1766 m/s. Para una velocidad media de 1600 m/s, la porción del subsuelo vista en el sondeo se correspondería con los primeros 340 ms de la sección sísmica, aproximadamente, pasando a ser los primeros 385 ms si se considera una velocidad de 1400 m/s. El paquete existente de margas, a los 70 m de profundidad, daría origen a un reflector a los 87 o 100 ms, respectivamente.

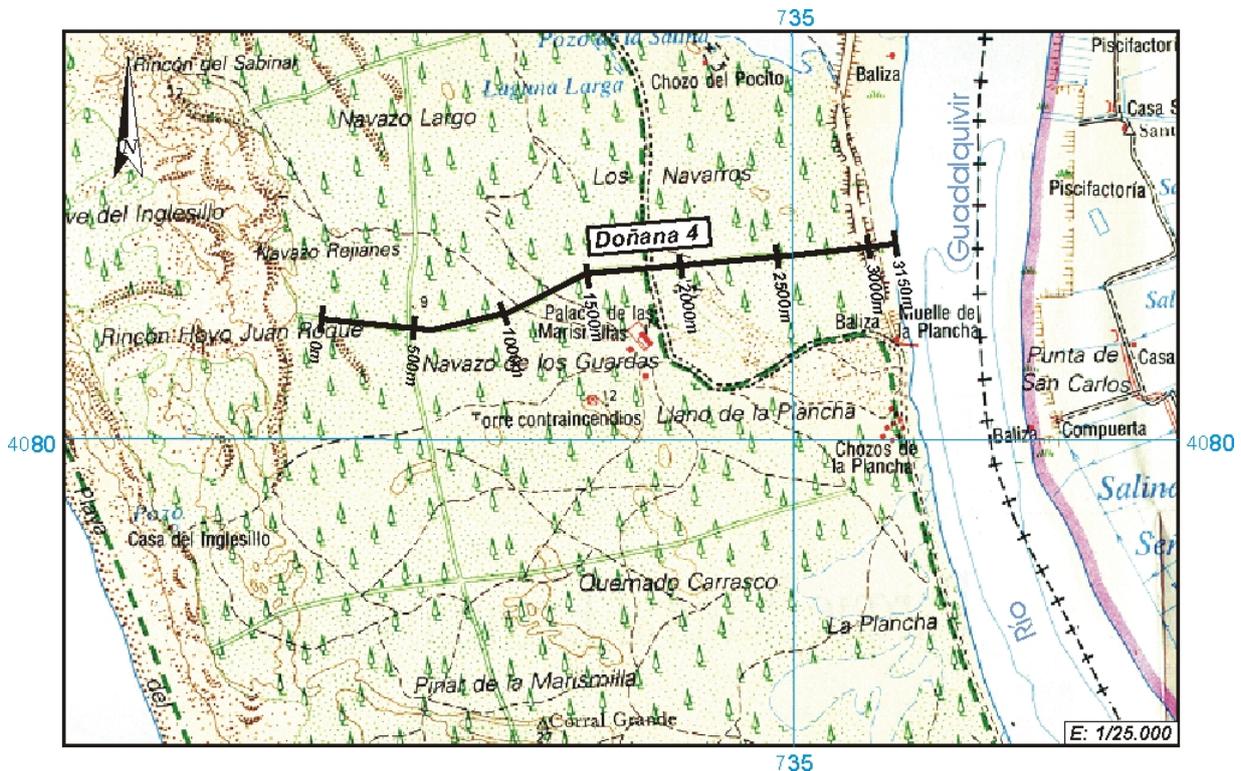


Figura 4.- Localización del perfil "Doñana 4".

Fig. 269. Posición de detalle del Perfil Doñana-4, en la zona Palacio de Marismillas

La imagen sísmica (Figura 270) tiene una facies bastante distinta de las secciones anteriores de este trabajo, no presentando tanta abundancia de reflectores de gran coherencia y continuidad. Tras proceder a un “picado” de los segmentos discontinuos más coherentes, se aprecia la posible existencia de tres ambientes distintos. Los primeros 100 ms (unos 65 m de profundidad a la velocidad adoptada para la sección distancia-profundidad), están caracterizados por buenos reflectores (indicados en color amarillo), muy coherentes y de gran continuidad en toda la sección, cuya base se correspondería aproximadamente con la zona donde la velocidad aumenta, según el ensayo de down-hole (Figura 242). El segundo tramo está formado por un grupo de reflectores (en color verde) hasta los 270 ms (del orden de los 290 m) con un trazado muy ondulado; en ocasiones (p.e. entre las estaciones 170 y 220) estas ondulaciones coinciden con la topografía del terreno en superficie; una insuficiente corrección de nivelación no produciría desniveles ficticios superiores a los 8 ms, por lo que nos inclinamos a dar crédito geológico a estas estructuras, que podrían estar formadas por rocas plásticas (arcillas, margas) con intercalaciones de arenas, y las ondulaciones ser manifestaciones de un paleo relieve más que de origen tectónico. El tercer tramo está constituido por la parte inferior de la sección; sus reflectores (indicados en color azul) se caracterizan por no presentar la marcada ondulación del tramo anterior; se aprecia un buzamiento general hacia el Oeste, y en algunos lugares puede observarse un contacto discordante con el tramo superior (p.e. bajo las estaciones 70 y 230)

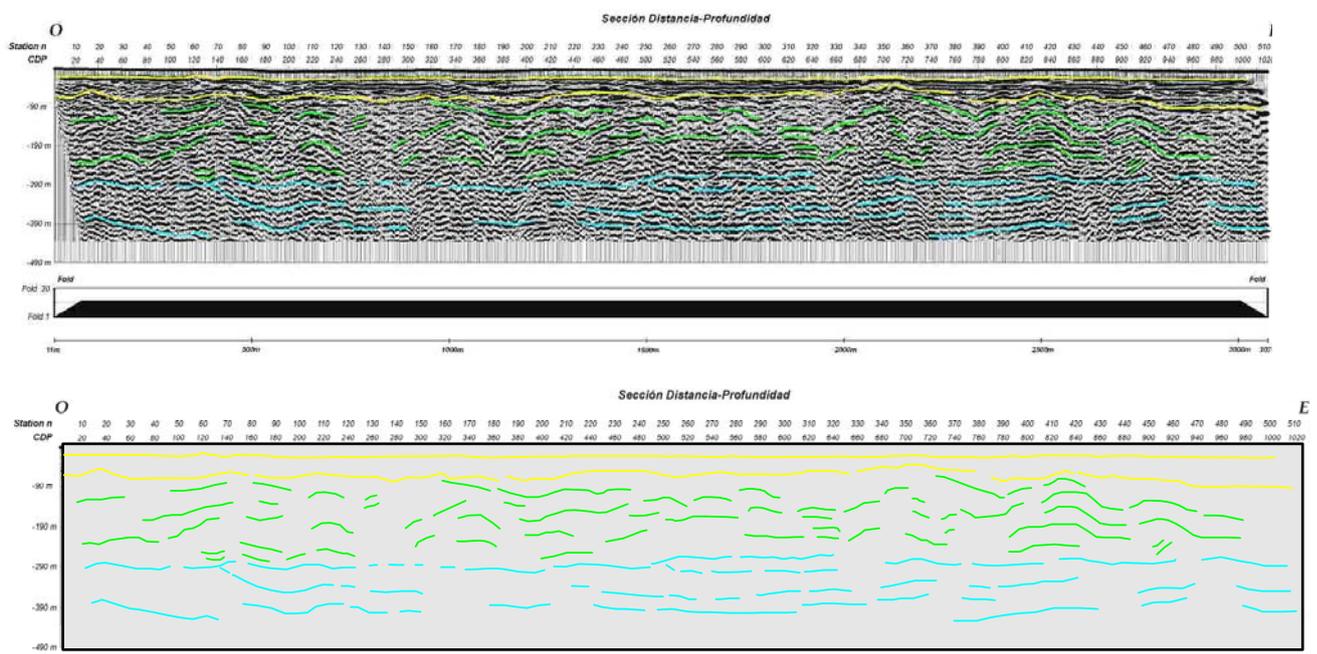


Fig. 270. Sección Doñana-4 (Palacio de Marismillas) en distancia-profundidad. En la parte inferior de la Figura se ha dejado solamente el picado de reflectores efectuado.

Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

IV.5 Trabajos complementarios realizados por el IGME en las diferentes zonas. Integración de resultados.

Además de los trabajos de Geofísica anteriormente expuestos, se han efectuado otros complementarios utilizando la instrumentación disponible en el IGME. Todos ellos están situados en las zonas seleccionadas durante la visita de reconocimiento mencionada en el apartado IV-1.2, Figura 163.

En la primera campaña de campo, durante el verano de 2001 (Figura 271), se complementaron las mediciones de SEDT, referidas en el apartado IV-3, con mediciones de SEV en las áreas de Vetalengua, Palacio de Marismillas, Palacio de Doñana y Santa Olalla; se hizo una repetición de verificación del Perfil Eléctrico de 1.5 km medido en la zona de Vetalengua, y se inició un Perfil Eléctrico de 1.5 km en la zona del Palacio de Doñana.

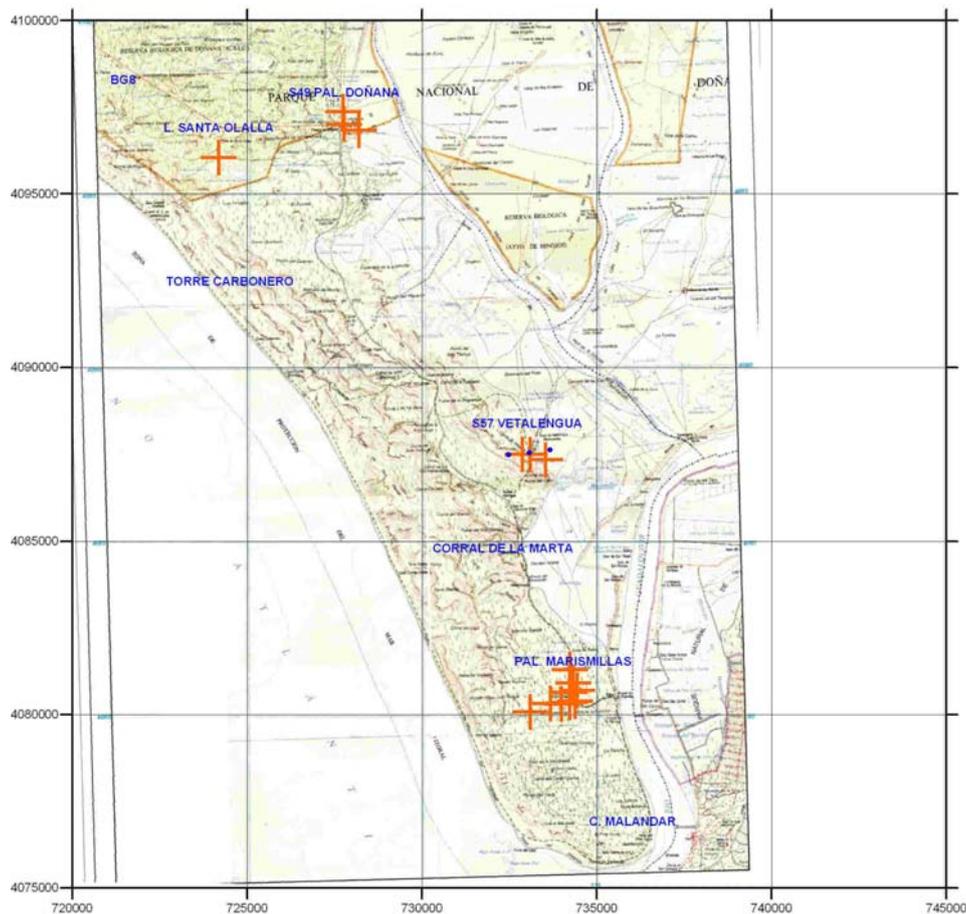


Fig. 271. Posición de los trabajos de SEV y PE efectuados por el IGME en 2001 (UTM-29).

Como consecuencia de estas mediciones y su comparación con los ensayos previos efectuados mediante las asistencias técnicas referidas en el apartado IV-3, pudo apreciarse que la situación geoelectrica existente es más heterogénea de lo inicialmente previsto, debiendo emplearse los métodos que permitan obtener una información con mayor continuidad y resolución espacial. Por esta razón, en

la segunda fase, llevada a cabo en 2002 (Figura 272), se empleó como único método eléctrico (excepto un SEV efectuado en la zona del sondeo BG8) el Perfilaje continuo, midiéndose cerca de 17 km de perfiles en las zonas de Vetaleña, Palacio de Marismillas, Malandar, BG8, Palacio de Doñana y en la zona norte. En esta última posición el perfil eléctrico fue efectuado en coincidencia con una de las líneas de Sísmica de reflexión referidas en el apartado IV-4, tratando de diferenciar las diferentes capas estratigráficas, no siempre posibles de establecer empleando solamente las variaciones de resistividad.

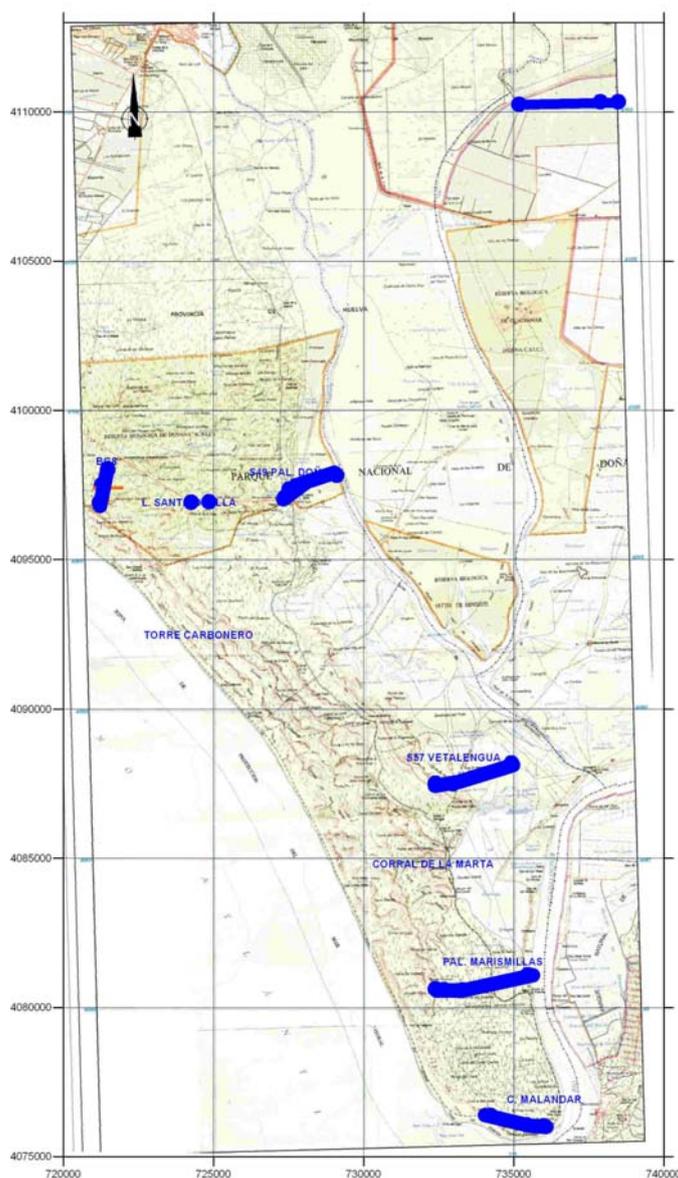


Fig. 272. Posición de los trabajos de SEV y PE efectuados por el IGME en 2002.(UTM-29)

En este apartado van a describirse los trabajos llevados a cabo directamente por el IGME, utilizando para su análisis e interpretación la totalidad de las mediciones realizadas mediante las asistencias técnicas anteriormente descritas.

Todos los datos de campo obtenidos se encuentran en el Anexo Digital IV-5.

IV.5.1 Zona de Marismillas

En esta zona, próxima al Palacio de las Marismillas (Figuras 273 y 274), se trata de estudiar la posibilidad de delimitar por geofísica de superficie el contacto de las aguas salobres (detectadas en el sondeo mecánico Marismillas S-59) y las dunas de arena situadas al sur-oeste, donde el agua es dulce, procedente de la recarga de lluvia

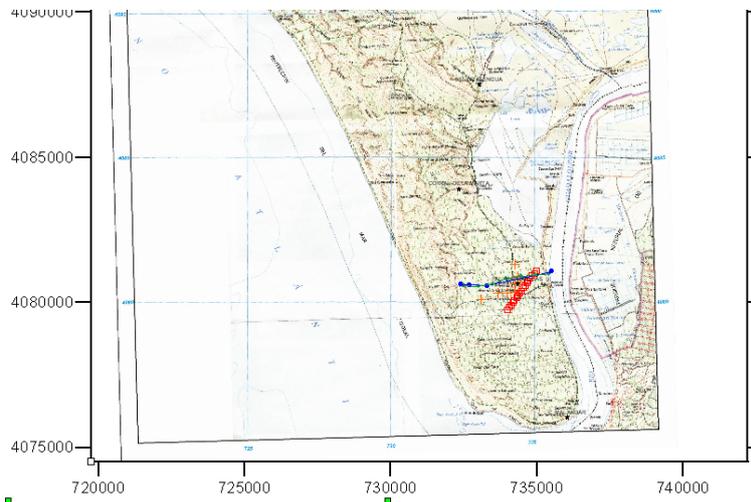


Fig. 273. Posición general de los trabajos efectuados en la zona de Marismillas (UTM29).

La totalidad de los trabajos realizados en esta zona son los siguientes (Figura 274):

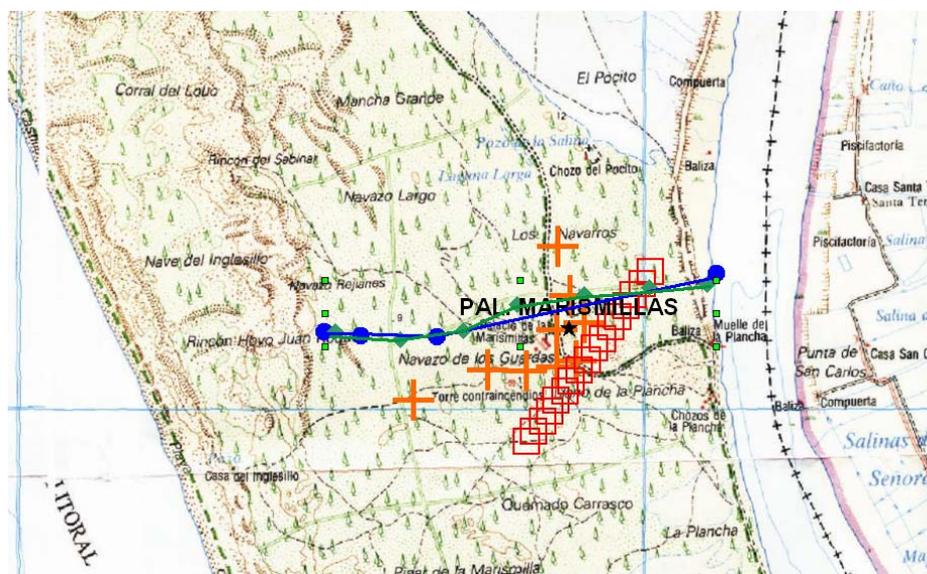


Fig. 274. Posición de detalle de los trabajos efectuados en la zona de Marismillas (UTM29): Sondeo Marismillas S-59 (estrella negra); SEDT (cuadrados rojos); SEV (cruces); sísmica de reflexión (línea verde) y Perfil Eléctrico (línea azul).

- Testificación del sondeo S-59 con los registros de conductividad y temperatura del fluido, gamma natural, gamma espectral, resistividad por inducción y down hole efectuados en 2002

- 18 SEDT de bucle 100x100 m, formando un perfil de unos 1700 m de longitud, medidos en 2001
- 9 SEV de AB variable entre 200 y 500 m realizados por el IGME (2001)
- Perfil continuo de resistividad con distancia entre electrodos de 15 m y 3 km de longitud y azimut 80°, con dispositivo Wenner, realizado con el equipo LUND del Área de Geofísica del IGME (2002).
- Perfil de sismica de reflexión, 3 km en el año 2002

Los registros obtenidos en la **testificación del sondeo S-59** en 2002 (Figura 275, derecha) indican que el nivel piezométrico se encuentra sobre los 8 m, en las arenas. Los primeros 20 m, correspondientes a un nivel de arenas según la columna litológica, vienen marcados por ser el tramo más resistivo, con valores del orden de 5 ohm.m, y con menor intensidad de la radiación gamma natural, así como una conductividad indicativa de agua salada, del orden de unos 20 mS/cm.

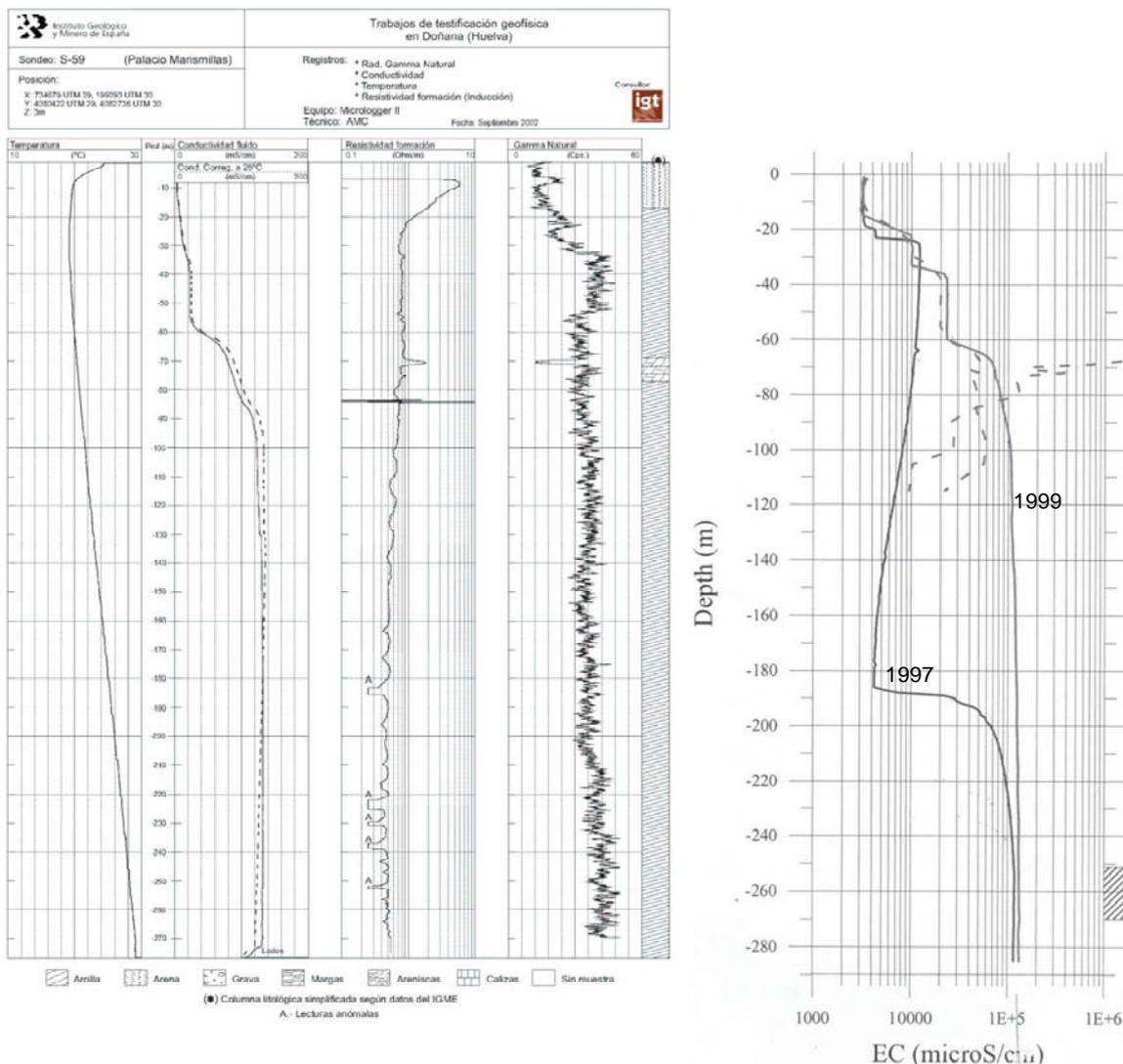


Fig. 275. Testificación del sondeo Palacio Marismillas S-59. Izquierda: medidas de 2002. Derecha: conductividad medida en 1997 y 1999.

A partir de este primer tramo, el registro de resistividad de la formación (inducción) presenta un carácter muy conductor, con resistividades inferiores a 1 ohm.m, e incluso más pequeñas a partir de los 80 m; según la columna litológica a partir de los 18 m todo el sondeo se adentra en arcillas hasta el final del mismo a los 270 m, exceptuando un pequeño nivel de margas entre los 78 y 82 m, apreciable en los registros de resistividad y gamma natural, y un tramo de limos arenosos en los últimos 60 m. El registro de gamma natural confirma la presencia de arcillas, con un tramo más arcilloso entre los 30 y 50 m, continúa con un tramo homogéneo hasta los 200 m y de ahí hasta el final presenta un ligero aumento de la arcillosidad en los últimos 60 m. El registro de conductividad del fluido indica el aumento de salinidad que se produce en el sondeo, con un primer aumento entre los 35 y 55 m a conductividades de 20 mS/cm, aumentando de nuevo entre los 60 y los 95 m hasta alcanzar una conductividad de 110 mS/cm. Este aumento de la conductividad, indicativo de un aumento de la salinidad del agua contenida en el sondeo justifica los bajos valores registrados con la sonda de inducción, asumiendo que el agua de formación en las arcillas tiene las mismas características de salinidad.

En la misma Figura 275 se han incluido los registros de conductividad obtenidos en 1997 y 1999 (comunicación personal de M.Manzano). Puede apreciarse cómo el nivel del agua muy salada (valores superiores a los 100 mS/cm) que se situaba a los 185 m en 1977, subió a los 100 m en 1999 y a los 80 m en 2002, es decir el sondeo va colmatándose de agua muy salada. El hecho de que el pequeño nivel de margas a los 78 m quede reflejado en el registro de resistividad de la formación, induce a pensar que el agua de 100 mS/cm que existe dentro de la columna del sondeo, no está presente en la formación litológica, ya que hubiera imposibilitado detectar su contraste de resistividad.

La interpretación de las curvas de resistividad aparente de **los SEDT** (capítulo IV-3.5, Figura 237, reproducida en la Figura 276), se ha realizado utilizando el modelo geológico aportado por el sondeo mecánico S-59, dando lugar a una sección geoelectrica coherente, que ha permitido establecer la continuidad lateral de las principales unidades litológicas atravesadas.

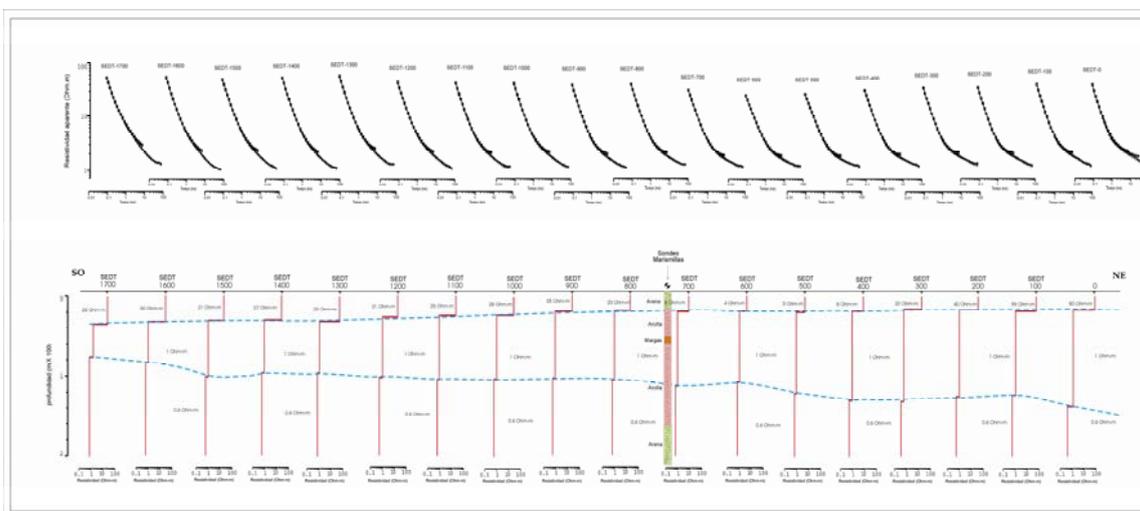


Fig. 276. Sección geoelectrica obtenida mediante SEDT en el área de Palacio de Marismillas.

Sin embargo, los débiles contrastes de resistividad existentes y los bajos valores resistividad, producen una importante ambigüedad en la interpretación convencional 1D de las curvas de los SEDT, como ya se comentó en el capítulo IV-3. En ausencia de información complementaria, la interpretación podría haberse hecho según otros modelos geoelectricos muy diferentes (llegando a otros resultados igualmente correctos desde el punto de vista geofísico, aunque seguramente no lo fueran en términos geológicos o, al menos, serían diferentes a lo que indica el sondeo mecánico). El perfil presenta un primer tramo de unos 30 a 40 m de espesor con resistividades entre 20 y 30 ohm.m que se corresponde con el primer tramo de arenas existente en el sondeo mecánico; curiosamente es en las proximidades del sondeo mecánico, SEDT 700 a 400, donde este tramo se muestra mucho más conductor, con valores entre 4 y 8 ohm.m. Por debajo, y a lo largo de todo el perfil, se muestra un tramo conductor de 1 ohm.m, que se corresponde con el tramo de arcillas indicado en el sondeo mecánico, y que se piensa que es el mismo que el tramo inferior de 0.6 ohm.m (no parece realista intentar marcar una sutil diferencia entre valores de 1 ohm.m y 0.6 ohm.m). Según este perfil parece que toda la zona contiene agua salinizada sin que se observe una transición entre una zona más resistiva (agua dulce, al Sur) y otra conductora (agua salada, al Norte).

En la **campaña de SEV** la posición de las mediciones estuvo condicionada por la necesidad de disponer del suficiente espacio para la apertura de las alas (dispositivo de electrodos de emisión A,B), utilizándose los pocos lugares con espacios naturales abiertos y cortafuegos situados próximos a la zona y a los caminos, por lo que la situación de los SEV realizados es la que se muestra en la Figura 274, no coincidente con el perfil de SEDT. Otro condicionante en la medida de los SEV fueron los pequeños potenciales que se midieron, lo que hizo que la apertura de alas tuviera que ser de menor longitud que la prevista, obteniéndose lecturas erráticas en las últimas medidas en la mayoría de los casos. Las características de los SEV medidos han sido:

Marismilla-1 AB/2 160 m (valores aceptables hasta los 100 m)

Marismilla- 2 AB/2 200 m (valores aceptables hasta los 50 m)

Marismilla-3 AB/2 250 m (valores aceptables hasta los 80 m)

Marismilla-4 AB/2 160 m (valores aceptables hasta los 100 m)

Marismilla-5 AB/2 250 m (valores aceptables hasta los 100 m)

Marismilla-7 AB/2 200 m (valores aceptables hasta los 100 m)

Marismilla-8 AB/2 126 m (valores aceptables hasta los 63 m)

Marismilla-9 AB/2 100 m (valores aceptables hasta los 100 m)

En la Figura 277 puede observarse la comparativa de las curvas de todos estos SEV. En el Anexo IV-5 se incluyen las curvas de campo con la interpretación.

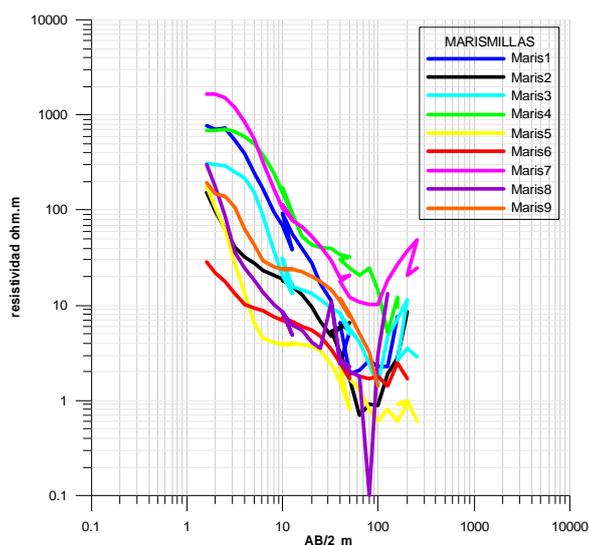


Fig. 277. Curvas de campo de los SEV realizados en Marismillas.

Teniendo en cuenta que los valores no son fiables para más de $AB/2=100$ m, todos los SEV indican una disminución constante de la resistividad con la profundidad. Dada su posición se han confeccionado dos cortes geoelectricos. El primero de ellos, de dirección norte-sur, Figura 278, es el compuesto por los SEV Marismilla7, 6, 5, 8 y 2. La representación de este corte se ha realizado proyectando los SEV sobre el perfil, por lo que los SEV Marismilla-5 y Marismilla-8 aparecen más próximos que su distancia real; en medio de los dos se encuentra el sondeo mecánico S-59. En el SEV Marismilla-7 se aprecia un carácter más resistivo, que sigue la secuencia de resistividades obtenidas en todo el perfil pero con valores más altos. El resto del perfil indica que, tras un pequeño nivel superficial resistivo, el tramo arenoso viene indicado por un nivel con resistividades entre 8 y 15 ohm.m para luego entrar en un terreno muy conductor, en el que se aprecian dos tramos, uno entre 20 y 40 metros de potencia con resistividades de 1.5 a 2 ohm.m, y el siguiente en el que la resistividad baja a menos de 1 ohm.m. Esta secuencia, que es la misma interpretada en el perfil de SEDT, es además conforme con las indicaciones de la testificación: un aumento de intensidad en el registro de gamma natural y una disminución de la resistividad de la formación en el registro de inducción, debida a la presencia de las arcillas, reforzada además por la salinidad del agua. En este supuesto, las resistividades del SEV Marismilla7 pueden interpretarse como de presencia de agua más dulce en las arcillas, lo que no es apreciable en el extremo norte del perfil de SEDT. El SEV Marismilla-8 presenta una discontinuidad con respecto al Marismilla-5 que puede ser debida a la situación real del mismo, siendo su interpretación proyectada en el perfil.

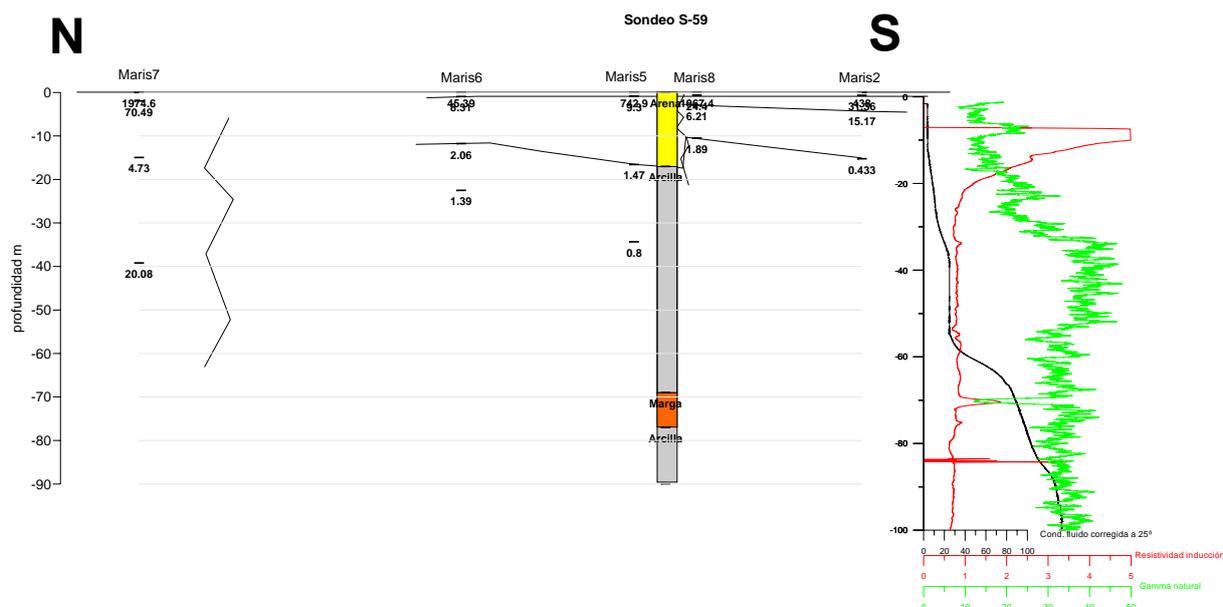


Fig. 278. Perfil geoelectrico N-S efectuado con los SEV, junto con litología y testificación del sondeo Marismillas S-59(en rojo: resistividad de la formación; en verde: gamma natural; en negro: conductividad del agua del sondeo)

El segundo corte geoelectrico, Figura 279, es el formado por los SEV Marismilla-4, 9, 3, 1 y 2, y tiene una orientación oeste-este. Por debajo del resistivo superficial existe un tramo resistivo de 14-34 ohm.m, que disminuye de espesor y resistividad hacia el este (al igual que en el perfil de SEDT) y que puede corresponderse con las arenas de la dunas con agua no salinizada; por debajo, aparece un sustrato muy conductor con menos de 1 ohm.m, y que corresponde a la zona más salinizada en las arcillas. La variación de potencia de esta capa, que aumenta hacia el Oeste, es la opuesta a la manifestada en el perfil de SEDT.

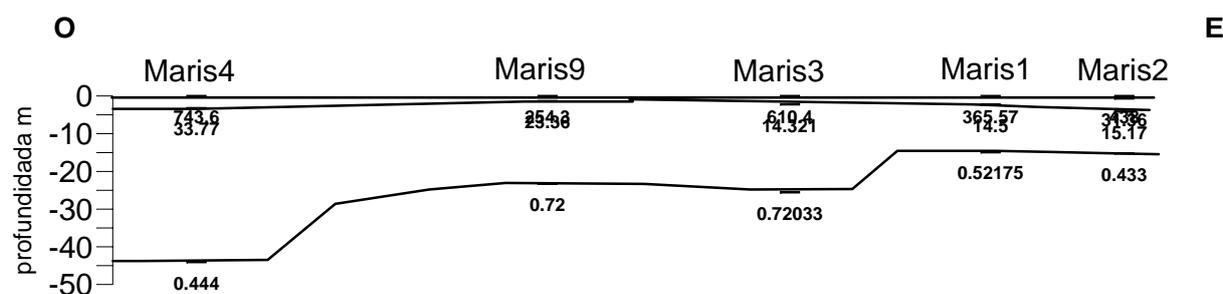


Fig. 279. Perfil geoelectrico O-E efectuado con los SEV

En cuanto al **perfil continuo de resistividad** medido durante la campaña del 2002, tiene una longitud de 3100 metros, y fue realizado a lo largo del cortafuego de dirección oeste-este que se extiende desde la zona de dunas hasta el borde del río, Figura 274. El perfil corta a la sección geoelectrica de SEV a la altura de la estación 1100, coincidiendo con el SEV Marismilla-2, y es paralelo a la sección geoelectrica O-E de SEV entre las estaciones -300 y 1150. Este perfil eléctrico se realizó a fin de comparar su resultado con los datos obtenidos mediante los SEV y los SEDT.

Se han eliminado todos los puntos cuyo error de medida fuese superior al 5%, procurando evitar de esta manera puntos ruidosos que pudiesen distorsionar la interpretación. La inversión (Figura 280) se ha realizado empleando el programa 2DINVER de Locke, obteniéndose un alto error de ajuste del 41%.

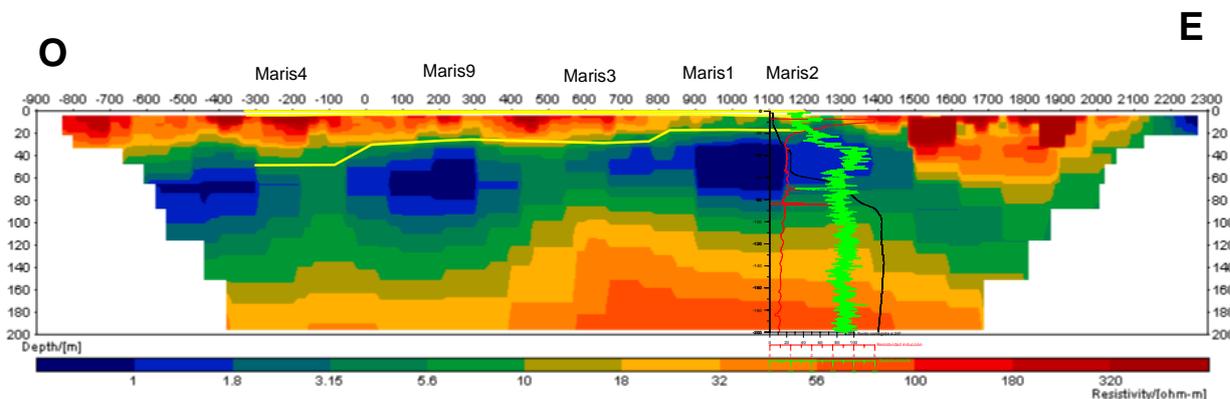


Fig. 280. Sección geoelectrica obtenida por el Perfil Eléctrico Continuo. Se ha superpuesto la interpretación de los SEV próximos (línea amarilla), así como la testificación del sondeo S-59.

Se detecta una cobertera resistiva de unos 40 metros de espesor en el extremo oeste del perfil y que se va estrechando hacia el este hasta casi desaparecer entre las estaciones 1000 y 1300, para luego volver a aparecer, y con mayor espesor, en el extremo este del perfil. Esta capa coincide con la detectada tanto por los SEV como por los SEDT. Por debajo se sitúa una capa muy conductora, que también buza y aumenta su potencia hacia el Oeste a partir del S-59, pero la dirección es la opuesta desde dicho sondeo hacia el Este, en coincidencia con lo apreciado por el perfil de SEDT; este conductor casi aflora en el Este del perfil. Finalmente, se detecta una capa más resistiva, no vista en los SEV ni SEDT, y cuya existencia tampoco puede garantizarse en la inversión del Perfil Continuo, dada la baja resistividad de la capa anterior, y que además no es vista en el registro de resistividad del S-59. En la sección se han representado también los registros de gamma natural, resistividad de la formación y conductividad del fluido medidos en el sondeo S-59, y el corte geoelectrico número 2 que es paralelo al perfil. Como puede apreciarse en la figura 280 la correspondencia entre los dos perfiles es muy buena, coincidiendo en ambos la situación del techo del tramo más conductor.

Por lo que respecta al **perfil sísmico** efectuado de forma paralela al perfil eléctrico (Figura 274), y que ha sido descrito en el capítulo IV-4.6.4, la interpretación de sus horizontes sísmicos (Figura 266) se reproduce con escala vertical más exagerada en la parte superior de la Figura 281.

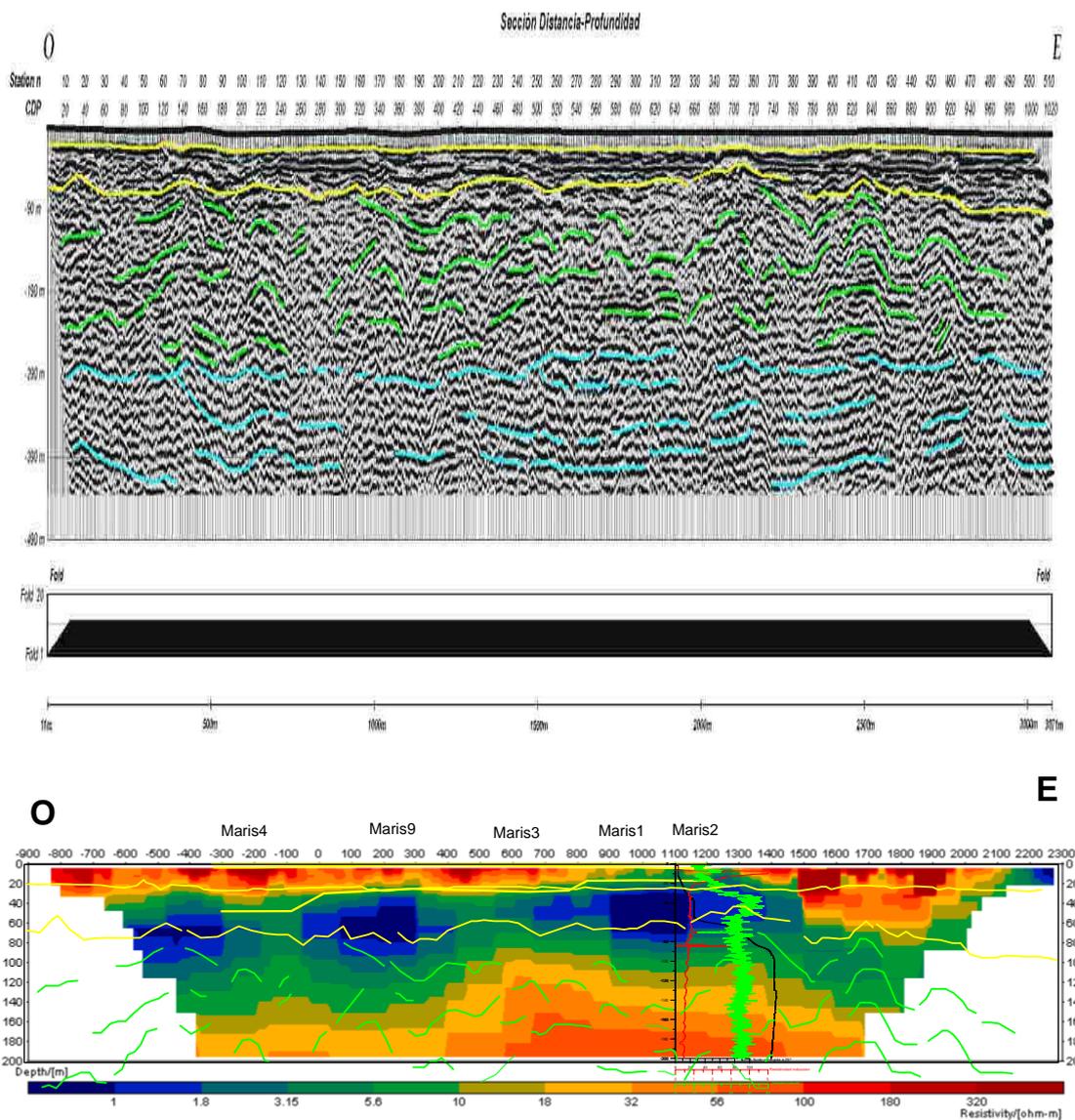


Fig. 281. Parte superior: sección sísmica interpretada. Parte inferior: superposición de los reflectores sísmicos a la sección geoelectrónica.

Como ya se comentó en el capítulo IV, la imagen sísmica de esta sección (Figura 281, parte superior) no presenta abundancia de reflectores de gran coherencia y continuidad, posiblemente debido a la absorción de la energía por las arenas sueltas del cortafuegos donde fue efectuada. Tras proceder a un “picado” de los segmentos discontinuos más coherentes, se aprecia la posible existencia de tres ambientes distintos. Los primeros están caracterizados por buenos reflectores (indicados en color amarillo), muy coherentes y de gran continuidad en toda la sección, cuya base se correspondería aproximadamente con la zona donde la velocidad aumenta, según el ensayo de down-hole (Figura 242). El segundo tramo está formado por un grupo de reflectores (en color verde) hasta los 290 m con un trazado muy ondulado; en ocasiones (p.e. entre las estaciones 170 y 220) estas ondulaciones coinciden con la topografía del terreno en superficie; una insuficiente corrección de nivelación no produciría desniveles ficticios superiores a los 8 ms, por lo que nos inclinamos a dar crédito geológico a estas estructuras, que podrían estar formadas por rocas plásticas (arcillas, margas) con intercalaciones de arenas, y las ondulaciones ser manifestaciones de un paleo relieve, más que de

IV-5 Realización de nuevos ensayos de metodología geofísica: Trabajos complementarios. Integración de resultados 468

origen tectónico; se aprecia un buzamiento general hacia el Oeste, siendo hacia el Este en el extremo oriental. El tercer tramo está constituido por la parte inferior de la sección; sus reflectores (indicados en color azul) se caracterizan por no presentar la marcada ondulación del tramo anterior; en algunos lugares puede observarse un contacto discordante con el tramo superior (p.e. bajo las estaciones 70 y 230).

La superposición de estos reflectores hasta los 200 m con la imagen eléctrica (Figura 281, parte inferior), permite apreciar una franca correspondencia de facies sísmicas y eléctricas. El primer reflector del tramo superficial (reflectores de mayor intensidad horizontales y continuos), marca la base del tramo inicial resistivo (>20 ohm.m), excepto en el extremo oriental, donde pasa a marcar la base de un resistivo superior a 200 ohm.m; según la columna del sondeo se trata de arenas. El segundo reflector "amarillo" marca la base de un primer tramo arcilloso, de menos de 2 ohm.m, y manifestado así mismo por la testificación gamma natural. En el extremo oriental, este reflector marca el paso del resistivo de más de 200 ohm.m a un tramo más conductor, en total coincidencia con la sección geoelectrica. El segundo tramo de reflectores ("verdes") se sitúa en la zona de terrenos con resistividad superior a los 2 ohm.m, que en la parte central del perfil supera los 100 ohm.m, formando una estructura abovedada, lo que da buzamientos hacia ambos extremos, según indican los reflectores sísmicos. De acuerdo con la testificación, este tramo tiene un inferior contenido en arcillas según la intensidad de la radiación gamma, y, puesto que la testificación de la resistividad de la formación no manifiesta ningún aumento de la misma con la profundidad, cabe volver a concluir que el agua contenida es salada.

Finalmente, el cuerpo resistivo (más de 100 ohm.m) de la parte central de la sección geoelectrica no coincide con ningún marcador sísmico, y, dada su discrepancia con la testificación eléctrica del sondeo S-59, parece muy probable que sea un artificio de la inversión del perfil eléctrico, que no sería válida a más de unos 120 m de profundidad. Según la sección sísmica, existe la posibilidad de un tramo de distinta litología (reflectores "azules"), aparentemente discordante con el superior, pero a mucha mayor profundidad.

En la Figura 282 se representa un esquema geológico-conceptual de este perfil, donde se ha dejado el aludido tramo resistivo de existencia poco probable. Este esquema es la respuesta al interrogante planteado en esta zona sobre la superficie el contacto de las aguas salobres (detectadas en el sondeo mecánico Marismillas S-59) y las dunas de arena situadas al sur-oeste, donde el agua es dulce, procedente de la recarga de lluvia.

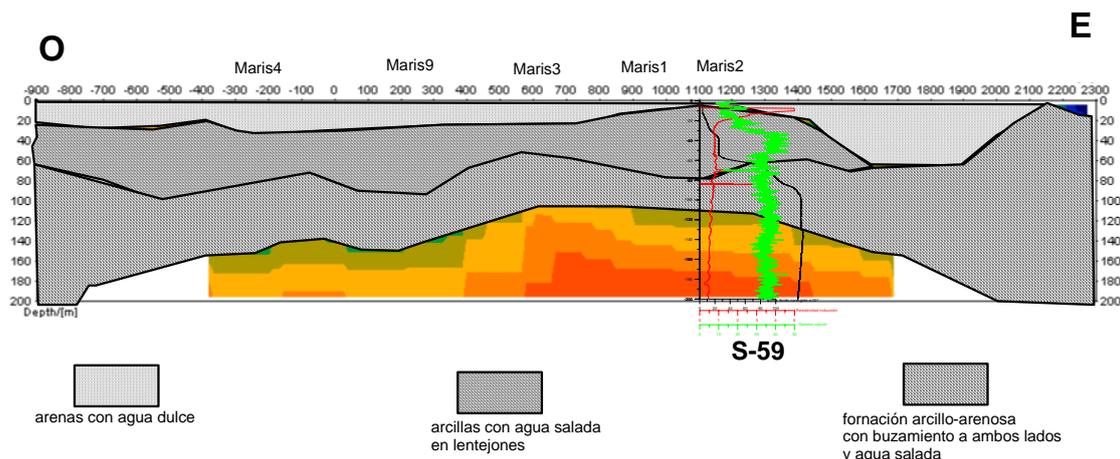


Fig. 282. Esquema de Interpretación geológica del perfil de Palacio de las Marismillas.

Como resumen podemos decir que la zona del Palacio de Marismillas está fuertemente salinizada, con extensión hacia el oeste; según se aproxima hacia la zona del palacio y del sondeo mecánico, esta salinización se hace más superficial y casi desaparece en la parte final del perfil según se acerca al río. Este modelo viene confirmado por las interpretaciones de los SEV, SEDT, el perfil eléctrico continuo realizado y la sección sísmica. Tanto en los SEV como en los SEDT el carácter conductor de la zona ha impedido una mayor penetración obteniéndose información de los primeros 100-120 metros en el perfil continuo, por lo que aunque en su representación se observe un tramo resistivo por debajo del conductor, es posible que esto se deba a una mera representación gráfica de la salida del programa de inversión y que en realidad no se haya profundizado por debajo del conductor, como parece indicar el alto valor de conductividad del fluido y el bajo valor de resistividad de la formación registrado en el sondeo mecánico a esas profundidades.

Metodológicamente, cabe concluir que los perfiles eléctricos son una buena opción para este tipo de investigaciones, siendo la geometría aportada por la sísmica complementaria de la información de las resistividades de las formaciones.

IV.5.2 Zona de Palacio de Doñana

Se encuentra próxima al Palacio de Doñana, hoy en día centro del CSIC, y cercana a las instalaciones de la Estación Biológica de Doñana (Figura 283), situándose en la zona de transición de los materiales Pleistocenos-Holocenos a la Marisma. Se han llevado a cabo los siguientes trabajos (Figura 284):

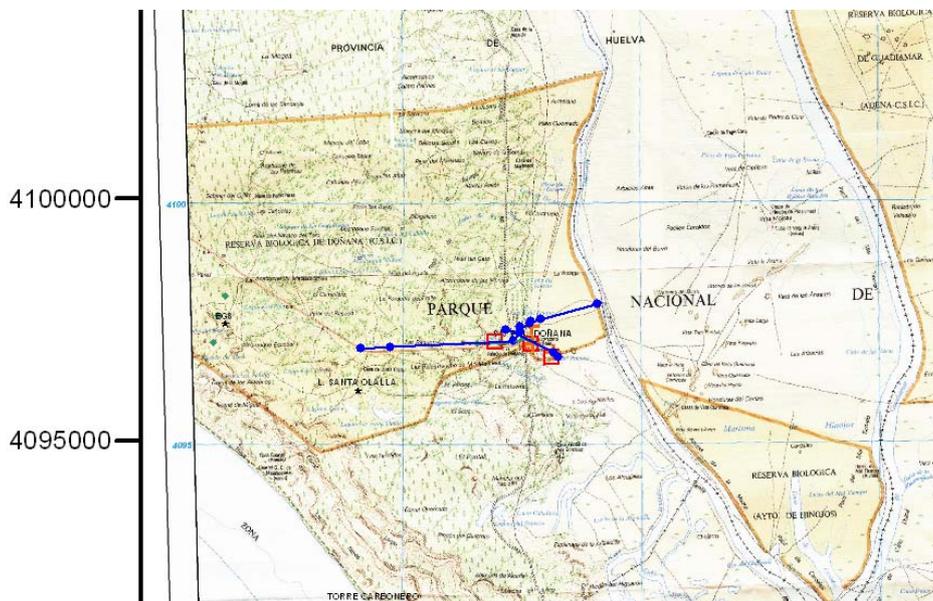


Fig. 283. Posición de los trabajos efectuados en la zona de Palacio de Doñana.

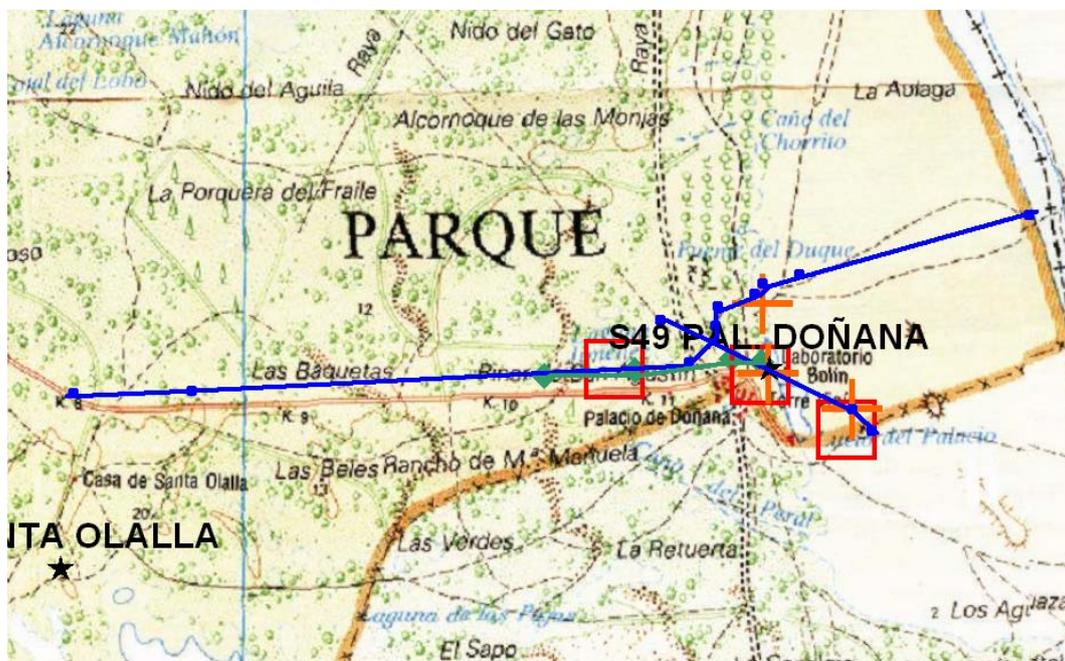


Fig. 284. Posición de detalle de los trabajos efectuados en la zona de Palacio de Doñana: Sondeo P.Doñana S-49 (estrella); SEDT (cuadrados rojos); SEV (cruces); sísmica de reflexión (línea verde) y Perfil Eléctrico (línea azul): perfil de 1.5 km de orientación NO-SE medido en 2001; perfil de 5 km de orientación O-E medido en 2002.

- Testificación del sondeo S-49 con los registros de conductividad y temperatura del fluido, gamma natural, gamma espectral, resistividad por inducción y down hole, efectuada en 2002
- Tres SEDT de 200x200 m, en 2001
- Tres SEV de AB variable, entre 1000 y 2000 m, realizados por el IGME (2001)
- Perfil continuo de resistividad con distancia entre electrodos de 15 m y 1500 m de longitud con azimut 115°, con dispositivo Wenner, realizado con el equipo LUND del Área de Geofísica del IGME en 2001, completándose otros 5 km en el mismo emplazamiento en la campaña de 2002, con azimut de 95° y partes curvadas para evitar los edificios y alcanzar la marisma
- Perfil de sísmica de reflexión de 950 m en el año 2002

En la **testificación del sondeo S-49** (Figura 285; ver también apartado IV-2) se utilizaron los registros de gamma natural, conductividad por inducción, temperatura y conductividad del fluido, así como gamma espectral.

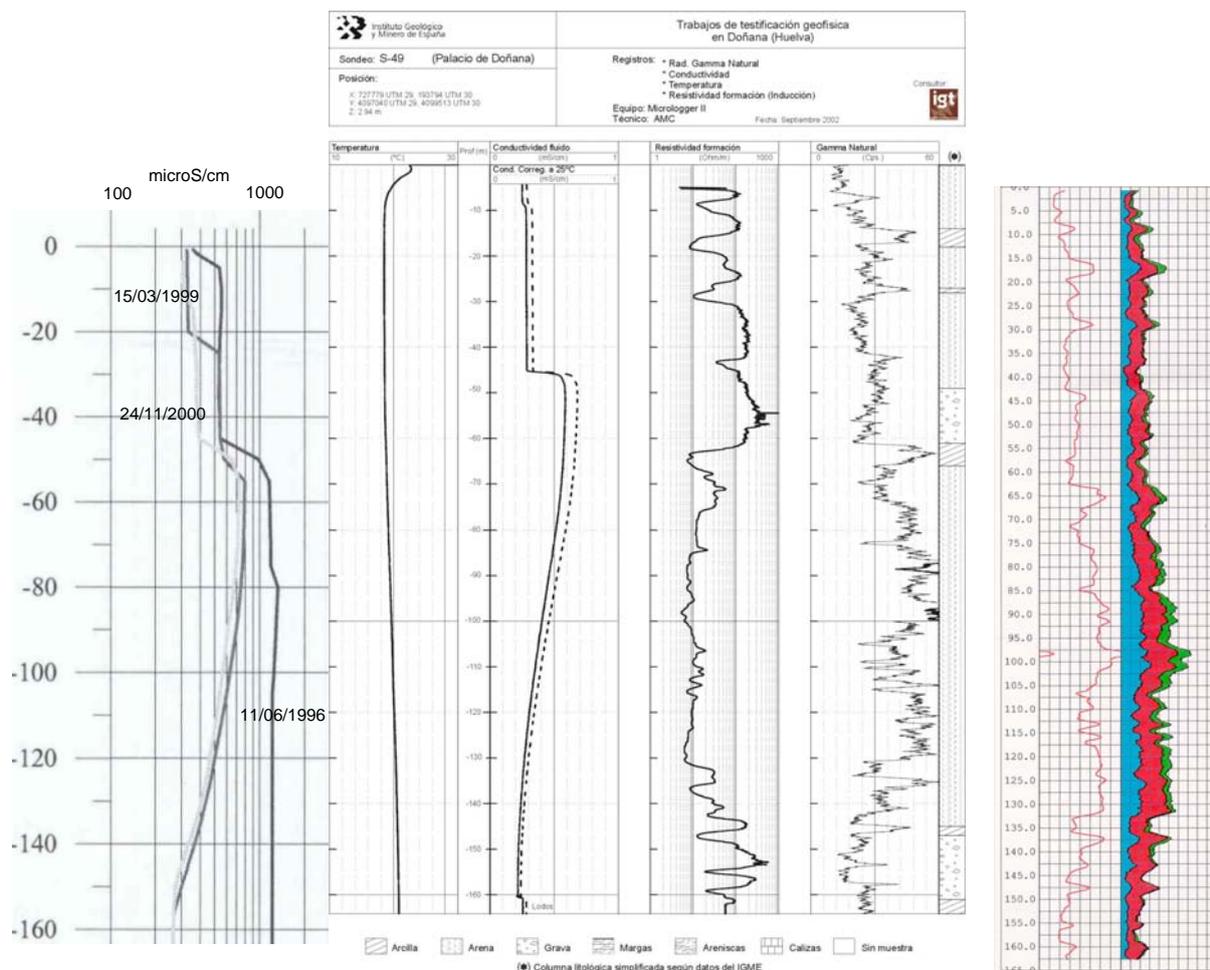


Fig. 285. Testificación del sondeo S-49, Palacio de Doñana. Izquierda: registros de conductividad efectuados en 1996,1999 y 2000. Centro: registros de conductividad-temperatura del fluido, resistividad de la formación y gamma natural (2002). Derecha: registro de gamma espectral (2002)

La litología predominante son las arenas, con alguna intercalación de arcilla y gravas. En función de los registros de conductividad medidos en otros años (Figura 285-izquierda, comunicación personal de M. Manzano) se supone que los niveles de arenas y arcillas más someros contienen agua con mayor concentración de sal que las arenas y gravas inferiores, donde el agua es la de recarga y dulce. Se dedujo que en la parte superior existen algunos puntos donde, posiblemente por imperfección en la entubación, el agua penetra en la columna del sondeo entre los 12 y los 45 m, con flujo vertical descendente entre esos puntos. El agua dulce que penetra por la rejilla (a los 150-158 m) parece estar diluyendo el agua de la entubación, dada la forma del registro de conductividad, lo que supondría un flujo ascendente. El registro actual de temperatura y conductividad pone de manifiesto que no parecen existir las aportaciones superiores, sino que a los 45 m hay un cambio neto de salinidad que, en efecto va gradualmente disminuyendo hasta llegar a la zona de filtros, donde debe penetrar el agua dulce contenida en el paquete de gravas. El registro de gamma natural indica claramente las capas de arcillas ya conocidas, añadiendo la información de que el paquete inferior de arenas, entre los 65 m y 145 m es más arcilloso que el superior, conteniendo además algunas zonas donde la arena es casi inexistente, ofreciendo un contraste apreciable con el tramo areno-arcilloso que se encuentra por encima de él y con el tramo de gravas que está por debajo.

La mayor novedad de esta testificación es la información proporcionada por el registro de resistividad de la formación: existe una clara diferencia entre las arenas situadas por encima de los 60 m (con resistividad entre 100 y 300 ohm.m) y por debajo (valores entorno a 10 ohm.m), donde estas arenas deben tener un gran contenido en arcilla, creciendo considerablemente la radiación gamma, e identificándose las zonas donde el contenido en arcillas es netamente predominante por el aumento de la relación Th/K (gamma espectral) y de la velocidad sísmica. Se detectan claramente los paquetes de gravas por el aumento de la resistividad, con independencia de que el agua contenida sea dulce o salada. Es decir, el factor que controla fundamentalmente la resistividad de la formación en este sondeo no es, aparentemente, la salinidad del agua (que con un máximo de 0.7 mS/cm correspondería a aguas con menos de 0.5 g/l de ClNa), sino el contenido en arcillas.

El perfil obtenido por correlación de la interpretación de los tres SEDT efectuados se presenta en la Figura 286. La inversión efectuada para el SEDT-8-2 se ha ajustado a la profundidad de los cambios litológicos dados por la información de la columna del sondeo mecánico S-49, lo que da como resultado una resistividad decreciente con la profundidad, reflejando el aumento de la granulometría y contenido en agua, lo que puede contrarrestar el efecto de que el agua es más dulce en profundidad (0.3 mS/cm) que en superficie, donde puede llegar a 0.8 mS/cm. Las curvas de los SEDT admiten otra interpretación, sin forzar la aparición del tramo de arcillas, pero con el mismo significado: tras un tramo de 50 ohm.m para las capas superiores a la arcilla (hasta los 60 m), la resistividad baja a 10 ohm.m, hasta llegar a la zona de gravas (160 m), donde disminuye nuevamente a 1 ohm.m. En el SEDT efectuado en las marismas (SEDT8-3) se interpreta una capa más conductora (16 ohm.m) en superficie, de hasta unos 40 m de potencia. Con la interpretación presentada en la Figura 286 (copia de la Figura 239) se puede establecer una buena correlación entre los tres SEDT: se aprecia el

carácter más resistivo que presenta la formación de arenas y gravas existente en los primeros 166 m, y el carácter conductor que presenta el nivel de gravas que existe a partir de los 166 m; en el SEDT 8-3 situado en la marisma, tras un nivel más conductor en los primeros 20 m se observan niveles más resistivos que los encontrados por debajo de la zona de arenas y dunas, finalizando también este SEDT en un sustrato conductor de 3 ohm.m.

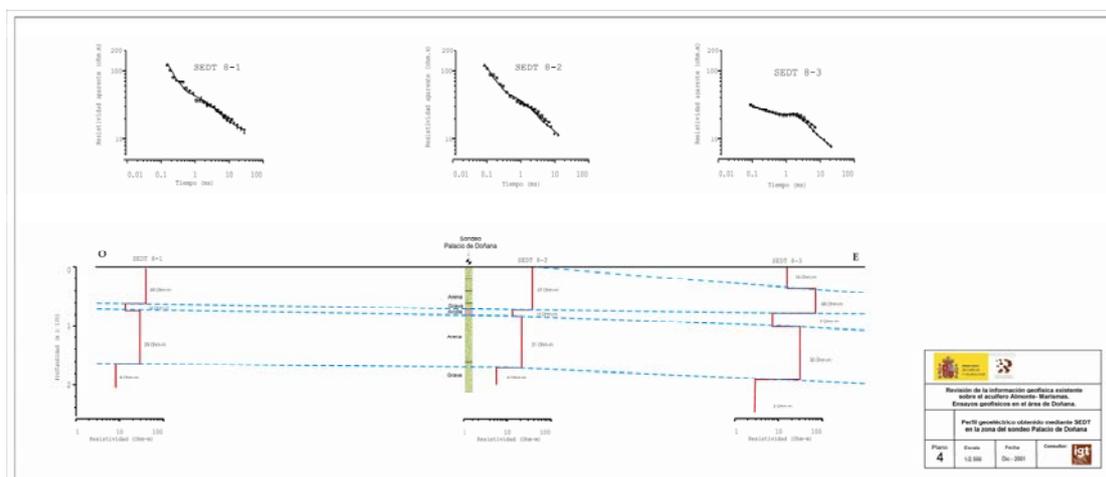


Fig. 286. Corte geoelectrico obtenido por interpretación de los SEDT en la zona de Palacio de Doñana.

Los **Sondeos Eléctricos Verticales** se efectuaron a fin de comparar los resultados obtenidos con el empleo de corriente alterna y corriente continua. Se midieron tres SEV con el equipo Syscal R2 del IGME, con dimensiones del dispositivo AB de 2000 m (SEV Pal1), 1600 m (SEV Pal3) y 1260 m (SEV Pal2), procurando que la ubicación de los SEV y los SEDT estuvieran lo más próximas posible (Figura 284). El SEV Pal2 y el SEDT8-3 se han realizado dentro de la marisma, con la totalidad de las alas y el bucle en su interior. El SEV Pal1 y el SEDT8-2 se han realizado en el borde de la marisma muy próximos al sondeo mecánico S-49 (Palacio de Doñana), con parte de las alas del SEV en el interior de la marisma y parte en la zona de arenas y dunas. El SEV Pal3 y el SEDT8-1 se encuentran en su totalidad en el interior de la zona de arenas y dunas.

Las curvas de los tres SEV se presentan en la Figura 287, observándose la mayor similitud que existe entre las curvas de los SEV Pal1 y Pal3, si bien el SEV Pal3 (en arenas) posee un primer tramo más resistivo. Los tres SEV alcanzan un sustrato conductor, menos visible en Pal1. El SEV Pal2 se ha interpretado tomando como referencia el sondeo mecánico y sus registros de gamma natural e inducción, obteniéndose un modelo de cuatro capas (Figura 288): tramo resistivo superficial de unos 4-5 m de espesor, tramo de 41 ohm.m de resistividad hasta los 30 m, seguido de un tramo más resistivo, de 155 ohm.m y de unos 30-40 metros de espesor, y finalizando con un tramo de 31 ohm.m coincidiendo su techo con el comienzo de las arenas en el sondeo mecánico; este tramo constituye el sustrato eléctrico sin que el SEV haya podido atravesarlo, por lo que, en principio, en la interpretación del SEV no se ha alcanzado el basamento conductor indicado en la interpretación de los SEDT. No obstante, es notable la diferencia entre los valores de resistividad obtenidos con los SEV y con la testificación, que presenta valores mayores (superando los 200 ohm.m).

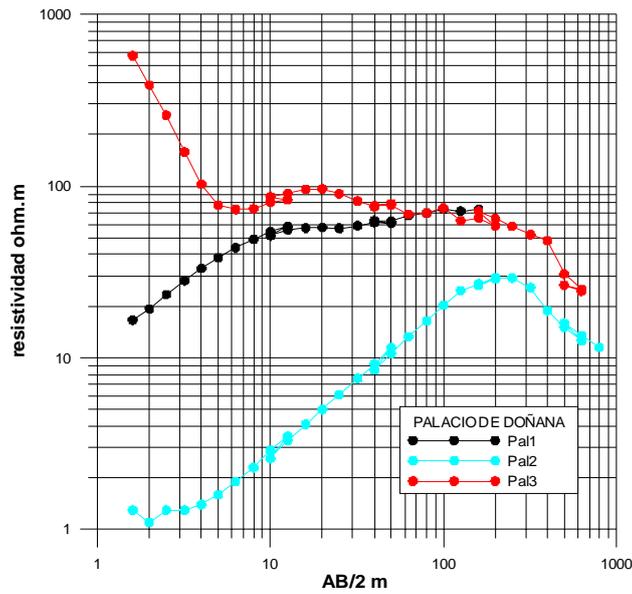


Fig. 287. Curvas AB/2-resistividad de los SEV efectuados en la zona de Palacio de Doñana.

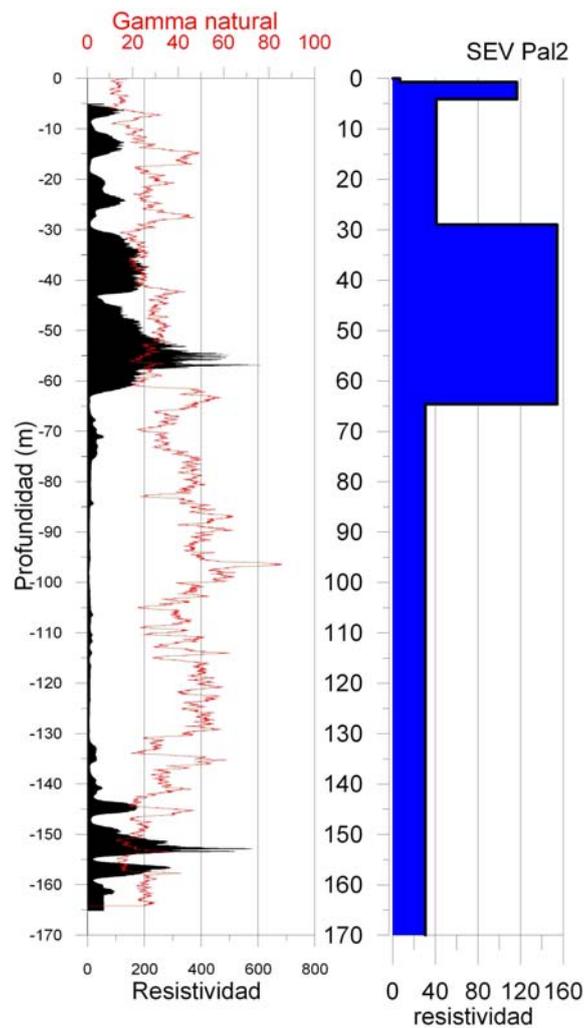


Fig. 288. Interpretación del SEV Pal2, utilizando el modelo de capas aportado por el sondeo mecánico S-49, cuyos registros de resistividad por inducción y gamma natural también se presentan.

La interpretación de este SEV ha servido de base para la interpretación de los restantes, obteniéndose el perfil de la Figura 289, en el que se ha añadido la interpretación de los SEDT. Se puede apreciar la buena correlación de los SEV Pal3 y Pal1 con el sondeo mecánico, con mayores espesores de los tramos en el SEV Pal1. El SEV Pal2, realizado dentro de la marisma, presenta un tramo conductor superficial que no se observaba en los anteriores; los tramos siguientes se correlacionan bien, pero el sustrato de este SEV muestra un carácter mucho más conductor. En todos los casos resulta difícil la correlación entre la interpretación obtenida con los SEDT y los SEV. Este perfil se ha extendido añadiendo las interpretaciones de los SEV P1-17 y MD-38, efectuadas en las antiguas campañas eléctricas (ver apartado III-3); el primero se sitúa en la zona de Parque pudiendo establecer una cierta correlación con los de la campaña actual, mientras que el MD-38, situado en la marisma, muestra un carácter más conductor que el observado en los SEV actuales.

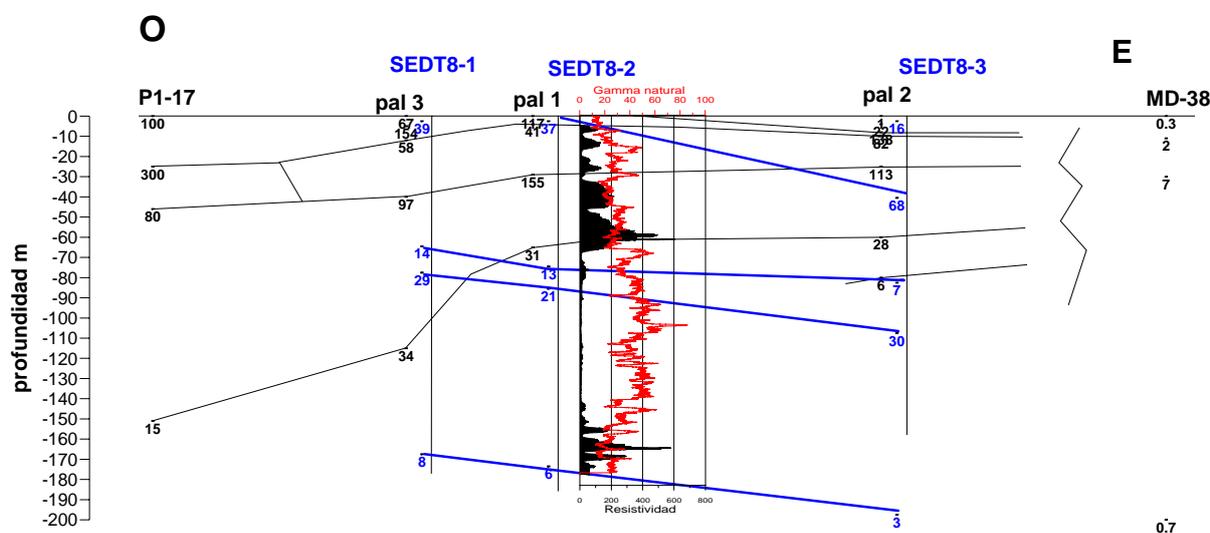


Fig. 289. Perfil geoelectrico obtenido con la interpretacion de los SEV y SEDT, incluyendo SEV antiguos y la testificacion del sondeo S-49.

La secuencia determinada por los SEDT se mantiene, con algunos matices: la resistividad decrece con la profundidad, pero con mayor número de capas. Los primeros 60-70 m, que para los SEDT son una capa de unos 50 ohm.m, se ven como dos capas: la primera hasta los 30-40 m con unos 40-80 ohm.m, seguida de otra de 100-166 ohm.m hasta los 70 m; es decir se produce un aumento de la resistividad, que ha sido integrado en una sola capa por los SEDT. Por debajo de los 70 m, la capa de 10-30 ohm.m interpretada en los SEDT se convierte aquí en 28-34 ohm.m, sin que, cómo ya se dijo anteriormente, se detecte un conductor a mayor profundidad. La capa más conductora en superficie detectada por el SEDT8-3 sigue apareciendo en el SEV PAL-2. La testificación de resistividad del sondeo S-49 corrobora con gran exactitud el resultado de los SEV, aunque, evidentemente, con mayor resolución de capas.

En definitiva podemos decir que la zona de arenas y dunas del parque en esta área posee un carácter resistivo heterogéneo, y que resulta difícil de correlacionar mediante medidas aisladas de superficie, SEV o SEDT. Por ello se consideró la realización de imágenes eléctricas o perfiles de

resistividad, que permitan obtener medidas continuas de este parámetro en un perfil y observar su evolución a lo largo del mismo.

El **perfil eléctrico** de 1.5 km medido en 2001 se encuentra (posición indicada en la Figura 284) en la zona de realización de los SEV y SEDT anteriormente descritos. La interpretación (realizada empleando el programa 2DINVER de Locke) de la parte correspondiente al sondeo S-49 está representada en la Figura 290, junto con los valores de la testificación de resistividad y gamma natural.

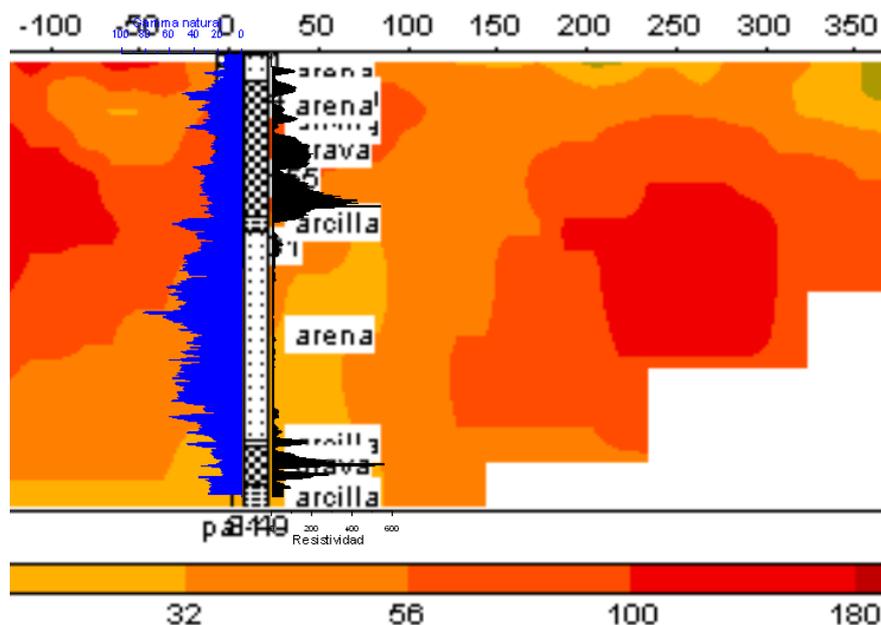


Fig. 290. Porción del perfil geoelectrico obtenido en la zona de Palacio de Doñana en 2001, entorno del sondeo S-49, junto con las testificaciones de resistividad (en negro) y gamma natural (en azul) del mismo y su columna litologica.

Existe una buena correspondencia de valores de resistividad de testificación y perfil eléctrico, evidenciando la testificación una mayor alternancia de capas, que han sido integradas en el perfil. Los valores superiores a los 60 ohm.m se corresponden con arenas (la testificación detecta las numerosas intercalaciones de arcilla, que no se ven en la sección geoelectrica) hasta unos 60 m de profundidad, mientras que por debajo las arenas son menos resistivas, con un mayor contenido en arcilla (aumento de la radiación gamma natural). La testificación del sondeo mecánico ha servido para poner de manifiesto el carácter más arcilloso y por tanto más conductor del tramo potente indicado como arenas limpias en la columna litologica inicial del sondeo.

En el perfil completo (Figura 291), se ha superpuesto la interpretación de los SEV, lo que permite apreciar una buena correlación entre ambos métodos. El perfil permite apreciar el carácter más heterogéneo que realmente existe, con la presencia de grandes lentejones resistivos con cierta continuidad a lo largo del perfil. En su mitad oriental, aunque las resistividades dadas por los SEV Pal-2 y Pal-1 coinciden bien con las del perfil, es evidente que su correlación es incorrecta, ya que

entre ambos se sitúa una intercalación mucho más resistiva. El paso de la zona de Parque a la de marisma se produce en forma de cuña, introduciéndose este material por debajo de la marisma de manera suave y gradual. Como se observa en los valores de resistividad del SEV MD-38, más en el interior de la marisma, es posible que esta situación cambie desarrollándose un ambiente conductor más potente.

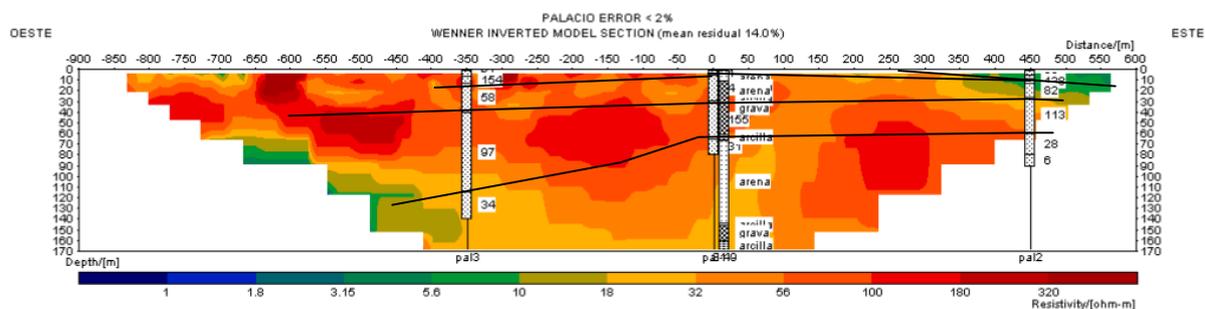


Fig. 291. Perfil geoelectrico de 1.5 km obtenido en la zona de Palacio de Doñana en 2001, junto con la interpretación de los SEV.

Durante el año 2002 se realizó un nuevo perfil continuo de resistividad, con las mismas características e instrumental que el realizado en la campaña del año 2001. Este nuevo perfil se prolongó en ambas direcciones, tanto hacia el interior de la zona de parque como hacia el interior de la marisma, con una longitud de más de 5 km (Figura 284). Por razones de espacio disponible, el perfil está realmente medido mediante dos tramos rectos, uno en la zona de Parque, a lo largo del camino de acceso, y otro en la de marisma, unidos por otro pequeño perfil casi perpendicular a los anteriores. El tratamiento de este perfil, empleando el programa RES2DIND de Locke, se ha dividido en tres tramos, Figura 292: el primero que comprende desde -600 m hasta los 2400 m y que se corresponde con el tramo recto de la zona de parque; el segundo entre los 2400 m y los 3300 m, que corresponde al tramo de unión, y el último entre los 3300 m y 4500 m, que corresponde a la zona de marisma. Estos tres perfiles se han tratado de manera independiente, eliminando de ellos los puntos ruidosos que pueden desvirtuar la inversión de los mismos. En su representación de la 292 se ha empleado la misma escala de color para codificar la resistividad que en los anteriores perfiles.

Su unión, se ha realizado eliminando primeramente los puntos ruidosos, que muestran unos grandes picos de resistividad, provocados principalmente por el cambio de orientación a lo largo del perfil, e invirtiendo a continuación el perfil completo solamente hasta los 100 m de profundidad, que es de mayor fiabilidad. Su resultado se muestra en la Figura 293. Las secciones geoelectricas representadas en las Figuras 291, 292 y 293 permiten apreciar que la imagen geoelectrica que ofrecen del subsuelo todas ellas es similar, con tramos resistivos más irregulares en el perfil total, donde resulta difícil identificar los lentejones que se observan en la Figura 291, de mayor detalle. El paso a la marisma se produce en el perfil total de 2002 de la misma manera que la observada en el perfil de 2001, de una manera gradual en forma de cuña, hundiéndose de manera progresiva a medida que se introduce en la marisma.

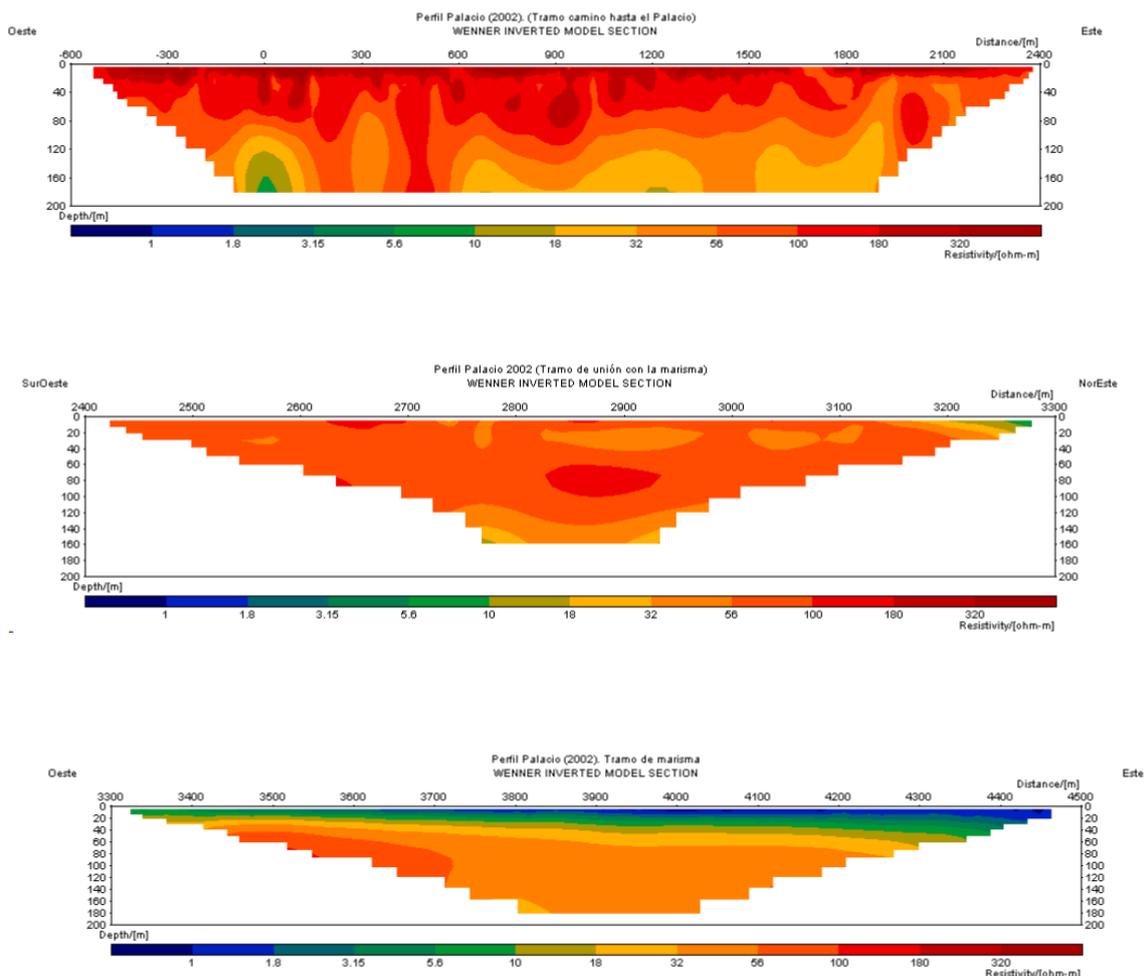


Fig. 292. Tramos independientes del perfil geoelectrico de la zona de Palacio de Doñana, medido en 2002.

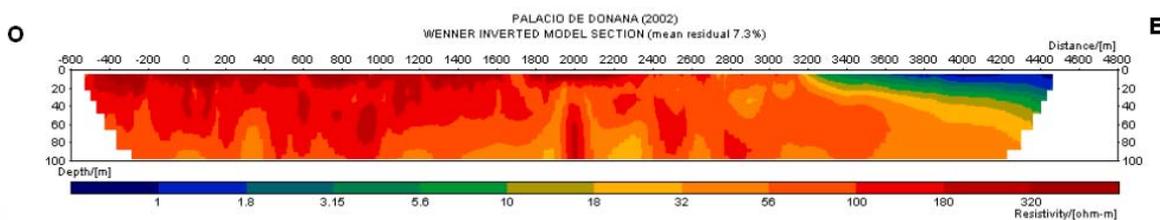


Fig. 293. Perfil geoelectrico de 5 km medido en la zona de Palacio de Doñana en 2002, formado por la unión de los tres segmentos de la Figura 292.

Finalmente, el **perfil sísmico** realizado en esta zona tiene aproximadamente 1 km de longitud, transcurriendo paralelo al perfil eléctrico efectuado en 2002 (Figura 284) entre las distancias 1800 y 2800 m. En la interpretación de esta sección sísmica (apartado IV-4.6.3, Figura 268, reproducida en la Figura 294) se ha diferenciado un primera zona de reflectores (marcados en color amarillo), buzantes hacia el Oeste, y formando estructuras sinuosas; por debajo se identifica una secuencia con frecuencias más bajas (posiblemente capas de mayor potencia), buzantes también hacia el Oeste, y que pueden corresponderse con la formación del Grupo Andalucía. La falta de coherencia entre los 500 y 750 m de distancia puede ser debida a la gran curva que forma el perfil en su mitad

oriental, que puede ser también la causa de la aparente estructura que aparece en la parte final de la sección. En la misma Figura 294 se ha representado la traslación de los horizontes sísmicos a la porción correspondiente del corte geoelectrico; en apariencia, las estructuras aisladas de mayor resistividad se identifican también en la sección sísmica. Esta circunstancia, precisamente en una parte de la sección geoelectrica donde más dudas presenta la inversión, al dar lugar a “estructuras” muy delgadas y verticales (p.e. a la distancia 2000 m), abre nuevas perspectivas. Es posible que la gran exageración vertical de la sección eléctrica provoque la aparición de formas de dudoso significado geológico.

En conclusión, en esta zona la información proporcionada por el método de perfiles eléctricos es la que mayor información proporciona, al menos hasta los 100 m de profundidad. La sísmica corrobora y ratifica esta información, permitiendo mejorar el conocimiento de su geometría. Los cuerpos de mayor resistividad se corresponden con arenas-gravas, detectándose de forma muy clara el cambio de resistividad al pasar a los materiales que forman la zona de marismas. Es notable la diferencia de buzamientos generales: hacia el Oeste en la zona de parque y hacia el Este en la de marismas.

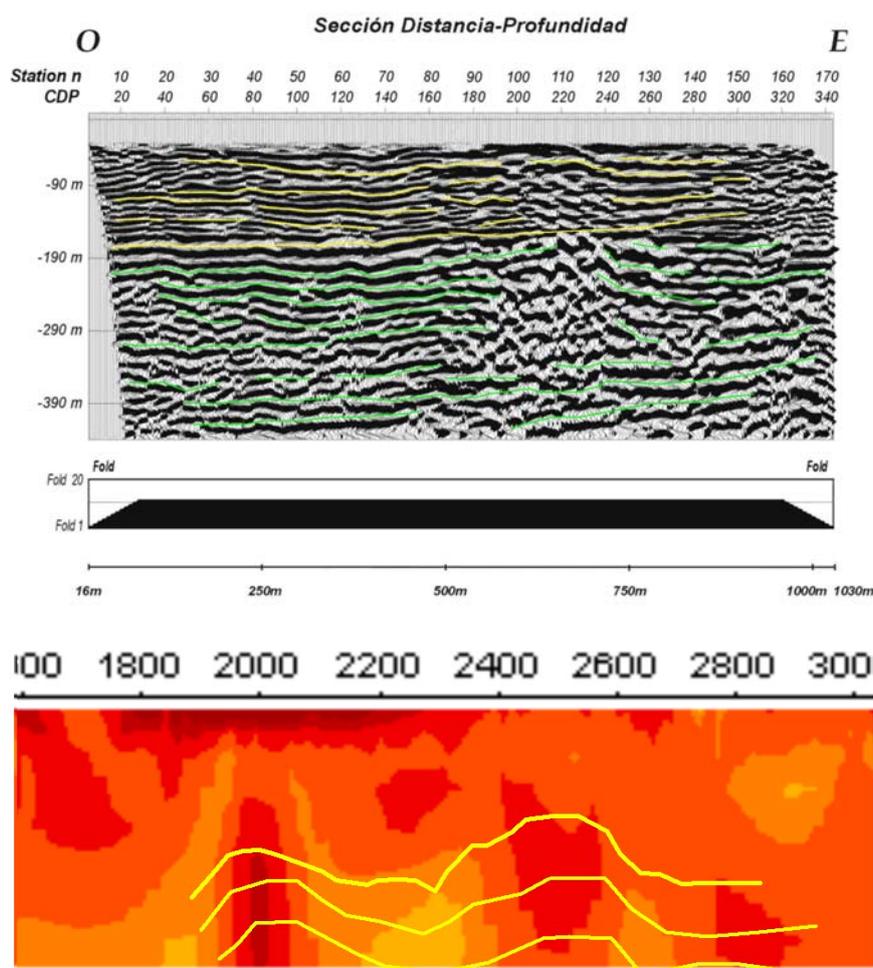


Fig. 294. Parte superior: Sección sísmica del Palacio de Doñana. Se han marcado los reflectores que diferencian las dos principales facies sísmicas observables. Parte inferior: superposición de los horizontes sísmicos de los primeros 100 m de profundidad de la sección sísmica sobre la porción de perfil geoelectrico correspondiente.

En la Figura 295 se representa un esquema general de situación, de acuerdo con la interpretación de las mediciones efectuadas, y que da respuesta al planteamiento de selección de esta zona para verificación de la posibilidad de utilizar métodos geofísicos para diferenciar el tránsito de la zona de dunas a la Marisma.

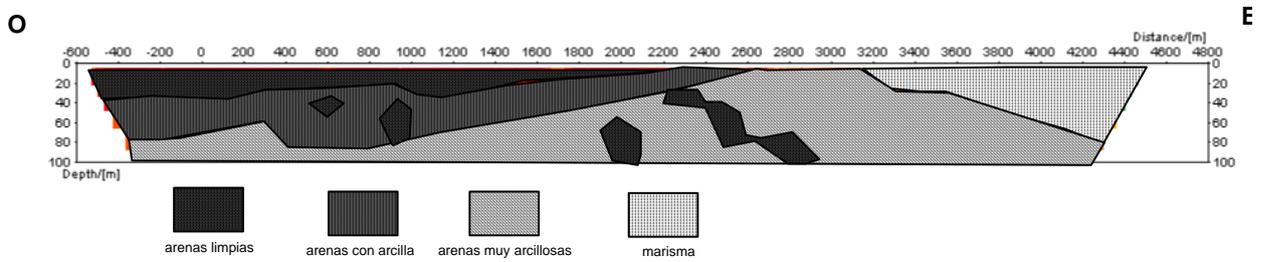


Fig. 295. Esquema de Interpretación geológica del perfil de Palacio de Doñana..

IV.5.3 Zona de Vetalengua

Esta zona (Figura 296) se encuentra próxima a la casa de Vetalengua, en el límite de las dunas con la marisma. Los trabajos realizados tienen el objetivo es ensayar la posibilidad de delimitar mediante geofísica de superficie la profundidad y forma de la interfase de las aguas salobres bajo la marisma y manto eólico, así como el contacto dunas-marisma. En ella se encuentra el sondeo mecánico S-57 de 196 m de profundidad.

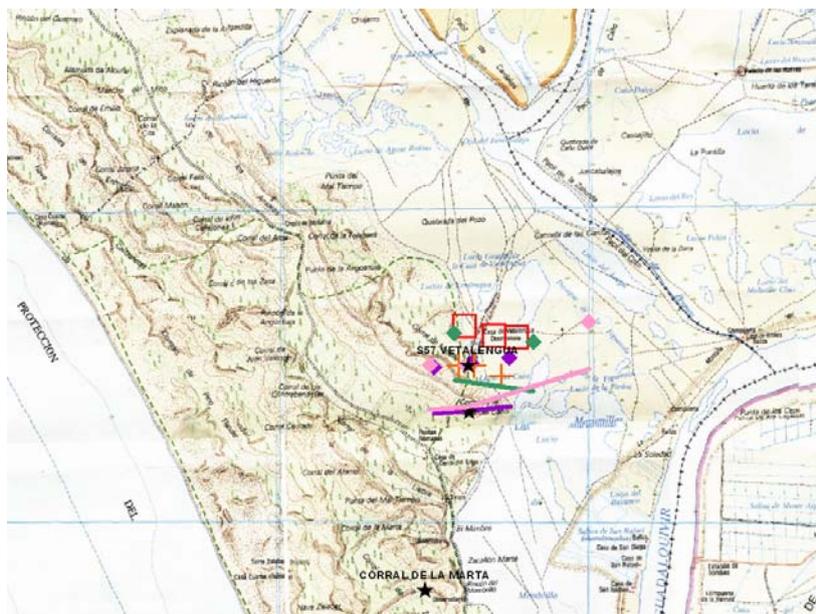


Fig. 296. Posición de los trabajos realizados en la zona de Vetalengua

Los trabajos realizados son los siguientes:

- En el sondeo S-57 se ha determinado la velocidad sísmica mediante down-hole, y se han obtenido los registros de gamma natural, conductividad y temperatura del fluido, gamma espectral (2002) y resistividad de la formación mediante la sonda de inducción (2002 y 2004).
- 3 SEV de AB entre 800 y 2000 m realizados por el IGME (2001)
- 3 SEDT de bucle 200x200 m, medidos en 2001
- 1 Perfil Eléctrico continuo con dispositivo dipolo-dipolo, con $a=10$ m y $n=20$ y 1300 m de longitud realizado en 2001 paralelo a los SEDT
- 1 Perfil Eléctrico continuo realizado por el IGME (2001), con dispositivo Wenner, distancia entre electrodos de 15 m y 1500 m de longitud con azimut 77° , completándolo a 3700 m en 2002. La primera parte de este perfil (1200 m) se ha medido también con los dispositivos Schlumberger y Dipolo-Dipolo, con distancia entre electrodos de 15 m.

Los equipos empleados son los mismos que los descritos en el apartado anterior. Su posición de detalle se indica en la Figura 297.

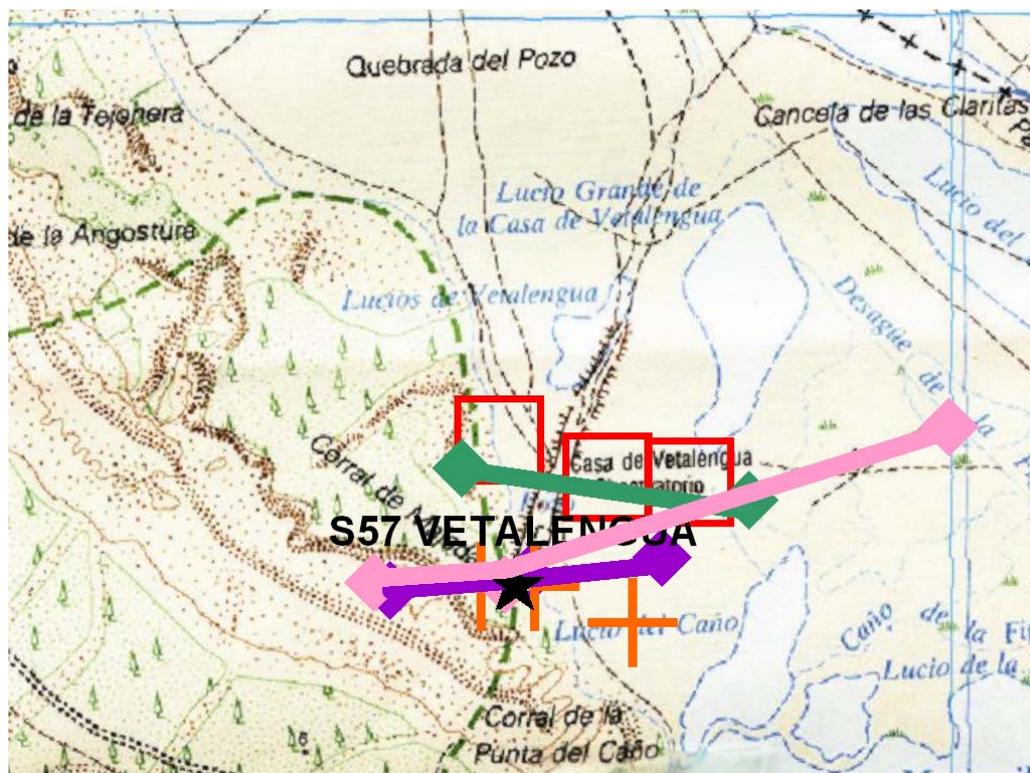


Fig. 297. Posición de detalle de los trabajos efectuados en la zona de Vetalegua: Testificación del Sondeo S-57 (estrella negra); SEDT (cuadrados rojos); SEV (cruces); Perfil Eléctrico inicial al Norte del sondeo (línea verde); PE de 1.5 km medido en 2001 junto al sondeo (línea morada); PE de 2.7 km medido en 2002 (línea rosa).

La **testificación geofísica** del sondeo S-57 (Vetalegua) se realizó en la campaña de 2002 (ver apartado IV-2.2). La litología predominante son las arcillas (Figura 298b), con intercalaciones de arenas y gravas. La conductividad del fluido es de 15 mS/cm a los 24 m de profundidad, pasando a unos 25 mS/cm a partir de los 50 m y manteniéndose estable hasta el final del sondeo; se trata por lo tanto de aguas muy saladas en toda la columna (concentraciones superiores a 10 g/l de ClNa). Comparando esta situación con la reflejada en testificaciones anteriores (Figura 298a, facilitada por M. Manzano), se aprecia que el proceso seguido por el agua contenida dentro de este sondeo es análogo al del sondeo S-49 (P. Doñana) o S-59 (Marismillas), es decir, la salinidad del agua ha ido siendo modificada por aportaciones posteriores, hasta alcanzar un nuevo equilibrio. En el caso de este sondeo, el agua en el año 1997 era dulce hasta salinizarse a partir de los 140 m. Tras periodos en que por el mecanismo de aporte y flujo ha estado más salada en la parte superior que en la inferior de la columna de agua (año 1999), la columna se ha ido de nuevo homogeneizando hasta que en 2002 aparece toda ella con agua salada de 25 mS/cm excepto en los primeros 50 m, donde aportes de agua dulce modifican la columna. En el primer tramo de arcillas se destaca una capa de arenas, no cartografiada anteriormente, entre 10 y 25 m, claramente identificada tanto por la disminución de la radiación gamma natural, como por el aumento de la resistividad; la posibilidad de que fuera un efecto relativo producido por la disminución de resistividad a partir de los 25 m, provocada por la mayor salinidad del agua de formación, puede descartarse por la información aportada por el registro de gamma espectral, que indica una presencia prácticamente nula de U en esta capa resistiva.

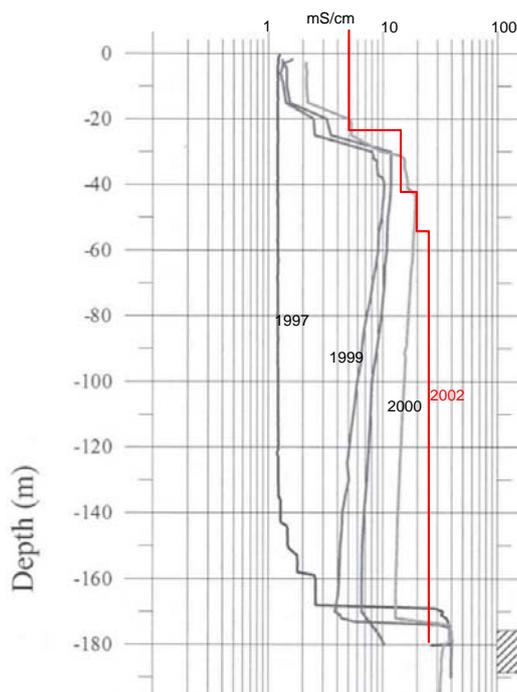


Fig. 298a. Sondeo S-57 Vetalengua. Registros de conductividad del fluido obtenidos en los años 1997, 1999 y 2000. Se ha incorporado esquemáticamente el resultado obtenido en 2002.

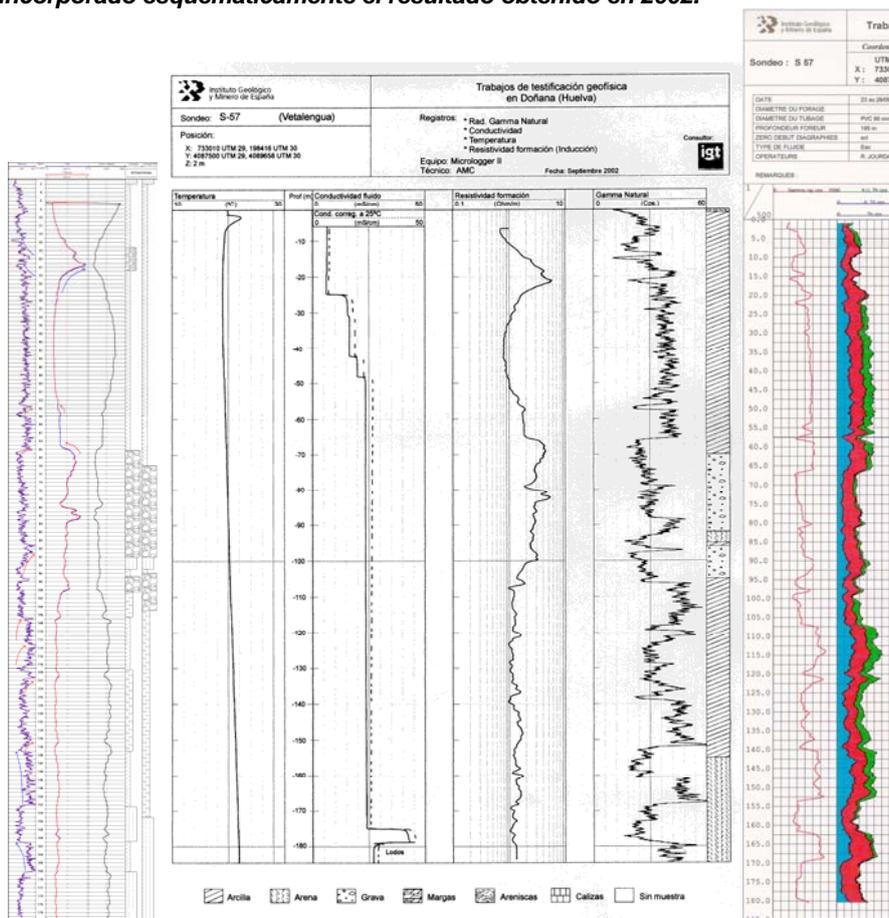


Fig. 298b. Sondeo S-57 Vetalengua. Columna litológica y testificación geofísica. Centro: testificación de temperatura y conductividad del fluido, resistividad de la formación y gamma natural (campaña 2002). Derecha: testificación gamma espectral (campaña 2002). Izquierda: testificación gamma y resistividad de la formación (campaña de 2005).

Pasado este tramo, las arcillas se manifiestan con una resistividad del orden de 1 ohm.m, mientras que en la zona del S-49 (Palacio de Doñana, Figura 285) se situaban en los 10 ohm.m; esto es posiblemente debido a la influencia de la mayor salinidad en esta zona. En efecto, el paquete de gravas y arenas situado entre los 70 m y los 100 m se identifica claramente tanto en el registro de gamma natural como en el de resistividad, pero ésta no pasa de 8 ohm.m, mientras que en el Palacio de Doñana las arenas superaban los 100 ohm.m. Por debajo de los 100 m, el registro gamma natural indica la presencia de tramos más arenosos, y marca bien el paso a las arenas inferiores, donde de nuevo se detecta una capa de arcillas no cartografiada anteriormente: mientras que estas alternancias son confirmadas por la información de la gamma espectral, no es así por el registro de resistividad de la formación, que discurre entre 1 y 2 ohm.m; por lo tanto, en estas situaciones de mayor conductividad, debido a la litología existente junto con la presencia de agua salada, hace prever que no será posible la utilización de métodos geoelectricos para discriminaciones litológicas.

En la Figura 298b se presenta también la repetición de esta testificación efectuada en la campaña de 2005 del presente Proyecto (ver apartado IV-2.3), cuando el nivel freático se encontraba a 3.18 m de profundidad, midiéndose solamente los parámetros de resistividad de la formación y gamma natural, y que corrobora la efectuada en 2002.

Respecto de los **SEV**, el SEV Veta1 se ha realizado con centro en el sondeo mecánico S-57 pero con las alas extendidas tanto en zona de dunas como en marisma, y muestra (Figura 299) una curva de morfología regular hasta un AB/2 de 125 m, variando a una curva muy irregular y no interpretable en el tramo final. El SEV Veta2 ha sido realizado en su totalidad en la zona de marisma, alcanzando un AB/2 de 1000 m. La morfología de la curva de los SEV Veta2 y Veta1 hasta AB/2 =125m es muy parecida, indicando un ambiente superficial muy conductor en los primeros 5-10 m; a continuación se pasa a un tramo más resistivo, 9 ohm.m en el Veta2 que es donde está mejor definido y que llega hasta una profundidad de unos 30 m, con un sustrato claramente conductor, que no obstante deja entrever un posible tramo resistivo a mayor profundidad.

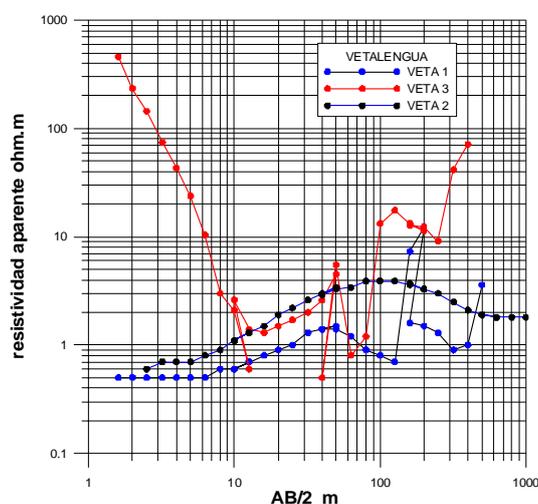


Fig. 299. Curvas AB/2-resistividad de los Sondeos Eléctricos Verticales efectuados en la zona de Vetalengua.

Este resultado es totalmente consistente con la testificación de resistividad de la formación del sondeo S-57 (Figura 301). El SEV Veta3 se ha medido con las alas extendidas totalmente en la zona de dunas, obteniéndose una curva no interpretable; esta anómala medición, así como la presentada en el SEV Veta 1 puede ser debida a la dificultad de establecer buenos contactos de los electrodos en terrenos tan resistivos como las arenas secas.

Los trabajos **SEDT** situados al norte del sondeo S-57 (Figura 297) en medio de la lengua de terreno que se introduce en la marisma, fueron comentados anteriormente en el apartado IV-3. En la Figura 300 se reproduce su resultado (copia de la Figura 239), junto con la sección del Perfil Eléctrico realizado paralelamente a los SEDT.

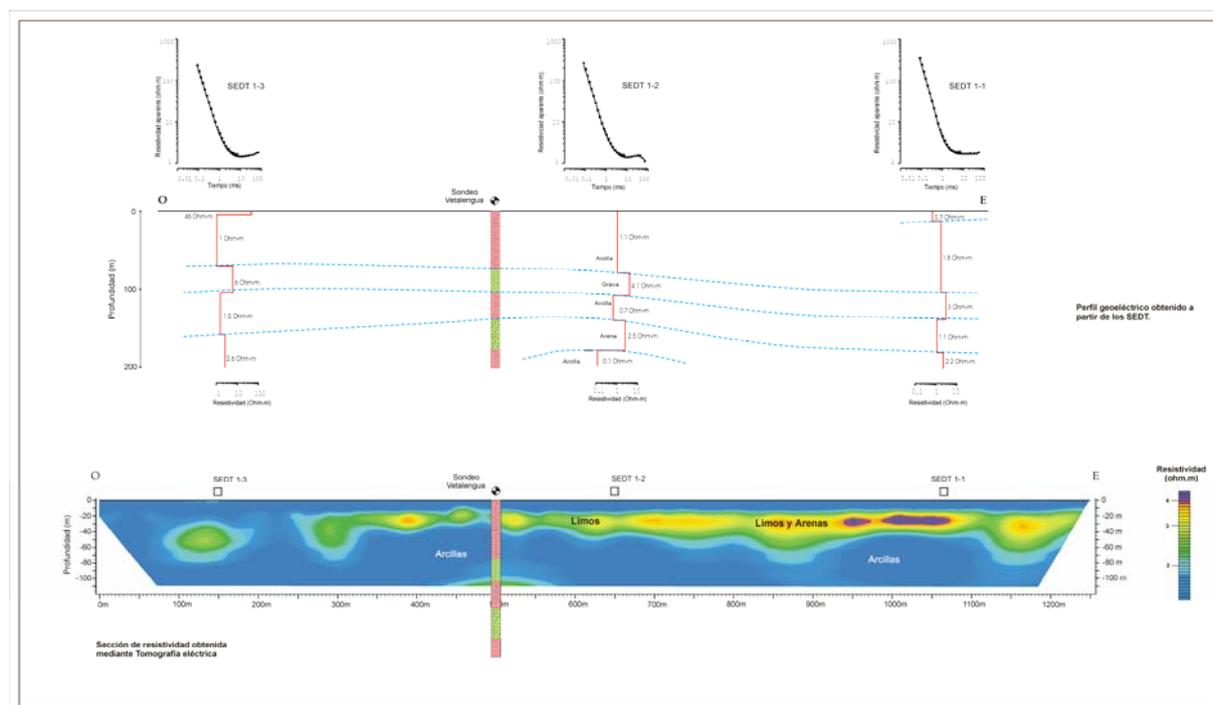


Fig. 300. Resultado de los SEDT y PE paralelo a los mismos realizados en la zona de Vetalegua.

En la forma de las curvas resistividad aparente-tiempo de los SEDT puede apreciarse que se trata de una secuencia monótona de resistividad decreciente, en la que la intercalación de cualquier otra capa de mayor resistividad en la inversión de los datos resulta posible, pero no forzosamente justificada. En efecto, la inversión presentada ha tratado de ajustar los cambios de resistividad a las profundidades dadas por los cambios litológicos del sondeo S-57, dando un resultado congruente con la información disponible: los tramos de arenas y gravas se diferencian por su mayor resistividad respecto de la arcilla, siendo además la resistividad decreciente con la profundidad, de acuerdo con un presumible aumento de salinidad del agua. Esta solución de inversión permite además una buena correlación entre los tres SEDT efectuados, e indicaría que la salinidad del agua se mantiene con iguales características en toda la sección investigada. Sin embargo, como ya se dijo anteriormente, la testificación de resistividad del sondeo S-57 (Figura 301) establece ciertas modificaciones o corrección sobre la litología dada previamente, y que no se ve reflejada en la inversión de los SEDT

por haber tomado como base los cambios dados por la columna litológica previa. Otras inversiones posibles, presentadas en el apartado IV-3.5 (Figura 236), y también representadas en la Figura 301, muestran que es posible igualmente ajustar los SEDT a soluciones más compatibles con la dada por la testificación.

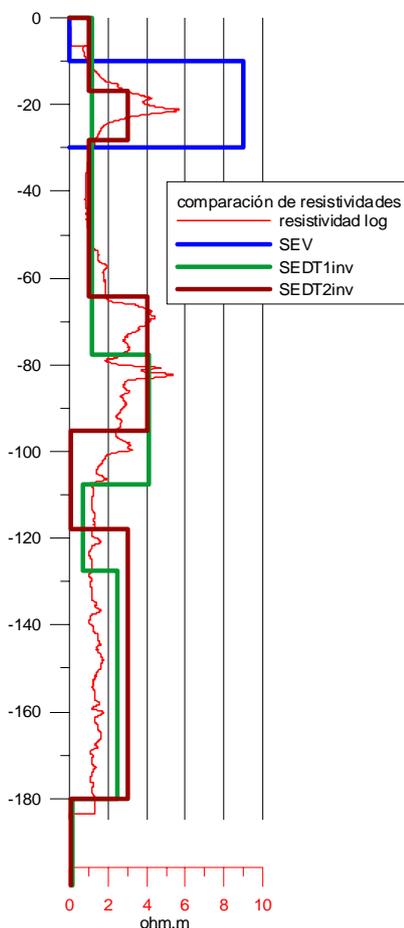


Fig. 301. Comparación de las resistividades obtenidas mediante testificación geofísica, SEV y SEDT, para los que se muestran dos posibles interpretaciones.

Por otra parte, la pretendida profundidad de investigación conseguida en la inversión de estos SEDT es poco fiable, siendo posiblemente más fruto de un mero cálculo matemático que de la realidad física de penetración de la corriente inducida en el terreno, dada la baja resistividad del mismo. Por otra parte, la distancia de los SEDT al sondeo S-57, de más de 200 m, hace que no esté plenamente justificado el tratar de encontrar una situación idéntica en la constitución del subsuelo.

La sección de resistividad o **Perfil Eléctrico** paralelo a los SEDT no ha superado los 100 metros de profundidad de investigación. Su inversión presenta una acusada discrepancia con la sección de SEDT, al localizarse un nivel de limos-arenas entre los 20-50 m de profundidad (según la parte del perfil), con ligera mayor resistividad que las arcillas, coincidente con el detectado en la testificación y no referenciado en el sondeo mecánico (Figura 302).

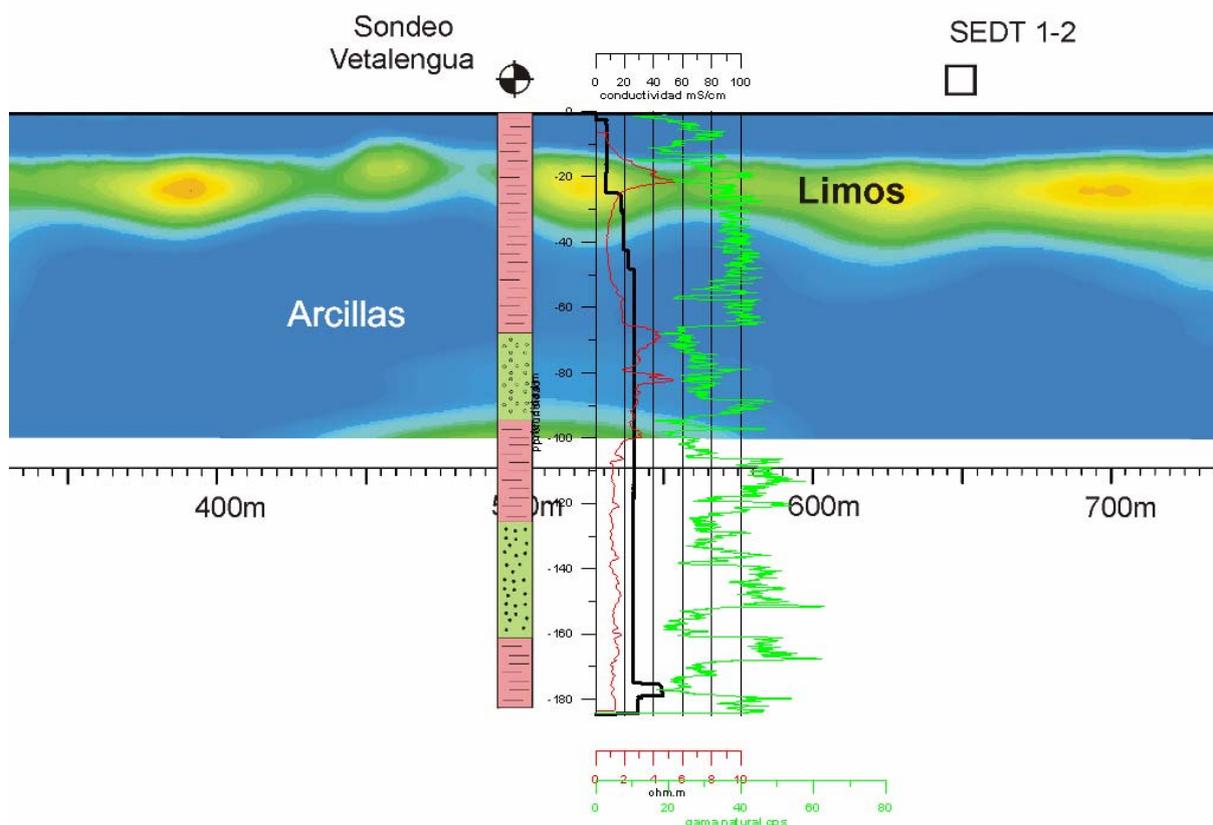


Fig. 302. Comparación de la inversión del perfil eléctrico de la parte norte de Vetalegua y la testificación del sondeo S-57 (en rojo: resistividad de la formación; verde: gamma natural; negro: conductividad del agua del sondeo).

La capa de gravas a los 70 m de profundidad y de unos 40 m de potencia que presenta la columna del sondeo, confirmada por la testificación, no se manifiesta en la sección geoelectrica, lo que puede deberse a la distancia entre perfil y sondeo y la naturaleza tan rápidamente variable de estas secuencias sedimentarias.

En conjunto la interpretación obtenida por los SEV y los SEDT se parece cualitativamente, observándose la misma secuencia de resistividades. Sin embargo las diferencias en los valores de profundidad y espesor de las capas son importantes. Este hecho se debe a la ambigüedad existente en la interpretación de estos datos, como ya se ha comentado anteriormente, y a que las interpretaciones de los SEDT se han forzado para que coincidan con la interpretación del sondeo mecánico, que está separado de ellos, mientras que los SEV se han interpretado libremente a partir del único que posee una curva interpretable que es el Veta2. De la sección de resistividad obtenida en el año 2001 al norte del sondeo, destacan la capacidad de esta técnica para diferenciar fiablemente y sin las ambigüedades de los SEDT niveles que representan muy pequeño contraste de resistividad en un medio marcadamente conductor. En nuestra opinión el hecho de emplear dipolo-dipolo como dispositivo de medida hace que disminuya la capacidad de penetración de la medida: la señal más débil que proporciona este dispositivo puede verse afectada por un nivel de ruido alto que puede distorsionarla, por lo que es posible que la profundidad de investigación sea mucho menor que

la esperada a priori; por otro lado el perfil está situado, como ya se ha comentado anteriormente, en una zona donde predomina más la marisma, por lo que su penetración en la zona de dunas no es apreciable, de ahí el ambiente tan conductor que presenta.

Esta mayor posibilidad de investigación que ofrecen los perfiles eléctricos ha motivado la ejecución de nuevas mediciones, esta vez más próximas al sondeo mecánico, en dos nuevas campañas efectuadas con la instrumentación del IGME (posición en Figura 297). En la primera (año 2001), se midió un perfil con una longitud de 1500 m, dispositivo Wenner y distancia entre electrodos de 15 m. La mayor parte del perfil está dentro de la marisma, pasando cerca del sondeo mecánico. En la Figura 303 se detalla una porción de sección geoelectrica obtenida junto con la testificación del sondeo S-57, en la transición a la marisma; la secuencia de resistividades coincide en ambos documentos, aunque la sección muestra la rápida variación lateral existente, por lo que los datos del sondeo son difícilmente extrapolables a una geometría con continuidad subhorizontal.

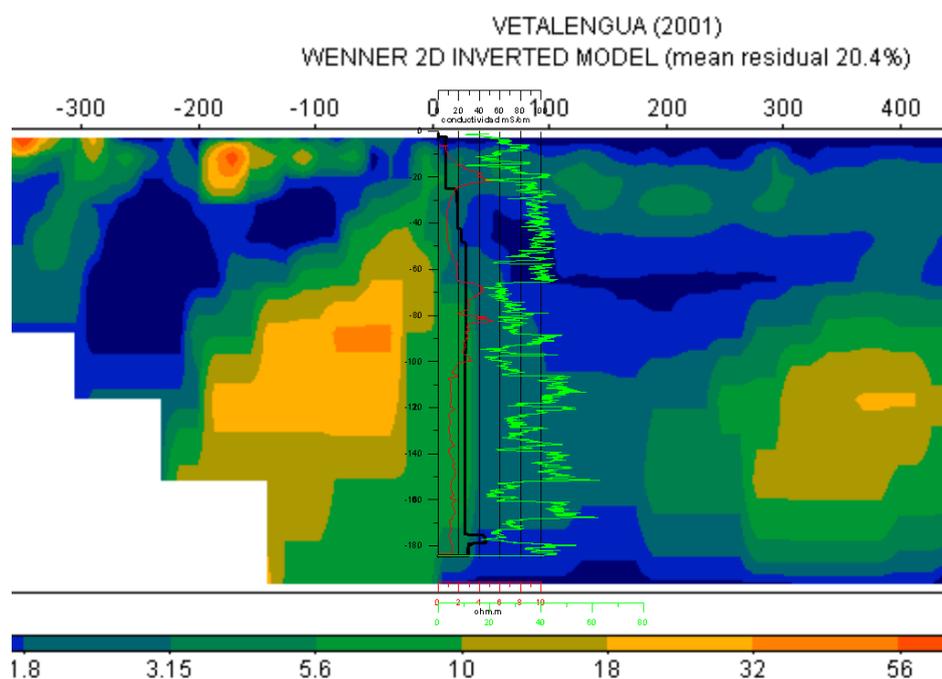


Fig. 303. Comparación de la testificación del sondeo S-57 y la sección geoelectrica obtenida en 2001 próxima al sondeo.

Entre las estaciones 0 y -600 (Figura 304), que corresponden a la parte medida sobre las dunas, el perfil muestra un carácter resistivo en superficie, siendo las capas siguientes muy conductoras; por debajo se observa un resistivo que se desarrolla entre la estación -200 y la 0, que es donde se sitúa el paso a la marisma, con una brusca transición mediante una discontinuidad muy marcada en la resistividad y en la dirección de los buzamientos, que pasan de ser hacia el Oeste en la zona de dunas, a ser hacia el Este en la marisma. Dentro de la marisma se observa un carácter conductor, con un nivel más resistivo horizontal entre los 20 y 40 m de profundidad, lo que coincidiría con el perfil medido al norte (Figura 300). La presencia de una anomalía resistiva a 80 m de profundidad, con centro entre las estaciones 300 y 400 es de interpretación compleja, ya que la transición a la marisma

se detecta de forma diferente a la vista en la zona de Palacio de Doñana (Figura 293); puede interpretarse como una intercalación de arena dentro de la unidad de marisma, o como perteneciente a la unidad deltaica, sin que actualmente se disponga de datos objetivos que puedan explicar esta anomalía.

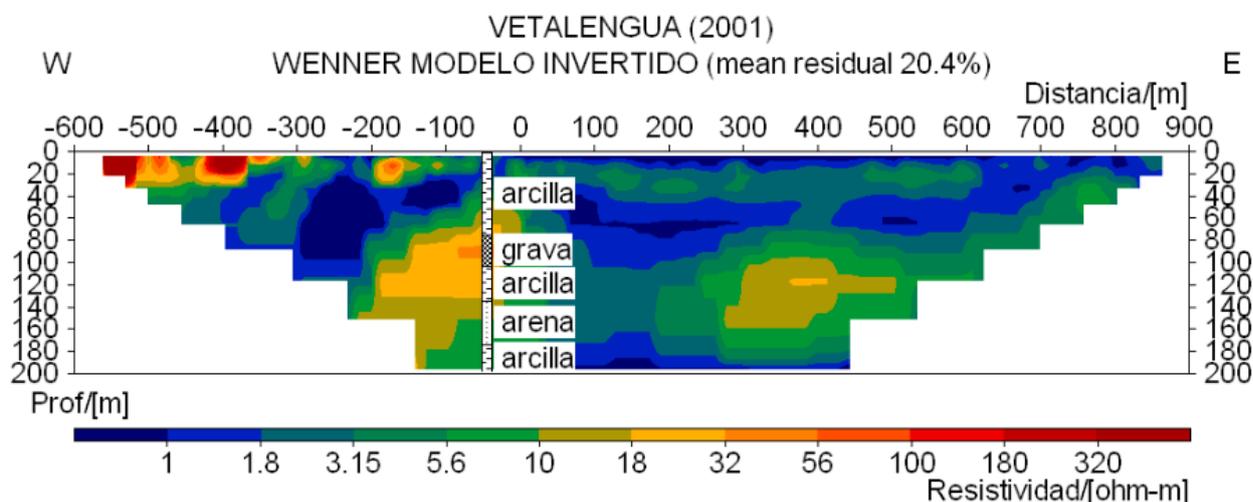


Fig. 304. Sección geoelectrica de la zona de Vetalengua obtenida en 2001 en la proximidad del sondeo S-57, cuya columna se incluye.

En la campaña de 2002 se volvió a realizar un perfil de las mismas características que el de 2001, utilizando también el dispositivo Wenner y distancia entre electrodos de 15 m, con una longitud de 2700 m, comenzando un poco más hacia el interior de la zona de dunas y prolongándolo mucho más hacia el interior de la marisma (posición en Figura 297). Los 1200 primeros metros de este perfil se han medido también con dispositivo dipolo-dipolo y Schlumberger. El tratamiento realizado para la interpretación de estos perfiles ha sido el mismo, empleándose para ello el programa de inversión de inversión RES2DINV de Locke. La diferencia de los resultados obtenidos con estos tres dispositivos puede sintetizarse en la mayor fiabilidad de la inversión que ha proporcionado el tipo Wenner; en la Figura 305 se representan los histogramas de errores de ajuste en % sobre el total de “puntos” del subsuelo medidos, es decir la diferencia entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados para cada uno de dichos puntos. Para el dispositivo dipolo-dipolo la distribución observada muestra que un número importante de los puntos, 233 de los 649 medidos, posee un error de ajuste igual o superior al 300%, mientras que el resto de los puntos reparten sus errores de ajuste de una manera regular, variando entre el 0 y el 300 %. Únicamente 39 de ellos tienen un error igual o inferior al 20%; esta distribución indica el error tan alto de ajuste producido por la mala calidad de los puntos medidos con este dispositivo (Dipolo-dipolo). Para el dispositivo Schlumberger es mejor el ajuste obtenido, con una gran mayoría de los puntos con errores por debajo del 200%, y con el 50% de los puntos con errores iguales o menores del 50%, lo que indica que las medidas realizadas con este dispositivo están menos afectadas de ruido, son de mejor calidad, que las medidas con Dipolo-dipolo. Finalmente, para el dispositivo Wenner, se hace más patente la mejor calidad de las medidas realizadas, con más del 70 % de los puntos con un error de ajuste inferior al 10%.

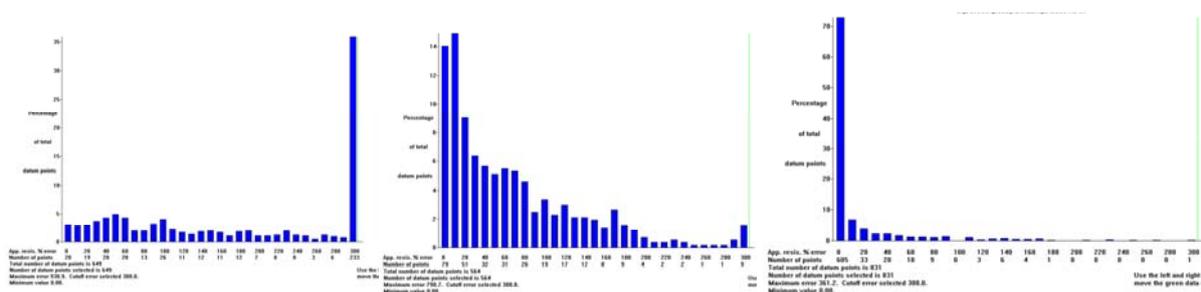


Fig. 305. Histogramas de error (diferencia entre resistividad medida y teórica del modelo) para los dispositivos Dipolo-Dipolo (izquierda), Schlumberger (centro) y Wenner (derecha), obtenidos en la inversión de los datos tomados en Vetaleña con los tres dispositivos.

Comparando la distribución de resistividad en el tramo común de los tres perfiles medidos en 2002 (los tres inferiores de la Figura 306) se aprecia una situación cualitativa semejante en todos ellos por encima de los 50-60 m de profundidad; a mayores profundidades, en el perfil medido con el dispositivo dipolo-dipolo aparece todo el subsuelo con resistividad alta, lo que puede ser debido a que no hubiese penetrado la corriente a mayor profundidad, mientras que los medidos con dispositivo Schlumberger y con el Wenner, conservan la similitud, con un cambio brusco de resistividad, que disminuye al pasar a la zona de marismas, aunque la presencia del ruido anteriormente aludido es mayor en el tipo Schlumberger.

Sin embargo entre los perfiles Wenner medidos en 2001 y en 2002 se aprecian importantes diferencias, que deben estar fundamentalmente motivadas por la diferencia en su trazado. En ambos se observa un paso a marisma neto y verticalizado, pero una vez dentro de la marisma en el medido en 2002 no se observa la anomalía resistiva del perfil de 2001, sino una anomalía un poco más resistiva y que va ganando en potencia a medida que se adentra en la marisma, y que parece intuirse en el extremo derecho del perfil Schlumberger.

Las diferencias entre estos perfiles y el medido más al norte (Figura 300) es fundamentalmente debida al diferente contexto geológico, estando el perfil del norte medido prácticamente en zona de marismas.

Teniendo en cuenta los objetivos de los trabajos realizados en esta zona, el contacto dunas-marisma queda claramente identificado por su diferencia de resistividad; sin embargo, la apreciación del límite del agua dulce- agua salada no es viable, ya que no es posible diferenciar si la variación de resistividad se debe a la salinidad del agua de formación o a un cambio de litología, siendo esto último muy probable, a la vista de los resultados obtenidos con mediciones bastante próximas entre sí: es decir, se trata de una situación realmente tridimensional, en donde la extrapolación de homogeneidad de capas a unos pocos centenares de metros del sondeo no resulta ni posible ni fiable.

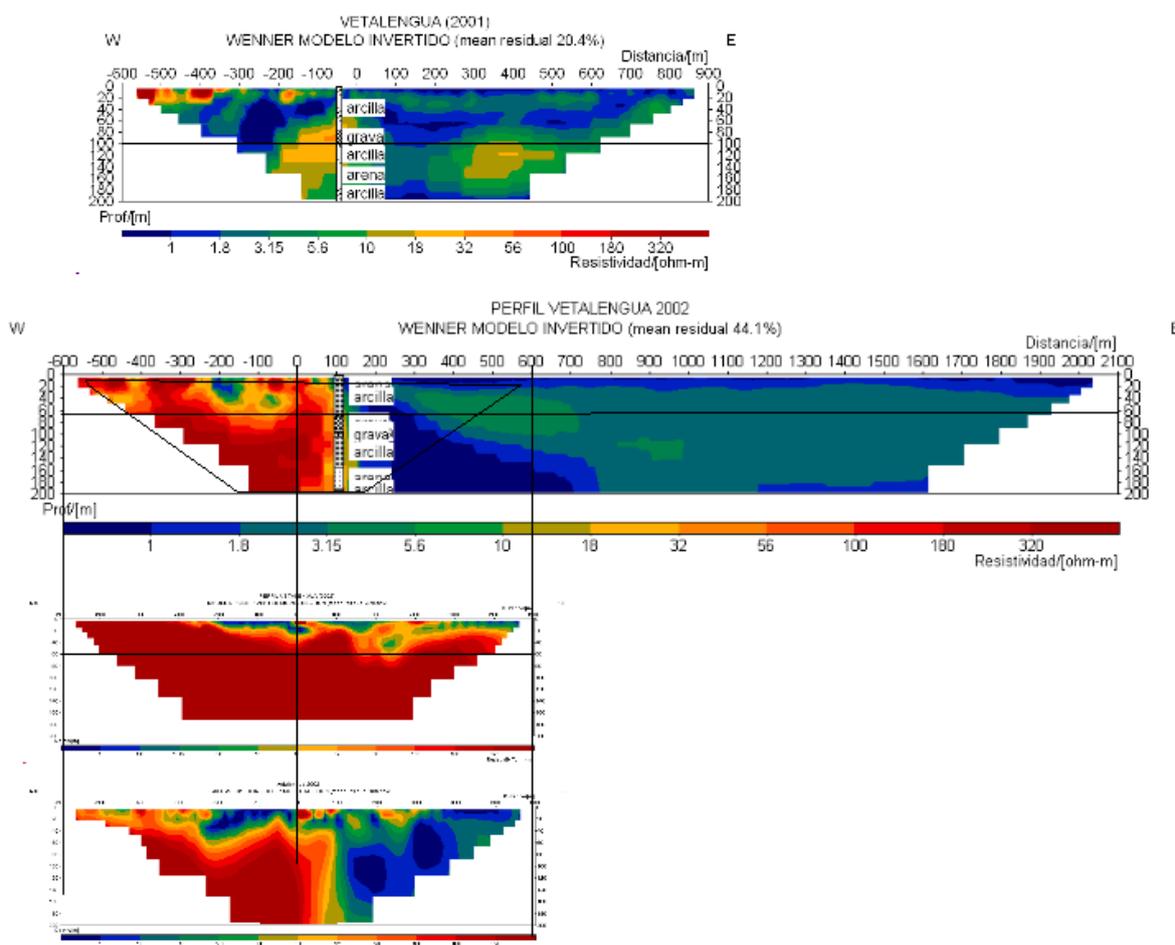


Fig. 306. Comparación de los perfiles eléctricos obtenidos en la zona de Vetalegua: parte superior perfil Wenner medido en 2001. Parte inferior: perfil medido en 2002 con tres tipos de dispositivos: Wenner (superior), dipolo-dipolo (medio) y Schlumberger (inferior).

Es posible que dada las condiciones de las medidas de estos perfiles (dificultad de buenos contactos eléctricos, gran heterogeneidad de resistividades, etc.), y puesto que no se ha realizado una eliminación total de todas las medidas ruidosas, gran parte de las fuertes anomalías puntuales, sobre todo las superficiales, puedan ser debidas a la existencia de puntos con una gran componente de ruido. No obstante, aunque el ruido puede afectar de una forma local a la interpretación, no distorsiona tanto las tendencias generales, por lo que es aceptable la interpretación general aquí expuesta. Con este criterio se ha realizado la interpretación cualitativa esquemática expresada en la Figura 307, con escalas vertical y horizontal homogéneas.

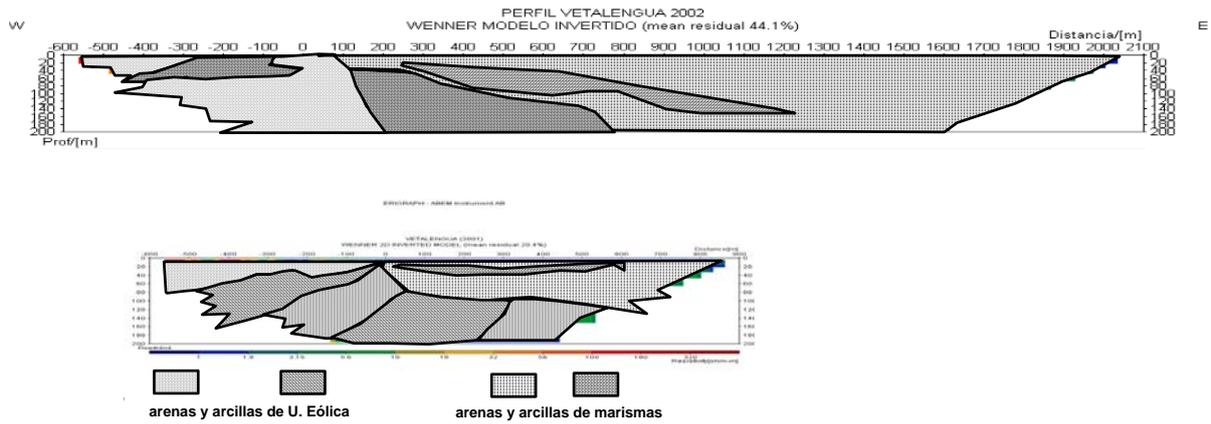


Fig. 307. Esquema de interpretación geológica de los perfiles geoelectricos de Vetaleña. Las formaciones asignadas a “arcillas”, por su menor resistividad, pudieran también en algún caso tratarse de arenas con agua de formación más salada.

IV.5.4 Zona Norte

Dentro de las zonas seleccionadas para la realización de nuevos ensayos de metodología geofísica (ver apartado IV-1) se encuentra una zona situada al norte del Parque, en el área regable (Figuras 163 y 272). Su especial interés se debe a que en ella se sitúan numerosos sondeos mecánicos que pueden servir de apoyo a los trabajos geofísicos encaminados a la determinación de la interfase entre agua dulce y agua salada. Una descripción completa de los trabajos realizados hasta ahora con esta finalidad puede verse en el apartado III-4 "Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce-agua salada", cuyas conclusiones (apartado III-4.9) se recomienda ver para la mejor comprensión del presente apartado.

La teoría aceptada sobre la formación de esta interfase puede sintetizarse en que las marismas están formadas por sedimentos continentales y marinos, reteniendo estos últimos el agua salada durante el proceso de sedimentación. Debido a la recarga del agua procedente de la parte no confinada del acuífero y a la extracción mediante sondeos, el agua salada embebida en las capas se ha ido desplazando hacia el Sur, dando lugar a dos áreas con calidad de agua diferente. En el acuífero no confinado y en parte del semiconfinado el agua es de buena calidad. En el sur y sureste, donde el espesor de los sedimentos es más importante, el agua es más rica en NaCl. Esta situación supone la existencia de una interfase NE-SW, limitando estas dos áreas

Como ya se ha mencionado en detalle en el apartado III-4, desde los estudios iniciales del acuífero de Marismas en 1969, se han llevado a cabo hasta ahora diversas determinaciones mediante Geofísica de la situación de la interfase agua dulce - agua salada. La metodología empleada en cada caso fue diferente: el valor de la resistencia transversal de las capas del acuífero calculada a partir de unas campañas de SEV; el empleo de la resistividad aparente; la correlación de los mencionados parámetros geoelectrónicos con análisis químicos de agua; y finalmente la testificación de la conductividad del agua en sondeos. La manera en que estos datos se han utilizado para representar la interfase presenta ciertas singularidades, así como algunas contradicciones, incluso en la descripción hidrogeológica de la naturaleza y origen de la interfase. De cualquier manera, parece que ninguna de estas medidas y teorías construidas acerca de esta interfase es todavía lo bastante buena para explicar las observaciones realizadas en los últimos trabajos de investigación. Una de las explicaciones a esta situación puede provenir de la falta real de información en muchos sectores del acuífero, donde la interfase se ha situado mediante datos extrapolados de observaciones bastante alejadas. Otra razón es que una línea separando puntos con diferentes valores de cualquier parámetro nunca puede ser considerada representativa de un fenómeno bi-tridimensional. En algunos estudios la interfase es definida como una superficie continua, mientras que en otros se le da una solución más difusa. La geometría compleja del acuífero dentro de las Marismas puede contribuir de manera importante a la dificultad de una correcta delimitación de la interfase. No hay que olvidar tampoco la posibilidad de la inexistencia de una única interfase, debido al mecanismo por el cual el agua de mar es atrapada en las capas geológicas, lo que puede hacer que estemos en presencia de múltiples interfases.

Por todas estas razones, se ha escogido una zona relativamente pequeña en el área de Marismas, coincidente con el área donde se realizaron los últimos trabajos de importancia para el estudio de la interfase ("Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995; ver apartados I-4.6 y III-4.7), cuyo resultado se reproduce en la Figura 308 (es copia de la Figura 154), que representa las isóneas de conductividad obtenidas a partir de la testificación geofísica de 31 sondeos mecánicos y de los resultados de 34 análisis químicos.

FIGURA Nº 5 DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD EN 1994
(VALORES EN mS/cm)

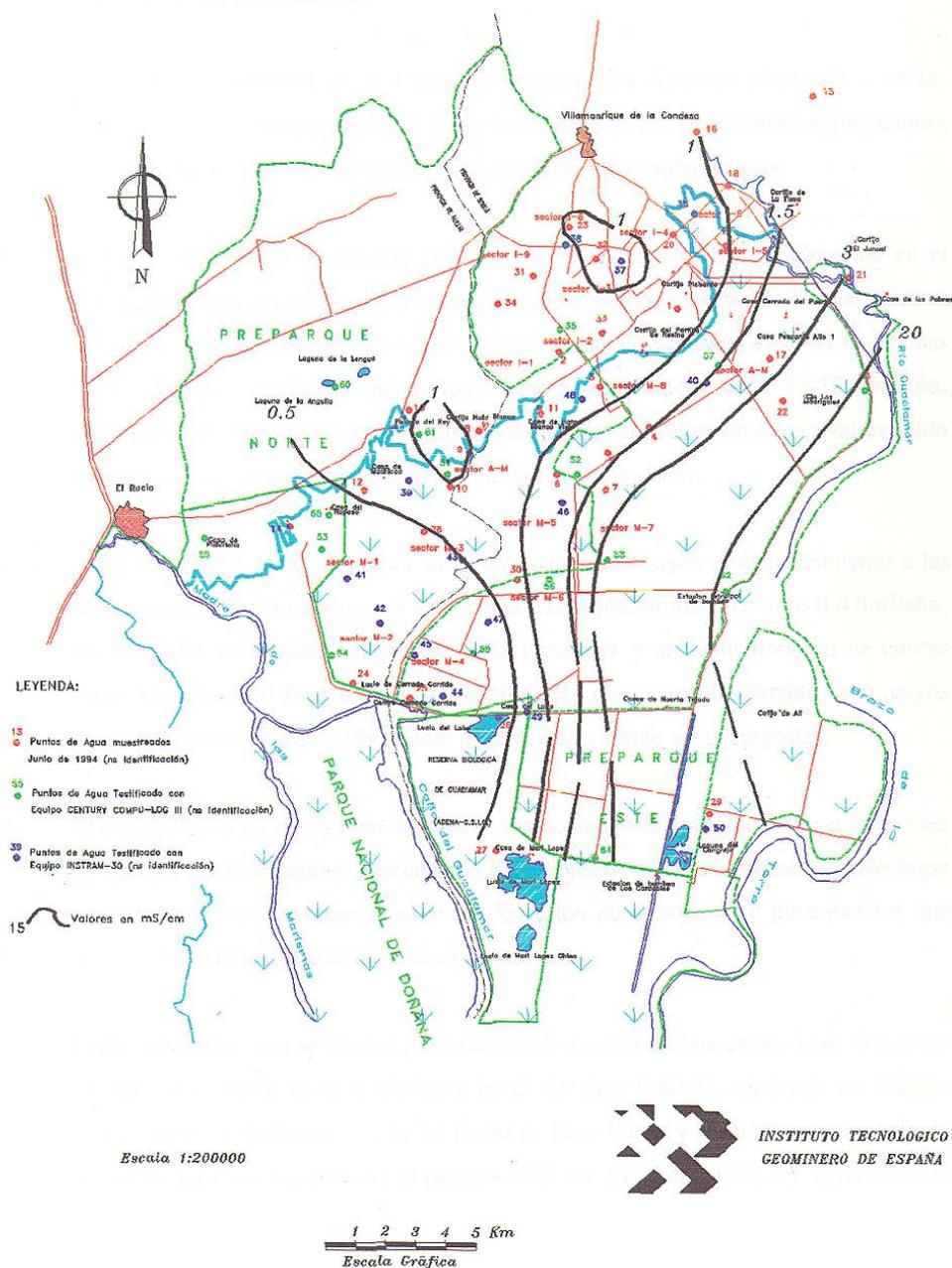


Fig. 308. Posición de las líneas de igual conductividad, según los trabajos realizados en 1995, en la zona norte.[Fichero 46Fig-5.tif]

La posición de los trabajos realizados en esta zona en el presente Proyecto se indican en la Figura 309, y su detalle para los trabajos de superficie en la Figura 310, donde además de los perfiles eléctrico y sísmico se han situado algunos de los numerosos sondeos mecánicos existentes.

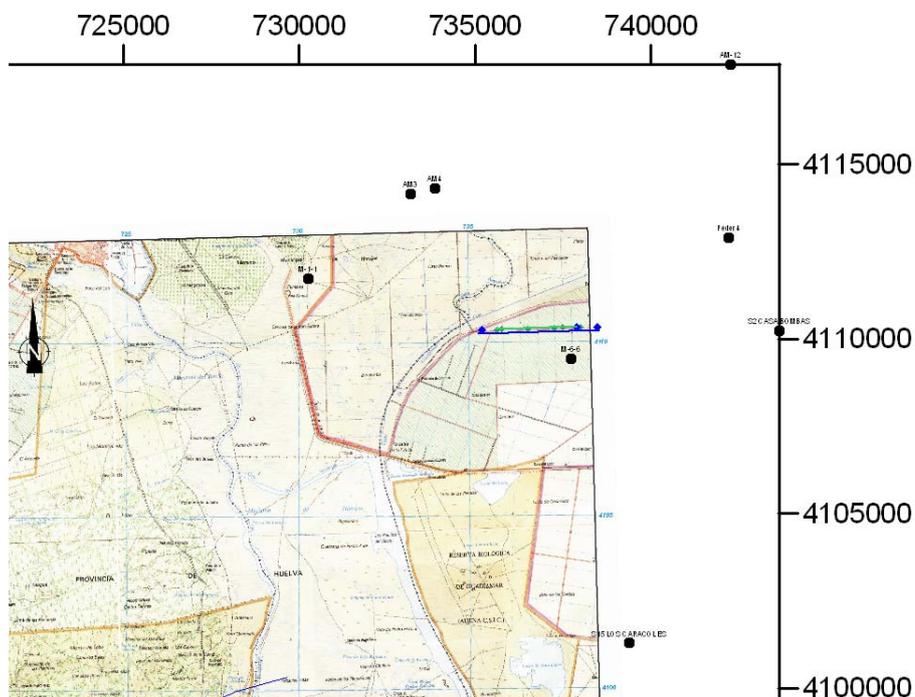


Fig. 309. Posición general de los trabajos geofísicos realizados en la zona norte, incluidos los sondeos testificados en la campaña de 2002 del presente Proyecto.

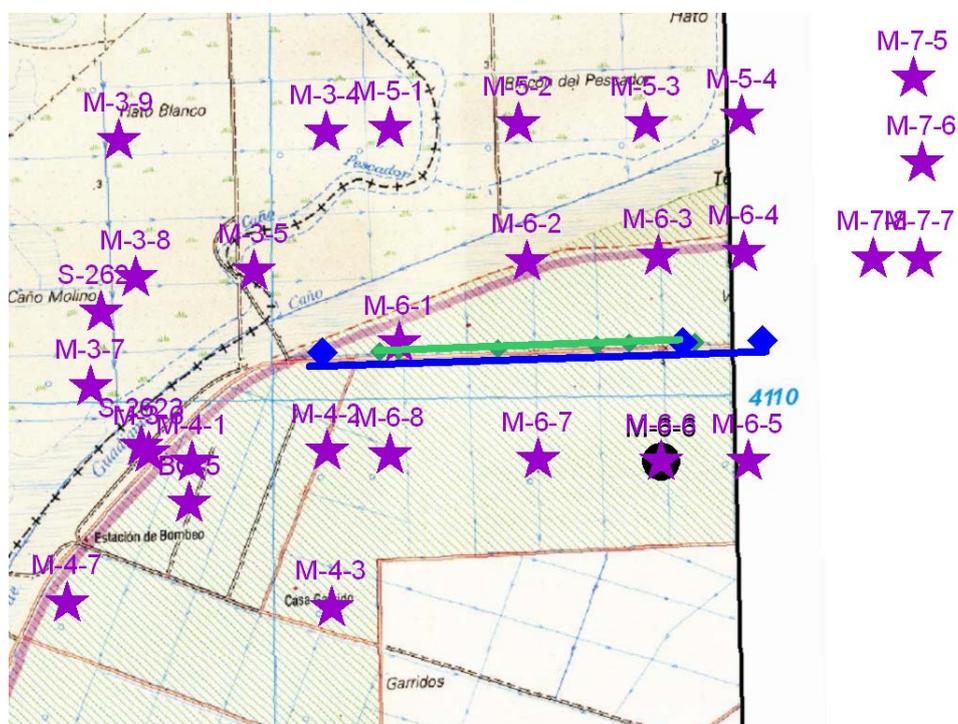


Fig. 310. Posición de detalle de los trabajos geofísicos realizados en la zona norte: perfil eléctrico (en azul); perfil sísmico (en verde); testificación: sondeo M-6-6. Se han representado además los sondeos mecánicos más próximos existentes en esta zona.

- El Perfil Eléctrico tiene una longitud de 3300 m y azimut 270°, con distancia entre electrodos de 15 m y longitud de 1200 m. Ha sido medido (IGME 2002) en su totalidad con la configuración Wenner y parcialmente con las configuraciones Dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger.
- El perfil de sismica de reflexión transcurre por el mismo camino que el perfil eléctrico, y tiene una longitud de 2.8 km.
- Los sondeos testificados en esta zona son los siguientes:

| sondeo | prof. Reg. | parámetros |
|----------------|------------|--------------|
| S2 CASA BOMBAS | 177 | GN,T,C,GE,RI |
| Feder4 | 144 | GN,T,C,RI,DH |
| M-6-6 | 43 | GN,T,C |
| AM3 | 80 | GN,T,C |
| AM4 | 80 | GN,T,C |
| M-1-1 | 134 | GN,T,C |
| AM-12 | 81 | GN,T,C |

En todos ellos se ha medido la radiación gamma natural (GN), temperatura y conductividad del fluido del sondeo (T,C). Solamente el sondeo S2 y Feder-4 pudieron medirse la resistividad de la formación, ya que el resto tienen entubación metálica. El sondeo S2 incluye gamma espectral (GE) y en el Feder-4 se realizó además uno de los ensayos de determinación de velocidades por down hole (DH). El sondeo M-6-6 es el más próximo a los trabajos geofísicos de superficie efectuados en el presente Proyecto.

Según se recoge en el apartado I-3.2 (Informe "**Recopilación de la información, Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976**"), en esta zona se realizaron 462 sondeos mecánicos en el proyecto Guadalquivir con el objetivo de obtener la máxima información sobre la hidrogeología del acuífero, situación de la interfase agua dulce - agua salada, y determinar las mejores zonas de captación y máximos caudales a extraer. Con las columnas de estos sondeos se elaboraron 13 perfiles litológicos (5 en la dirección E-W y 8 en dirección N-S) formando una malla de unos 3 km de lado, cuya posición se indica en la Figura 22. El perfil más próximo a los actuales trabajos geofísicos es el denominado H-4, cuya porción oriental se reproduce en la Figura 311. Estos perfiles presentan una sección de los materiales del subsuelo clasificada por su permeabilidad: muy permeables, permeables, semipermeables e impermeables. La porción comprendida entre los sondeos M-6-4 y M-3-5 (Figura 310) se corresponde con la de los perfiles eléctrico y sísmico, que se sitúan unos 600 m al Sur de esta alineación.

En la década de 1990 y hasta la actualidad (2007), estos sondeos se han utilizado para la realización de estudios de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir, considerando aquí en especial los realizados por J.M. Salvany y E. Custodio, 1995 ("Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas", Rev.

Soc. Geol. España 8 (1-2), 22-31,1995); J.M. Salvany et al., 2001 (“Geología del Valle del Guadiamar y áreas colindantes”, Boletín Geológico y Minero, vol. Esp. 57-68, 2001) y comunicaciones personales de J.M. Salvany y M. Manzano en 2005-2006. Estos estudios se han realizado correlacionando un número elevado de sondeos mecánicos, e identificando una serie de unidades litológicas que se han denominado Unidad Deltaica, Unidad Aluvial, Unidad de las Marismas y Unidad Eólica. El perfil correspondiente a la misma posición que el anteriormente denominado H-4 es el Corte nº 7, reproducido en la Figura 312.

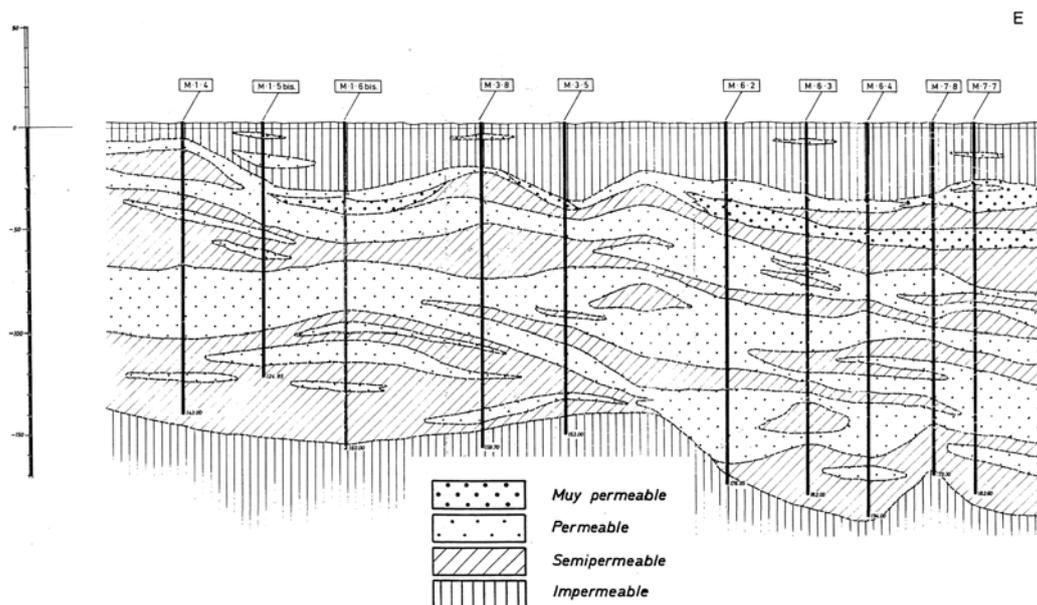


Fig. 311. Perfil hidrogeológico H-4 construido en 1976 con la información de sondeos mecánicos en la zona regable. [archivo 32PerH-4.tif]

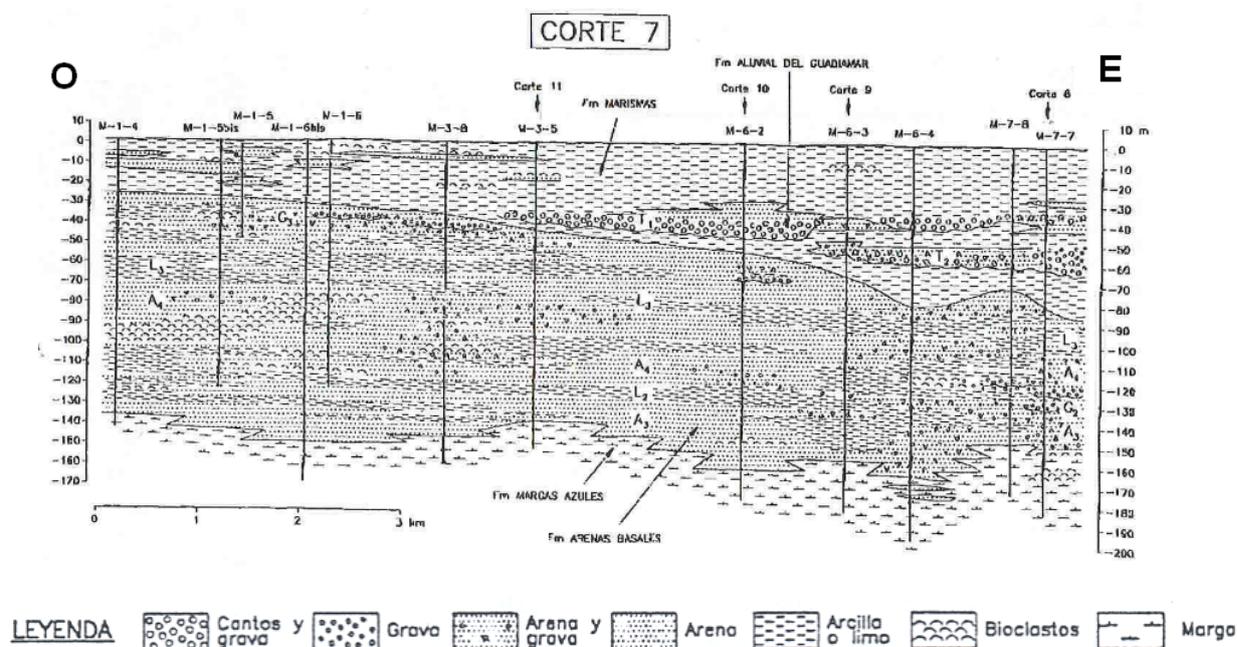


Fig. 312. Corte 7 según Salvany y Manzano (comunicación personal) correspondiente a la posición del perfil H4 (Figura 311), con la nueva clasificación litoestratigráfica introducida.

Se dispone por lo tanto en esta área de una abundante información, cuya posición de conjunto se recoge en la Figura 313.

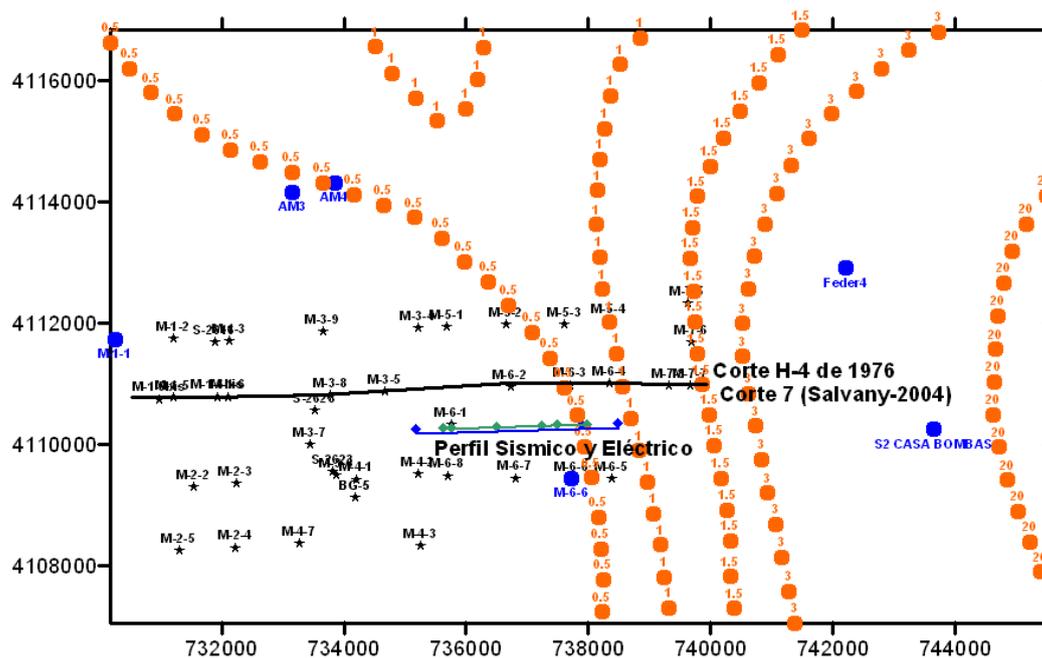


Fig. 313. Posición de conjunto de la información disponible en la zona Norte de Marismas. Puntos naranjas: líneas de isoconductividad (1995), con valor de conductividad en mS/cm; estrellas negras: sondeos mecánicos (1975); círculos azules: sondeos con testificación geofísica (2002); línea azul: perfil de resistividad (2002); línea verde: sección sísmica (2002); línea negra: perfil hidrogeológico H4 (1976) y nº 7 litostratigráfico (2004). [fichero 46Fig-5.xls]

Respecto de **las testificaciones**, con el registro de gamma natural se espera ser capaz de diferenciar entre capas de arcillas y capas de arenas y gravas, además de ser una buena herramienta de correlación entre sondeos. Para un conocimiento más preciso de la composición de las capas de limos y arcillas se ha medido, en aquellos sondeos donde el diámetro del pozo lo ha permitido, con la sonda de gamma espectral, registrando los canales del U, Th y K con una sonda calibrada. Los registros de conductividad y temperatura del fluido proporcionan información sobre los puntos de entrada y salida de agua en el sondeo, así como del contenido en sales. Estas medidas pueden estar distorsionadas por el posicionamiento de las rejillas en el sondeo, lo que produce variaciones en las propiedades de la columna de agua que no están relacionadas con la naturaleza del agua en la formación geológica. La resistividad de la formación mediante inducción electromagnética ha sido registrada en aquellos sondeos con tubería de PVC. Con este parámetro se puede conocer la resistividad de las diferentes capas de la formación, que estará influenciada por la calidad del agua en ellas, siendo por lo tanto una herramienta fundamental para el diseño e interpretación de los métodos eléctricos de superficie.

La testificación del sondeo M-6-6 (Figura 314) indica la presencia del nivel freático sobre los 10 m, con agua moderadamente dulce de aproximadamente 1 mS/cm (equivalente a 0.5 g/l de ClNa) hasta el final del sondeo, de sólo 50 m de profundidad. La columna litológica facilitada presenta arcilla en todo el sondeo, salvo unas capas de gravas y/o arenas entre los 42-44 m y entre los 47-49 m. Sin

IV-5 Realización de nuevos ensayos de metodología geofísica: Trabajos complementarios. Integración de resultados 499

embargo, la testificación gamma natural detecta que existen materiales con una mayor arcillosidad en los primeros 10 m, así como la existencia de más capas de gravas y/o arenas de las indicadas en la columna, particularmente entre los 0-4 m, 11-14 m, 29-32 m y a partir de los 40 m, interpretación que ha sido representada en la Figura 314. Trasladada esta interpretación a los cortes geológicos H-4 y Corte-7 situados unos 1200 m al norte del sondeo M6-6 (Figura 315) se aprecia una buena correspondencia, excepto que en los cortes no existe la apreciación de un tipo diferente de arcillas en la parte superior, sólo diferenciable por su emisión de radiación gamma.

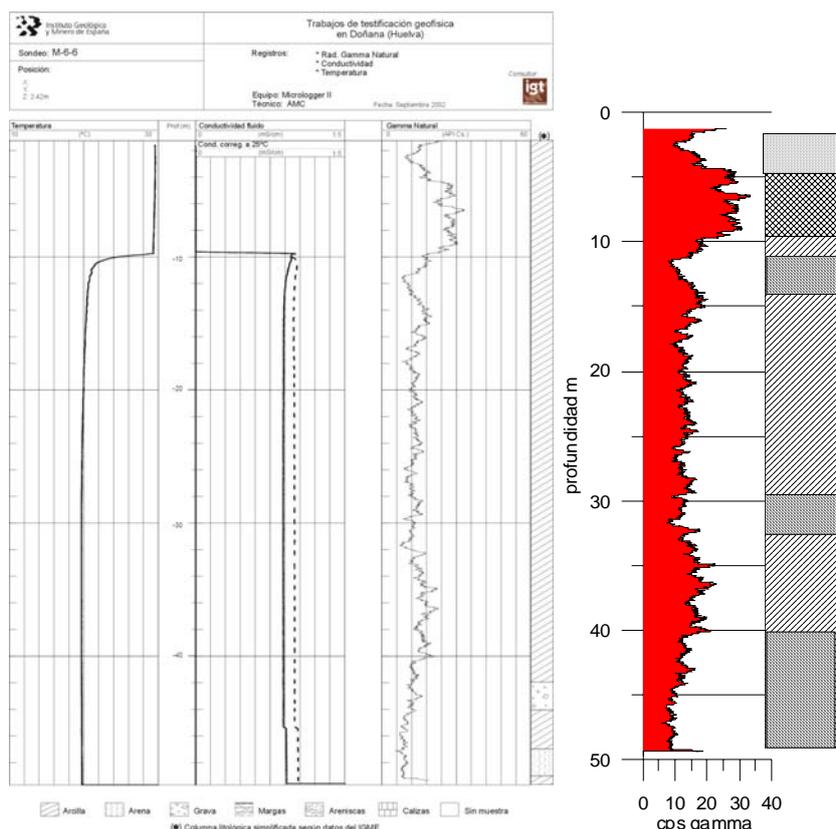


Fig. 314. Testificación de temperatura y conductividad del fluido, y gamma natural del sondeo M-6-6 (izquierda), junto con las nuevas capas deducidas de su interpretación (derecha).

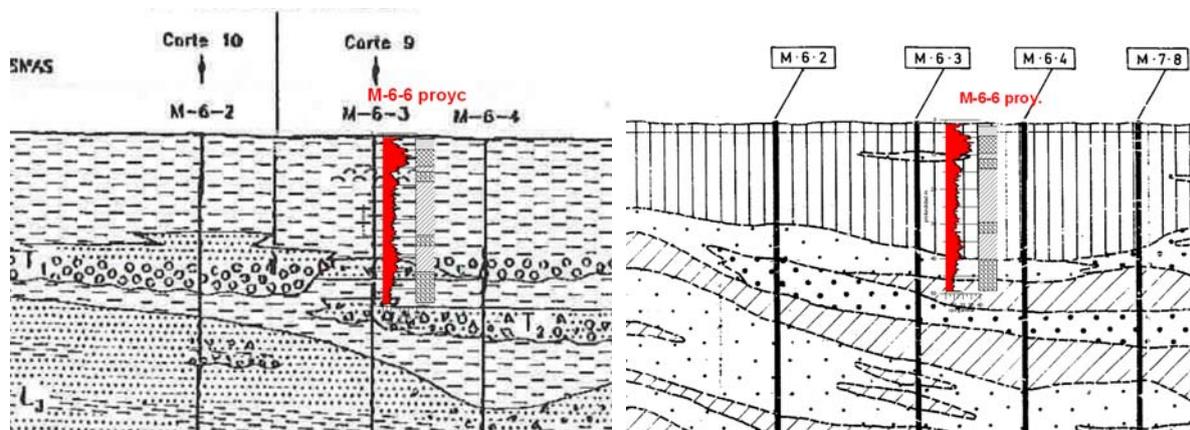


Fig. 315. Fragmento del corte geológico 7 (izquierda) y H-4 (derecha) con incorporación de la testificación gamma natural del sondeo M-6-6 (situado unos 1200 m al Sur) y su interpretación.

Los siguientes sondeos con testificación geofísica más próximos son el Feder-4 y el S2-Casa Bombas, situados a unos 4-5 km hacia el Este y NorEste (posición en Figura 313), en los que además se dispone de testificación de resistividad de la formación. En el sondeo S2 se registró también la gamma espectral, que permite una mejor caracterización de la arcillosidad. Estos registros se reproducen en la Figura 316.

Las columnas litológicas facilitadas de ambos sondeos indican que las arcillas pasan a arenas sobre los 30-40 m de profundidad en el sondeo Feder-7 y a los 75 m en Casa Bombas, existiendo mayor intercalación de capas de gravas respecto de la reflejada en la columna del M-6-6. Estas variaciones litológicas están además corroboradas por la testificación de la resistividad de la formación disponible en estos sondeos. La comparación de los valores de gamma natural en los tres sondeos (M-6-6, S2 y Feder-4; Figura 317) permite apreciar que en todos ellos existe un primer tramo, de unos 10 m de potencia cuya arcillosidad difiere del resto. En los valores de la gamma espectral (sondeo S2 Casa Bombas) se aprecia que la arcillosidad de este primer tramo tiene un bajo contenido en U y una presencia de K proporcionalmente importante, que lo diferencia claramente del resto de las arcillas de la columna.

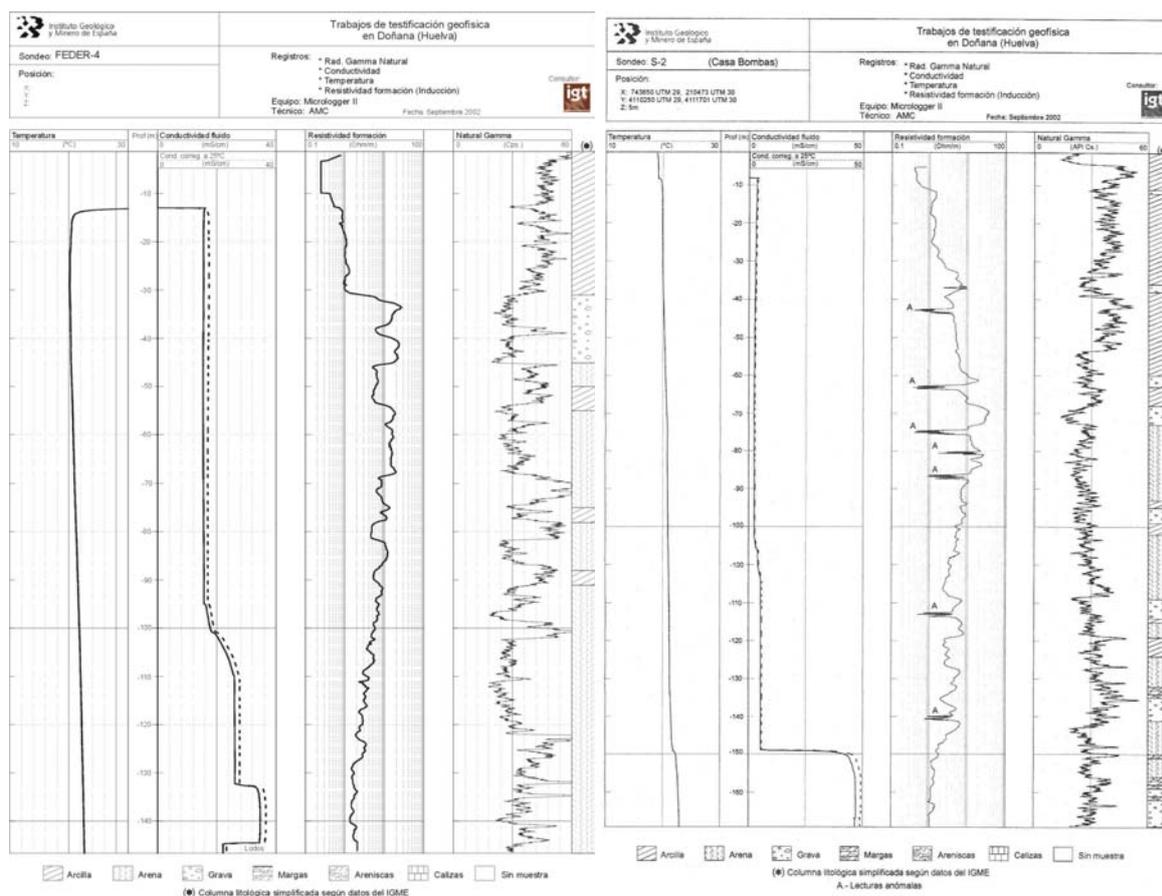


Fig. 316. Testificación del sondeo Feder-4 y S2 Casa Bombas (temperatura y conductividad del fluido, resistividad de la formación y gamma natural). Las columnas litológicas son las inicialmente facilitadas.

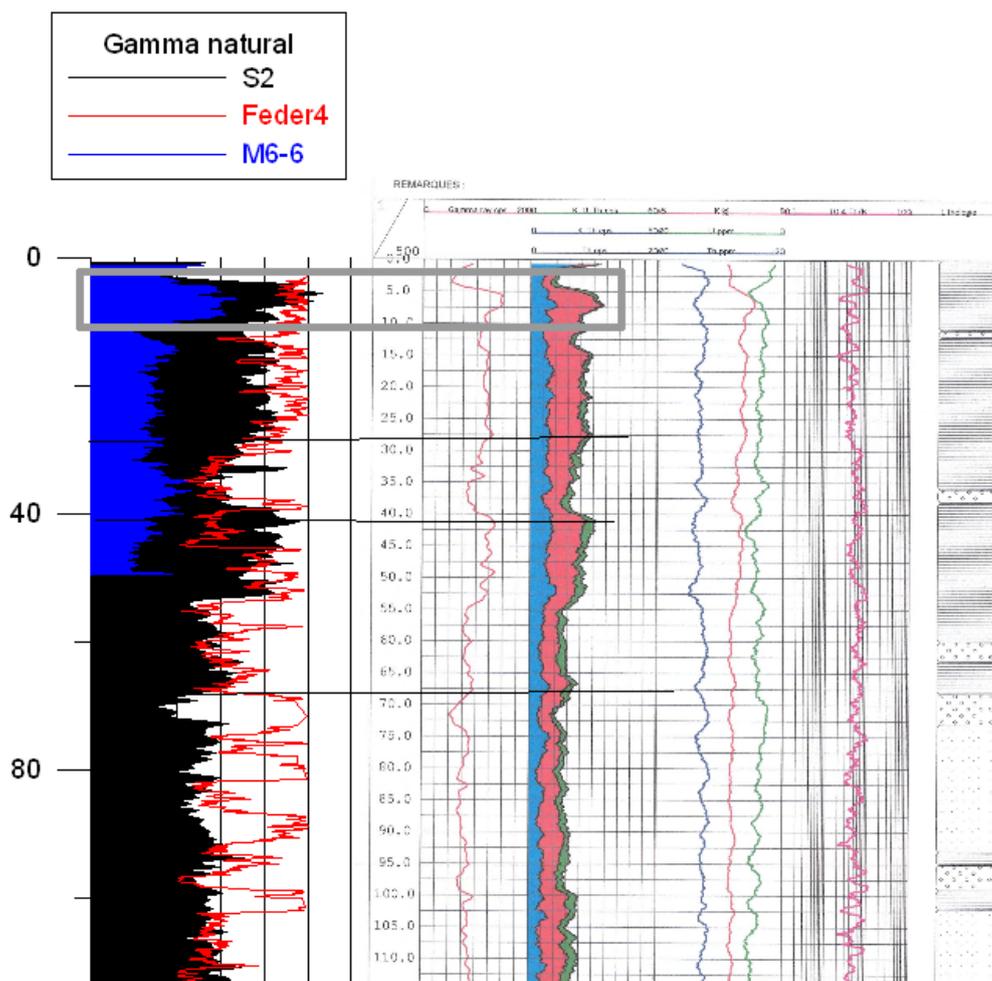


Fig. 317. Comparación de los registros gamma natural de los sondeos M-6-6, S2 (con gamma espectral) y Feder-4.

Los menores valores de la intensidad de la radiación gamma natural en el sondeo M-6-6 pueden ser debidos al mayor diámetro de este sondeo, así como a la amortiguación de la tubería metálica a la radiación gamma.

La influencia de la salinidad del agua de formación en la resistividad fue ya comentada en el apartado IV-2.2.7 (ver Figura 195), y puede claramente apreciarse (Figura 318, izquierda) en el sondeo Feder-4, donde el agua de la columna del sondeo es muy salubre, afectando a la resistividad de la formación cuando pasa de unos 16 mS/cm a más de 24 mS/cm a los 100 m de profundidad, provocando una disminución de la resistividad no confirmada por el registro de gamma natural. También puede interpretarse que no existe correspondencia entre la salinidad del agua de formación y la de la columna de agua dentro del sondeo hasta los 100 m de profundidad. Así mismo, en el sondeo S2 (Figura 318, derecha) la disminución de resistividad de la formación a partir de los 150 m se debe fundamentalmente al aumento de la salinidad del agua, que pasa a casi 50 mS/cm (más de 20 g/l de ClNa). Como ya se indicó en el capítulo IV, cuando la conductividad tiene valores superiores a unos 15 mS/cm la salinidad es el factor que controla los registros de resistividad de la formación, no permitiendo por si solos establecer diferenciaciones litológicas (se entiende que esto ocurre en el

caso de que la salinidad dentro de la columna de agua del sondeo sea un reflejo de la salinidad del agua de formación a las mismas profundidades).

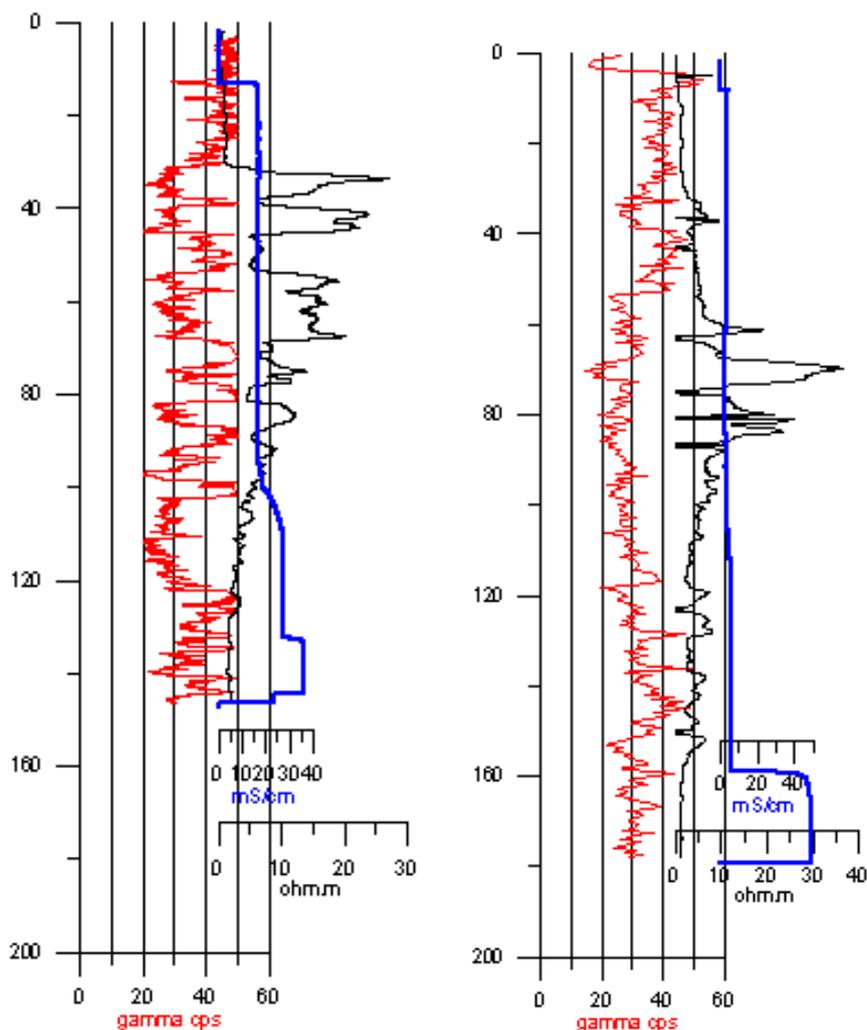


Fig. 318. Registros de los sondeos Feder-4 (izquierda) y S2 (derecha) demostrando la relación entre la radiación gamma y la resistividad de la formación, así como su alteración debida a la salinidad del agua de formación.

Asumiendo que la conductividad de la columna de agua en el sondeo es un reflejo de la salinidad en el agua de la formación, en la Figura 319 se representa la comparación entre el trazado de isolíneas de conductividad efectuado en 1995 (Figura 308) y el resultado de la nueva campaña de testificación efectuada en el presente Proyecto. Considerando la línea de 1 mS/cm como el límite entre agua dulce y agua salada, la conductividad medida en los sondeos AM-12, Feder-4 y S-2 indica que la línea de 20 mS/cm está muy modificada respecto de su posición en 1995, siendo especialmente notable la profundidad a la que se encuentra el agua salada en los diferentes sondeos; así, en el sondeo S-2 la conductividad se mantiene en unos 2 mS/cm hasta los 100 m de profundidad, pasando a cerca de 50 mS/cm (salmuera) a los 150 m. Otra modificación, aun más notable, es la debida a los valores encontrados en los sondeos AM-3 y M-1-1, que situados originalmente dentro de la zona con valores inferiores a 0.5 mS/cm, tienen actualmente valores de 12 mS/cm y 2 mS/cm respectivamente, lo que obligaría a introducir una fuerte modificación sobre la situación indicada en 1995, corroborando

IV-5 Realización de nuevos ensayos de metodología geofísica: Trabajos complementarios. Integración de resultados 503

nuestra hipótesis de que no puede hablarse de una sola interfase, sino de un conjunto de zonas, que presenta cada una de ellas su propia interfase.

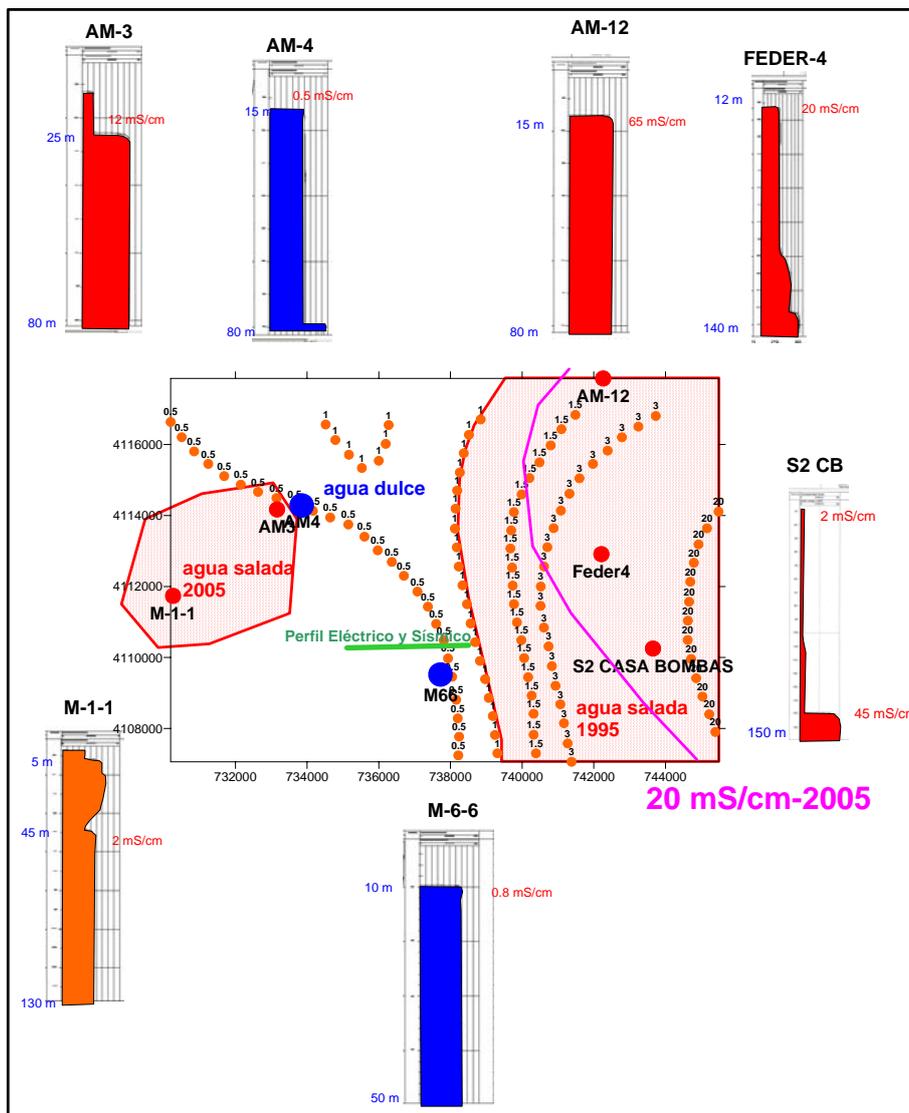


Fig. 319. Comparación de la distribución de la interfase agua dulce-agua salada obtenida en 1995 (indicada por las líneas de puntos color naranja con valor de conductividad en mS/cm) y la resultante de la nueva testificación efectuada en el presente trabajo. Para cada sondeo considerado se incluye un esquema de su testificación de conductividad del agua.

Los **perfiles eléctricos y sísmico** se han efectuado en la zona de transición de agua dulce a salada (posición en Figuras 313 y 319). El objetivo de estos trabajos es verificar la posibilidad de interpretación de la sección geoelectrica, a la vista de las modificaciones que la salinidad introduce en la resistividad de la formación, y comprobar si la información geométrica aportada por la sísmica de reflexión puede contribuir a paliar los interrogantes.

En la Figura 320 se presenta la comparación entre las secciones geoelectricas obtenidas por inversión de los datos medidos sobre el Perfil Eléctrico con los dispositivos Wenner (totalidad del perfil), Dipolo-Dipolo y Schlumberger (solamente la mitad). En todas ellas el espaciado ha sido de 15

m. En la porción común, en los primeros 30-40 m de profundidad se detecta un material muy conductor (resistividad inferior a 1 ohm.m), pasando en profundidad a un resistivo, que desde los 10 ohm.m alcanza valores superiores a 50 ohm.m en determinadas zonas, que es en lo que discrepan los resultados obtenidos con los diferentes dispositivos: entre los 300 y los 900 m (distancias relativas al origen de mediciones, o punto 0), en el dispositivo Wenner aparece un cuerpo muy conductor y de gran extensión, que en el dispositivo Dipolo-dipolo se manifiesta por una disminución mucho menos importante de la resistividad entre las posiciones 100 y 700, todavía más suavizada en el Schlumberger.

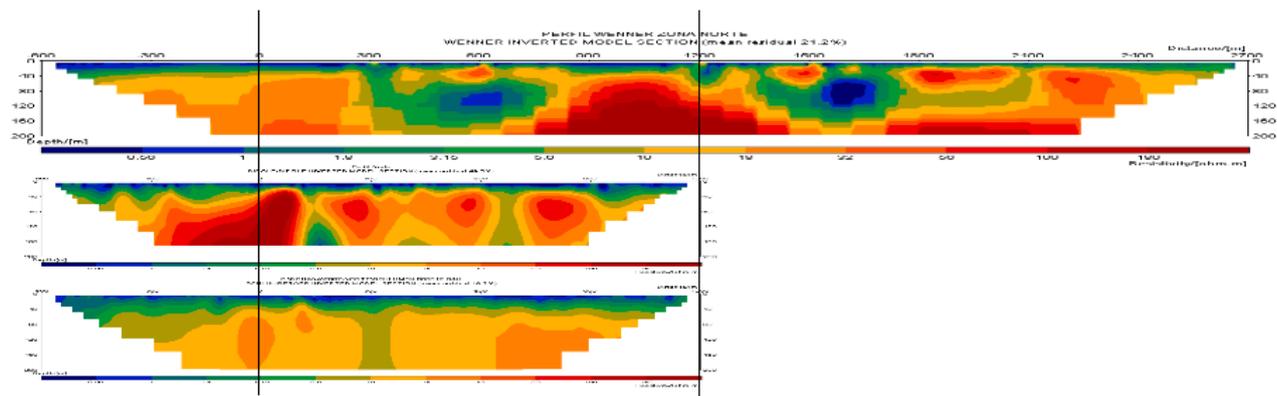


Fig. 320. Secciones geoelectricas obtenidas por inversión de los datos medidos con dispositivo Wenner (parte superior), Dipolo-dipolo (sección media) y Schlumberger (sección inferior). Se ha señalado el sector común que presenta importantes diferencias de distribución de la resistividad.

A la vista de estas diferencias se ha procedido a filtrar los datos Wenner, eliminando puntos ruidosos y consiguiendo un mejor ajuste de la inversión (8.4 % en vez de 21.2 %), dando como resultado la distribución de resistividad representada en la sección de la Figura 321, donde la anomalía conductora sigue presente aunque más localizada. Con estas observaciones que quiere poner de manifiesto la diferente respuesta que cada dispositivo presenta ante la misma situación geológica, y la dificultad de interpretación cuando las estructuras investigadas son muy heterogéneas y tridimensionales.

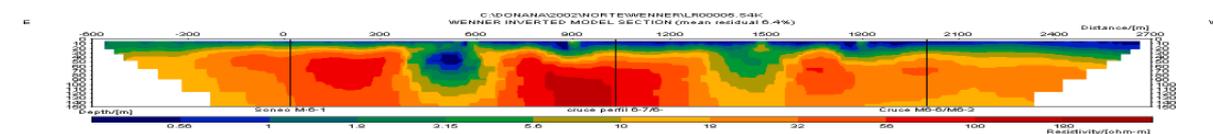


Fig. 321. Sección geoelectrica obtenidas por inversión de los datos medidos con dispositivo Wenner filtrados para eliminación de ruidos. La orientación de la sección de esta figura está invertida respecto de la de las secciones de la Figura 320, habiendo situado el Este a la derecha de la figura.

El sondeo testificado más próximo al corte geoelectrico es el M-6-6, situado unos 500-600 m al Sur y a 700 m del extremo Este del perfil (Figura 313). Superpuesta la información de la testificación gamma natural y conductividad del fluido a la sección geoelectrica (Figura 322), se aprecia que el primer tramo de unos 10 m de potencia, con una radiación gamma diferente del resto del registro según fue analizado anteriormente (ver Figura 317) mantiene una perfecta correspondencia con el

tramo de baja resistividad (1 ohm.m) en la sección. Por otra parte, al finalizar este tramo se encuentra el nivel freático, como indican los registros de conductividad y temperatura del fluido (Figura 314), con un agua que mantiene su salinidad constante en todo el sondeo en un valor de 0.8 mS/cm (agua dulce o muy moderadamente salobre). Este valor, superior al correspondiente en esta zona en los datos de 1995 (Figura 319), si refleja la salinidad del agua realmente contenida en la formación, no debe influir notoriamente en la modificación de su resistividad (nos referimos respecto del cambio que se produciría en la resistividad de una formación que pasase de tener agua dulce a agua salada).

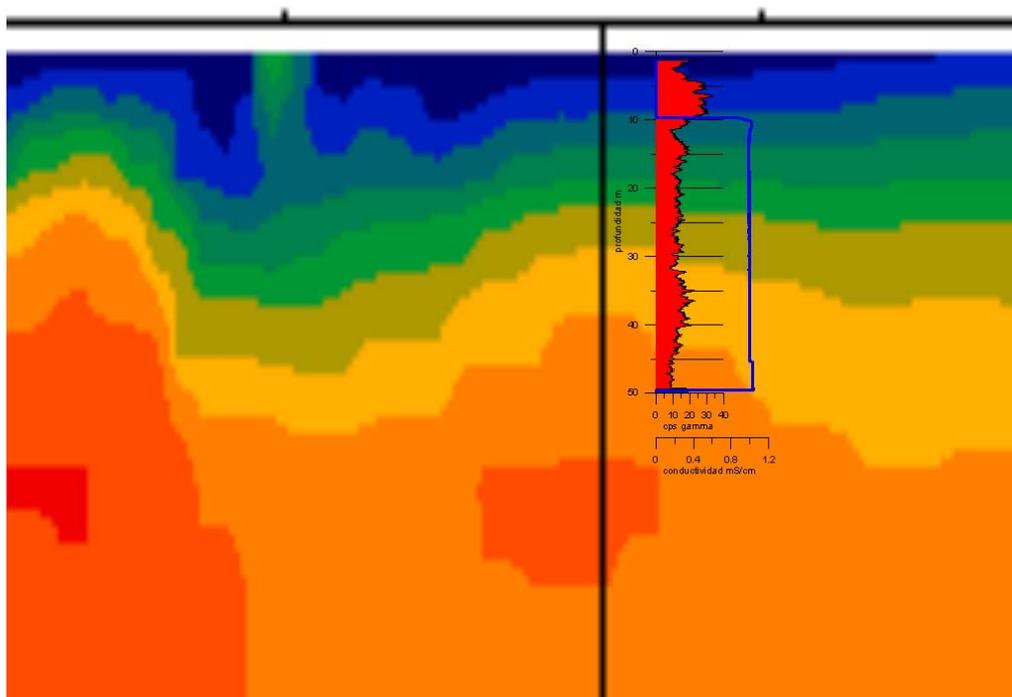


Fig. 322. Fragmento de la sección geoelectrica con la testificación gamma natural y conductividad del fluido del sondeo M-6-6, situado unos 600 m al Sur.

La amplia disponibilidad de sondeos en esta zona permite una buena comprobación de la correlación entre los datos de resistividad y las formaciones geológicas. Para ello hemos utilizado el corte nº 7 formado por la alineación de sondeos situada al norte del perfil eléctrico (posición en Figura 313). La traslación de información entre ambos documentos se representa en la Figura 323. La línea de color amarillo indica el contacto entre la capa superior de limos-arcillas de la formación Marismas con la capa de arenas de la formación deltaica. Dentro de la formación de Marismas se encuentran algunas intercalaciones de terrazas fluviales de gravas y arenas, cuyos límites hemos indicado por líneas de color negro; así mismo, dentro de la formación deltaica se diferencian varias secuencias o ciclos granodecrecientes formados por gravas-arenas-limos, estando indicados por las líneas de color azul los principales tramos de limos.

En la sección geoelectrica se pone de manifiesto que las arcillas de la formación Marismas presentan baja resistividad, de hasta unos 15 ohm.m, con un primer tramo mucho más conductor (inferior a 1 ohm.m), que según se indicó anteriormente queda perfectamente reconocido en la testificación

gamma natural. Las terrazas de gravas-arenas deben ser las responsables del aumento de resistividad, sin que la presencia de arcillas antes de entrar en las arenas basales sea diferenciable: el conjunto arenas-gravas y las arenas basales forman una única unidad geoelectrica. Tampoco es posible diferenciar por su resistividad los limos dentro de las arenas. La sección geoelectrica, que no ha profundizado hasta llegar a las margas azules, muestra bajo las arcillas un tramo resistivo en el que los contrastes verticales solo pueden interpretarse en el sector oriental, donde existe una cuña de menor resistividad, coincidente con la potente capa de limos. Sin embargo, se detectan varios cambios laterales de resistividad de no fácil explicación, sin que existan evidencias de agua salada.

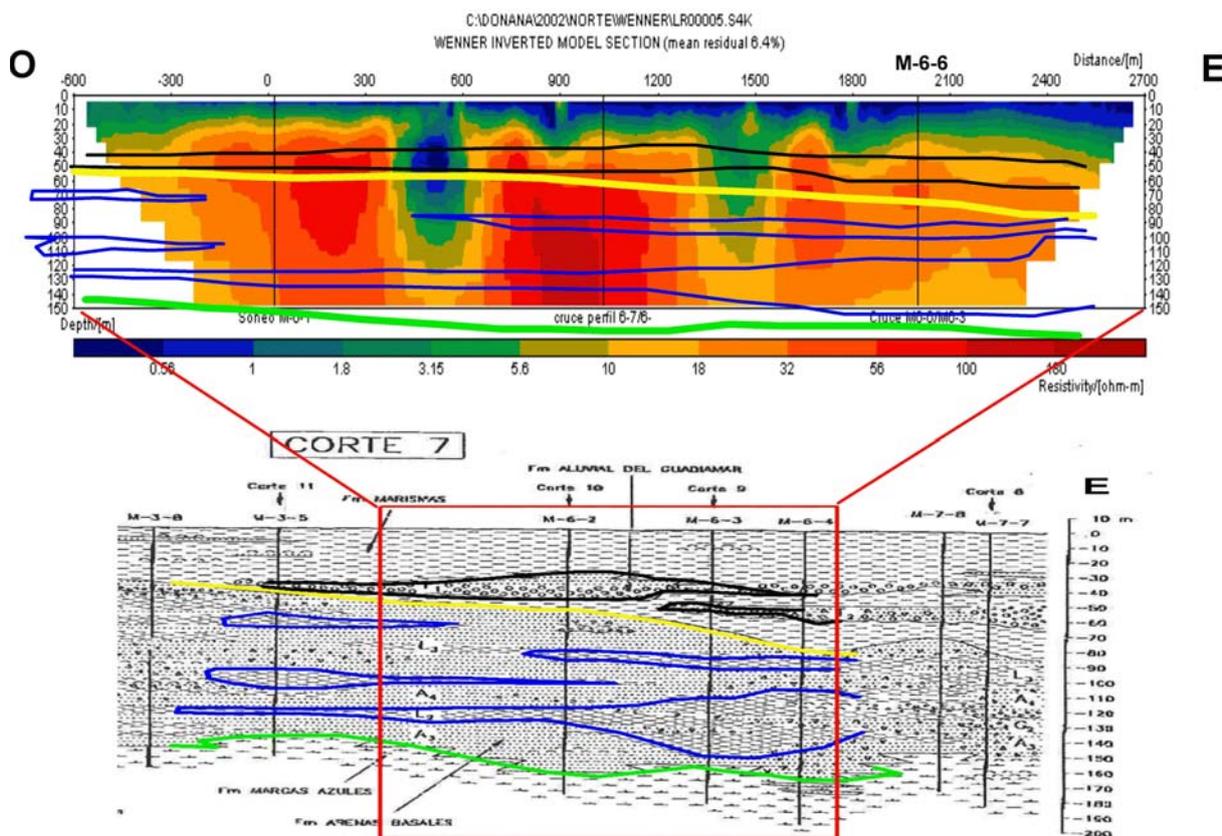


Fig. 323. Traslación de los principales contactos litológicos del perfil 7 (parte inferior de la Figura) a la sección geoelectrica.

En la Figura 324 se presenta un esquema interpretativo, que indica lo que se podría llegar a deducir en ausencia de mayor información geológica: existe un primer nivel de materiales de baja resistividad, con clara diferencia de una primera capa mucho más conductora, de potencia creciente hacia el Este. Una formación de resistividad correspondiente a arenas-gravas se sitúa bajo la anterior, con acusados contrastes laterales, que son interpretables como debidos a la presencia de formaciones arcillosas, y menos probablemente a la presencia de agua salada en “canales” de formaciones de gravas. De ser así, las intercalaciones de gravas no tendrían las dimensiones ni continuidad interpretadas en los cortes geológicos utilizados.

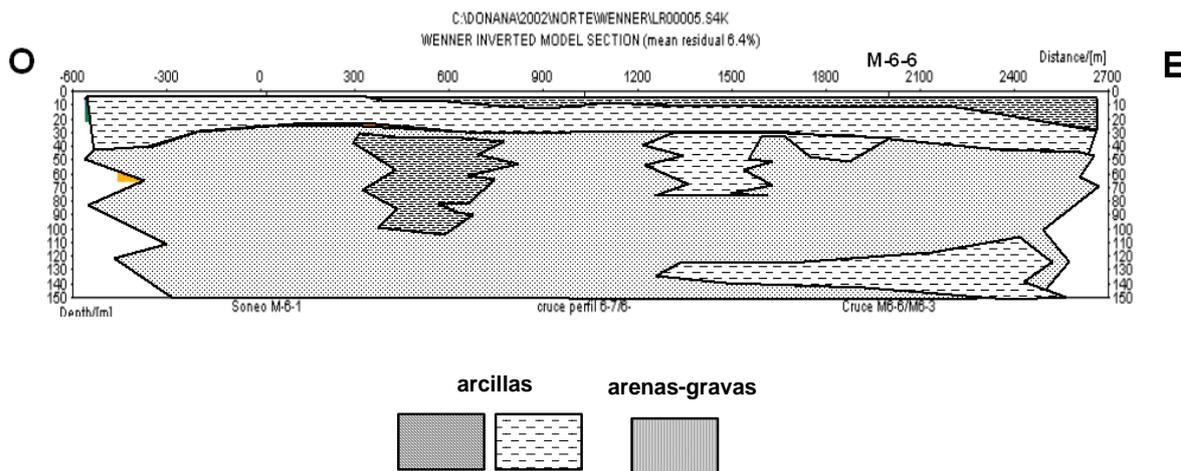


Fig. 324. Esquema interpretativo de la sección geoelectrica de la zona Norte.

Queda pues una vez más evidenciado que las secciones geoelectricas obtenidas mediante el método de perfiles eléctricos, pueden ser utilizadas para diferenciar litologías, siempre que sus resistividades no sean análogas; por otra parte, las secuencias e intercalaciones de poca potencia (inferior a 10 m) no son detectables.

Finalmente, se va a analizar la aportación de la **sísmica de reflexión**. El perfil realizado en esta zona ya fue descrito y comentado en el apartado IV-4.6.1, y su posición se indica en las Figura 310 y 313. En la sección sísmica convertida a profundidad (Figura 262, reproducida en la parte superior de la Figura 325) se trazaron los principales horizontes o reflectores que diferencian las unidades de las facies sísmicas interpretadas. La interpretación realizada en el mencionado apartado, se estableció en función de los datos aportados por las columnas litológicas de los sondeos M-6-6, Feder-4 y S-2. El primer reflector (marcado en color amarillo), sobre los 50 m de profundidad, podría ser la base de la primera capa de arcillas; en la sección obtenida con la fuente sísmica de vibración, de mayor resolución, se aprecian algunos reflectores por encima del marcado, que corresponderían a la presencia de intercalaciones de gravas. Sobre los 150 m de profundidad se ha marcado un segundo reflector continuo (en verde), situándose entre ambos una secuencia bastante reflectiva, pero de menor continuidad, presencia de reflectores curvos (en rojo); este tramo debe corresponderse con las arenas con intercalaciones discontinuas de arcillas. Los reflectores marcados en rojo, aunque podrían tener un aventurado significado geológico, lo más probable es que se trate de artefactos sin mayor significado. Por debajo de los 150 m se presenta una secuencia potente de reflectores de amplia amplitud y continuidad, con un leve buzamiento hacia el Oeste y que sobrepasan los 450 m de profundidad.

Estos reflectores se han trasladado (Figura 325- parte central) al corte 7, que ratifica la interpretación anteriormente efectuada, y confirma que los reflectores marcados de rojo no tienen ningún significado geológico, sino que se trata de las hipérbolas de difracción provocadas por las intercalaciones de gravas y limos en la formación de arenas basales. No obstante, pensamos que existe una

discrepancia en la interpretación del reflector situado sobre los 150 m de profundidad, que en efecto corresponde con la base de las arenas basales y el paso a unas margas, pero dichas margas no creemos que sean las pertenecientes al Mioceno. Según fue ya comentado en el apartado IV-4.6.1, de acuerdo con la secuencia de facies sísmica definida en el apartado III-2.4, deducida de las secciones realizadas para hidrocarburos (capítulo III, Figura 76), y con la información suministrada por los sondeos mecánicos profundos (párrafo III-2.3 y Figura 73), la zona por debajo de los 150 m se correspondería con la facies 5, perteneciente a la unidad de tipo deltáico, pudiéndose deducir que esta sección sísmica no ha llegado a recoger la presencia de las margas del mioceno. El tramo superior, por encima de los 150 m, se correspondería con la facies tipo 6, siendo el reflector que separa ambos tramos el correspondiente al reflector nº 7 de la Figura 73 (separación entre el Grupo Marismas y el Grupo Andalucía).

Trasladados estos reflectores a la sección geoeléctrica (Figura 325, parte inferior), se aprecia que el primer reflector (línea de color amarillo) se corresponde con la interfase entre las arcillas de Marisma con las gravas-arenas de las terrazas fluviales, dentro de la misma formación, no existiendo una diferenciación con el paso a las arenas basales, al igual que ocurría con la resistividad. Las difracciones existentes dentro de la capa de arenas guardan una ligera correspondencia con las anomalías de resistividad dentro de las mismas, lo que corrobora su naturaleza y confirma la existencia de dichas alternancias. El reflector de base de las arenas, sobre los 150 m, hace pensar en la posibilidad de que la penetración real de la sección geoeléctrica es inferior a la representada en el corte, lo que podría explicar la exagerada prolongación en profundidad de las anomalías tanto de mayor como de menor resistividad que aparecen en el perfil eléctrico.

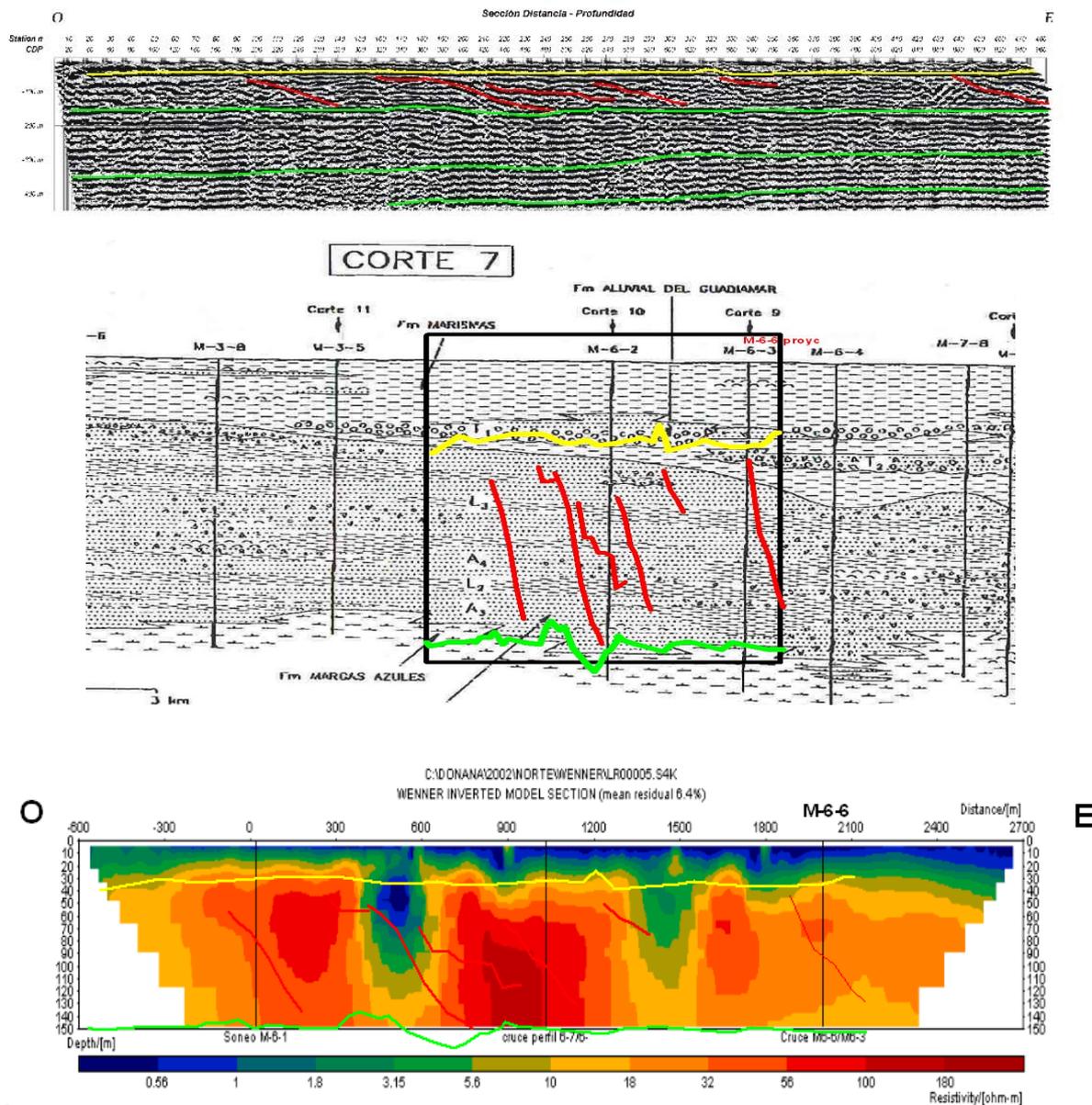


Fig. 325. Parte superior: línea sísmica con los reflectores indicativos de cambios de facies sísmica. Parte media: traslación de los reflectores sísmicos al corte geológico. Parte inferior: traslación de los reflectores sísmicos al perfil eléctrico.

En las proximidades del perfil eléctrico, entre los sondeos M-4-1 y M-4-2 (Figura 310) se encuentra situado el SEV MR-40 (medido en 1968), cuya interpretación coincide bastante bien con el modelo planteado: detecta un primer tramo muy conductor (0.3 ohm.m), seguido de un tramo de 3 ohm.m hasta los 35 metros, ambos corresponderían a la formación Marismas. Continúa con un tramo resistivo de 100 ohm.m que se correspondería con el tramo de las arenas basales (formación deltaica), no alcanzando ningún material más conductor a pesar de estar medido con un dispositivo de $AB/2=1000$ m.

IV.5.5 Zona de Santa Olalla

En esta zona, debido a la existencia de monte alto con mucha densidad de vegetación, no resulta factible la realización de trabajos que exijan la extensión de grandes dispositivos, por lo que solamente se han llevado a cabo los siguientes, cuya situación se indica en la Figura 326:

- 1 SEV de AB/2=320 m, en 2001 por IGME-2001
- 1 SEDT en bucle de 200x200 m, en 2001 por IGT
- testificación del sondeo Laguna de Santa Olalla, en 2005, de gamma natural y resistividad de la formación.



Fig. 326. Posición del SEV (cruz), SEDT (cuadrado) y sondeo testificado (círculo) en la zona de Santa Olalla.

Los resultados del SEDT, ya comentados en el apartado IV-3 (Figura 327, copia de la Figura 238), indican una primera capa resistiva de unos 250 ohm.m que puede ser debida a arenas finas, pasando sobre los 80 m de profundidad a 18 ohm.m (posible mayor contenido en arcilla), manteniéndose homogénea hasta los 360 m, donde la resistividad vuelve a bajar a unos 4 ohm.m.

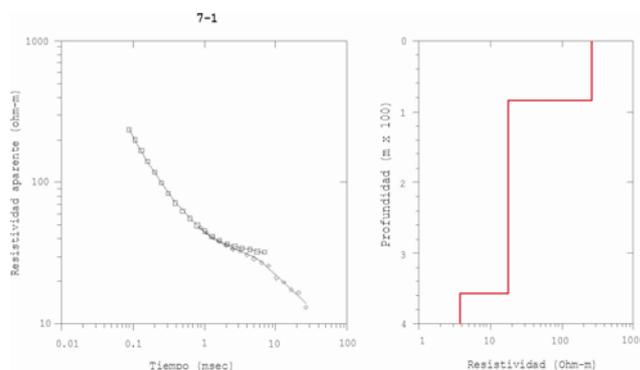


Fig. 327. Datos de campo (curva resistividad-tiempo) y modelo de distribución de la resistividad con la profundidad obtenidos por inversión del SEDT de Santa Olalla.

La resistividad proporcionada por el SEV efectuado en el mismo lugar puede involucrar un mayor volumen del subsuelo, ya que tiene una apertura total de dispositivo de emisión de corriente (AB) de 640 m, frente a los 200 m del lado del bucle del SEDT. Su curva de campo (Figura 328) es de buena calidad. Su interpretación proporciona un modelo del subsuelo en el que tras una primera capa de 0.7 m resistiva (312 ohm.m) que puede corresponder a arenas superficiales secas, se presenta un terreno de 120 ohm.m (posibles arenas con agua) hasta los 20 m de profundidad, con una intercalación entre los 5 y los 10 m de un resistivo (440 ohm.m) que no tiene justificación por las litologías presentes; a partir de los 20 m aumenta ligeramente la resistividad (a 170 ohm.m), hasta los 112 m, donde disminuye a 4 ohm.m, que puede corresponderse con la existencia de limos o arcillas.

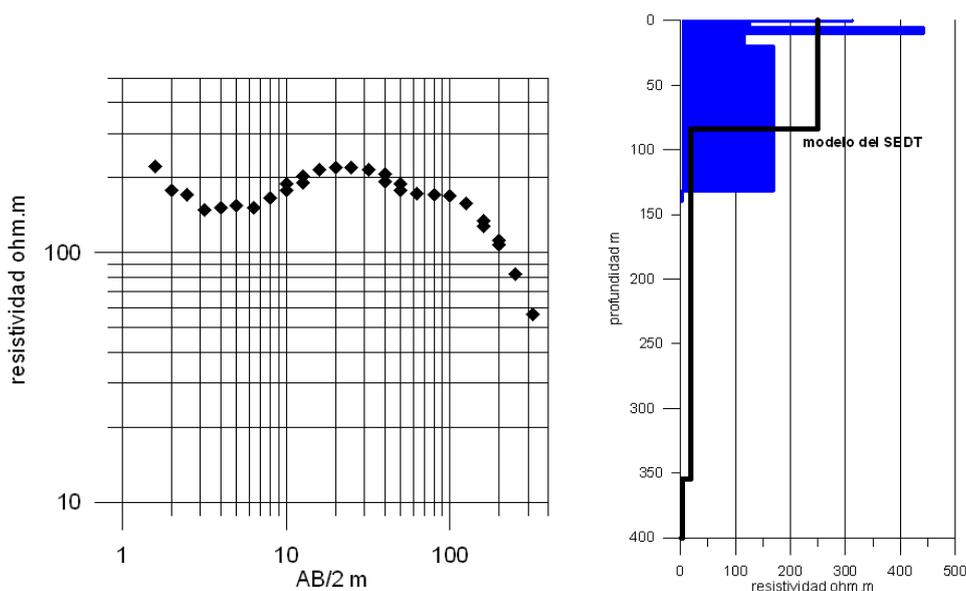


Fig. 328. Datos de campo (curva resistividad-AB/2) y modelo de distribución de la resistividad con la profundidad obtenidos por inversión del SEV de Santa Olalla. En el mismo gráfico se representa el modelo del SEDT (en negro).

Es notable la discrepancia de los modelos obtenidos; el SEDT se muestra menos sensible a las alternancias de resistividad en los primeros 20 m, y la existencia de una capa de baja resistividad se sitúa a profundidades muy distintas en ambos métodos.

Los resultados de la testificación del sondeo Laguna de Santa Olalla, en la Figura 329 (Figura 201, del apartado IV-2), evidentemente permiten distinguir con mayor detalle la distribución de la resistividad. Iniciándose el registro con un valor de unos 25 ohm.m, presenta un máximo de 40 ohm.m en los primeros 10 m del sondeo, pasando posteriormente a 35 ohm.m hasta los 26 m; en el resto del sondeo la resistividad vuelve a disminuir oscilando entre 25 y 30 ohm.m hasta los 85 m, donde disminuye bruscamente hasta 5 ohm.m. Esta tendencia general de la resistividad también la presenta en sentido opuesto la variación de intensidad de la radiación gamma natural, aunque no fácilmente reconocible salvo en algunas situaciones (indicadas por un recuadro verde en la Figura 329), donde la disminución de la resistividad simultánea a un aumento de la radiactividad permite deducir la existencia de intercalaciones arcillosas netas.

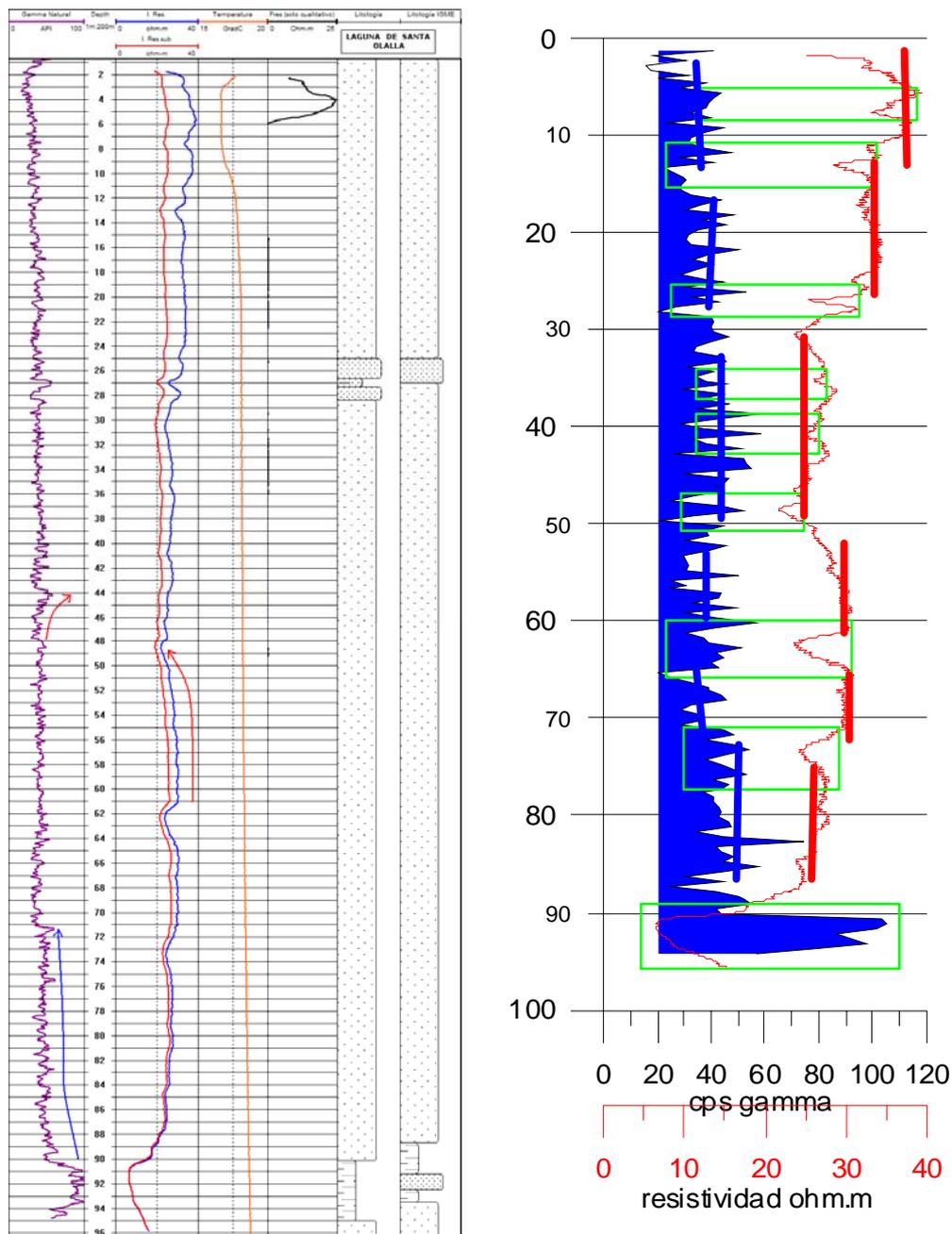


Fig. 329. Testificación del sondeo Laguna de Santa Olalla (izquierda) y escala ampliada de los registros de gamma natural y resistividad de la formación (derecha). Las flechas azules indican secuencias granocrescentes, y las rojas granodecrescentes.

El nivel freático se encontraba a 0.9 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica, y la temperatura, con valor medio de 18° C, no presenta una variación que pueda justificar la de resistividad. Aunque no disponemos de los datos de salinidad del agua (como consecuencia de los incidentes metrológicos comentados en el apartado IV-2-3), si la variación general de la resistividad en una secuencia de arenas fuera debida al aumento de salinidad del agua de formación, no tendría porque reflejarse en las variaciones de gamma natural; por lo tanto la variación de la resistividad debe ser interpretada como variación en las facies sedimentológicas, tanto como una variación de la arcillosidad como del tamaño de grano. Se puede identificar (Figura 329) una

secuencia granocreciente a techo desde el metro 90 al 71, con una ligera disminución de la radiactividad y resistividad de muro a techo, así como dos secuencias granodecrecientes a techo entre los metros 61 a 49, y 48 a 44, con la situación de parámetros opuesta.

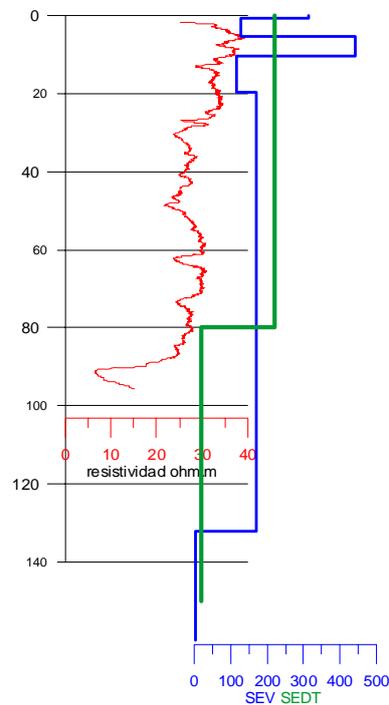


Fig. 330. Comparación de valores de resistividad medidos en la testificación, en el SEV y en el SEDT de Santa Olalla.

Finalmente, se han comparado los valores de resistividad obtenidos con los tres métodos: testificación, SEV y SEDT (Figura 330). Cuantitativamente y en rasgos generales, normalmente los valores de resistividad obtenidos por el SEDT suelen ser inferiores a los de los SEV, salvo en ambientes conductores, donde puede darse lo contrario. En este caso los valores obtenidos por SEV y SEDT son del mismo orden de magnitud: 250 ohm.m en un tramo del SEDT se corresponden con unos 170 ohm.m en el SEV, mientras que sólo se miden unos 30 ohm.m en la testificación. Cualitativamente, tanto el SEV como la testificación identifican una capa más resistiva entre los 10 y los 20 m de profundidad (de 400 ohm. m en el SEV y de 40 ohm.m en la testificación), capa que no es detectada en el SEDT, método poco apropiado para resolver intercalaciones resistivas; la disminución de resistividad y sus alternancias detectada en la testificación a partir de los 30 m de profundidad, no es vista ni por el SEV ni por el SEDT, que dan una imagen de resistividad homogénea en toda la profundidad: se trata aquí de un tema de resolución esperable en cada método, así como de los modelos que, sin información a priori, es razonable adoptar en su interpretación. La disminución de resistividad sobre los 80 m de profundidad detectada por la testificación, también se aprecia claramente en el SEDT, mientras que la inversión del SEV no la refleja: como se ha recordado anteriormente, el SEDT es un método más adecuado para la detección de rocas conductoras de la corriente eléctrica.

efecto, el agua tiene una conductividad de unos 0.13 mS/cm, por lo que puede afirmarse que se trata de agua dulce.

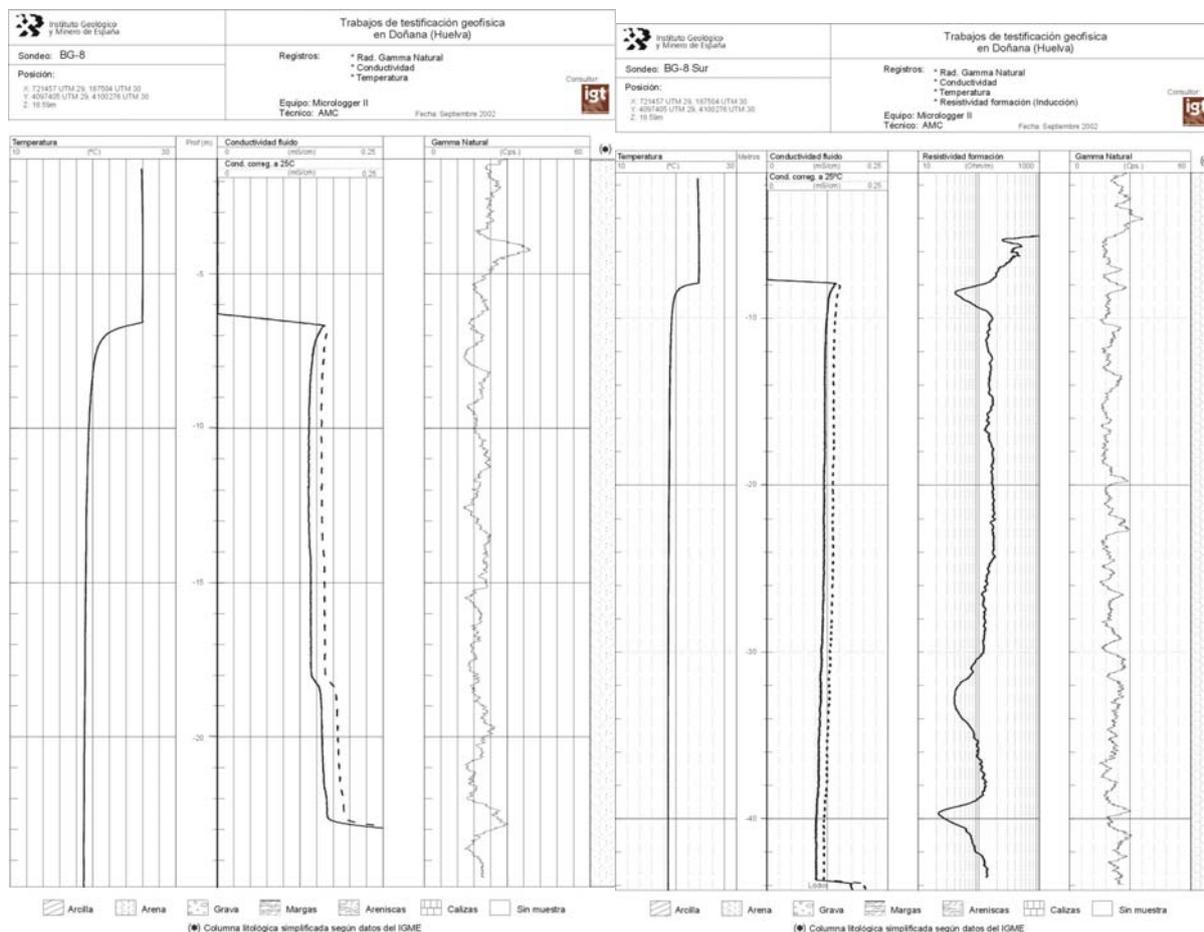


Fig. 332. Testificación de los sondeo BG-8 y BG-8-Sur en la campaña de 2002.

Del registro ahora efectuado de resistividad de la formación se deduce que las intercalaciones de arcillas presentan una resistividad entre 20 y 40 ohm.m, mientras que las arenas limpias llegan a los 180 ohm.m.

En la Figura 333-izquierda, se reproducen conjuntamente las testificaciones gamma natural de ambos sondeos BG-8, comprobándose que son prácticamente idénticas, como cabe esperar dada su gran proximidad. La correlación entre la radiación gamma natural y la resistividad de la formación se analiza en la parte derecha de la Figura 333: los primeros 5 m presentan un alto (relativo) valor del registro de gamma natural, careciéndose de registro de resistividad en esa parte del sondeo; a partir de esa profundidad puede encontrarse una correlación entre la disminución de resistividad y el aumento de radiación, sobre todo a escala decamétrica. Así, la mayor resistividad desde los 10 hasta los 24 m de profundidad va acompañada de un valor medio de radiación inferior al existente en tramos de menor resistividad, pudiendo garantizar que este tramo, supuesto homogéneo de arenas, tiene en realidad importantes intercalaciones arcillosas.

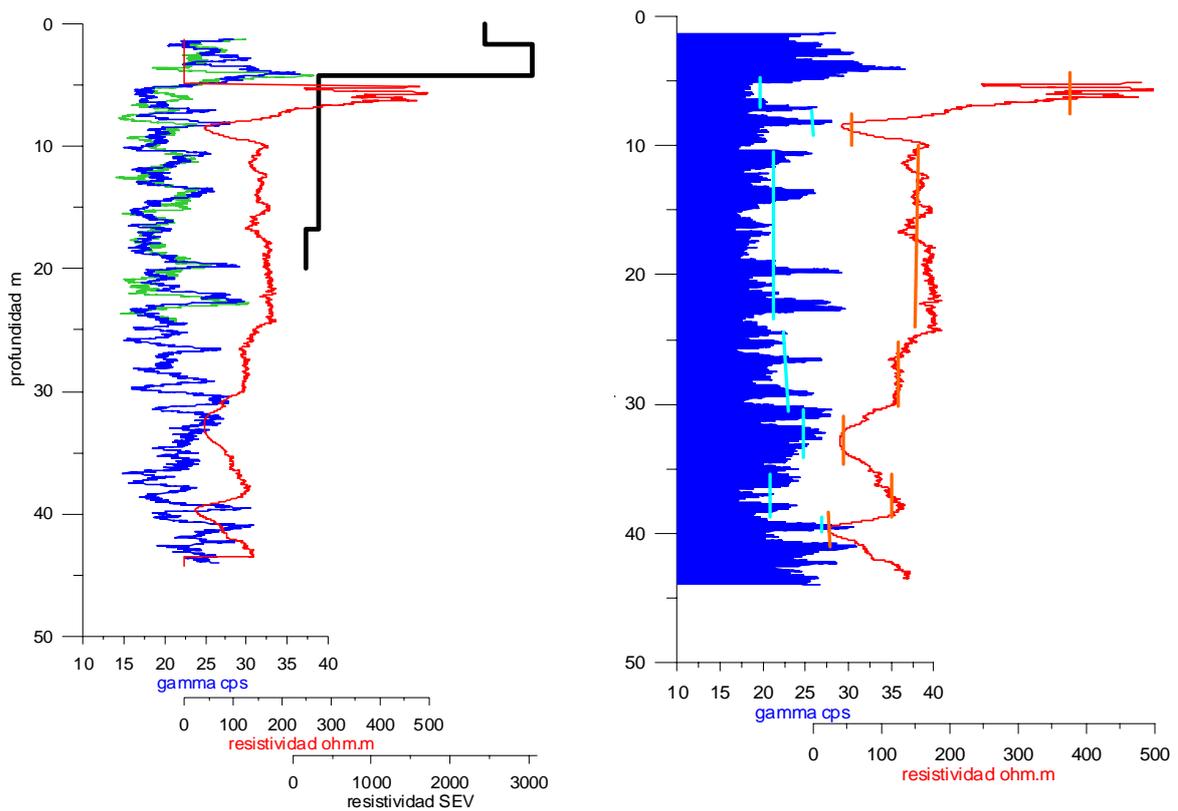


Fig. 333. Testificación de los sondeos BG-8. Parte izquierda: en verde testificación gamma natural del BG-8; el resto de las testificaciones corresponden al BG-8-Sur. Se indica además la distribución de resistividad resultado de la interpretación del SEV. Parte derecha: Análisis de la correlación entre la resistividad de la formación y la radiación gamma natural en el sondeo BG-8-Sur.

El SEV presenta una curva de campo (Figura 334) de buena calidad, excepto los tres últimos puntos, que no se han tenido en cuenta para la interpretación, por lo que la información obtenida no sobrepasa los primeros 20 m de profundidad.

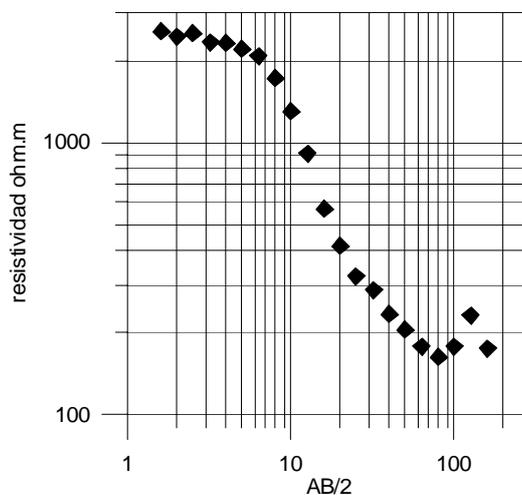


Fig. 334. Curva de mediciones en campo del SEV en la zona del sondeo BG-8.

La inversión de este SEV, cuyo corte geoelectrico está representado conjuntamente con los registros de testificación en la Figura 333-izquierda, detecta un capa muy resistiva (2500-3000 ohm.m) en los primeros 4 m de profundidad, que pasa a unos 300 ohm.m, con nueva disminución a 160 ohm.m a los 17 m de profundidad. Como es normal, los valores de resistividad medidos en la testificación difieren a veces sustancialmente de los medidos desde la superficie: el máximo de 3000 ohm.m en el SEV se registra como 500 ohm.m en la testificación, y valores de 300 ohm.m se corresponden a valores de 180 ohm.m. Sin embargo, la información cualitativa del SEV coincide bien con la de la testificación, con un ligero desfase en las profundidades: tras una capa muy resistiva en superficie (posiblemente arenas secas) se entra en un terreno de menor conductividad pero de todas formas resistivo, como corresponde a las arenas con agua dulce; es evidente que el SEV no puede tener la resolución suficiente para detectar las numerosas pasadas más arcillosas presentes en el registro.

La sección geoelectrica de **Perfil Eléctrico** efectuado, centrado en el sondeo BG-89, está representada en la Figura 335.

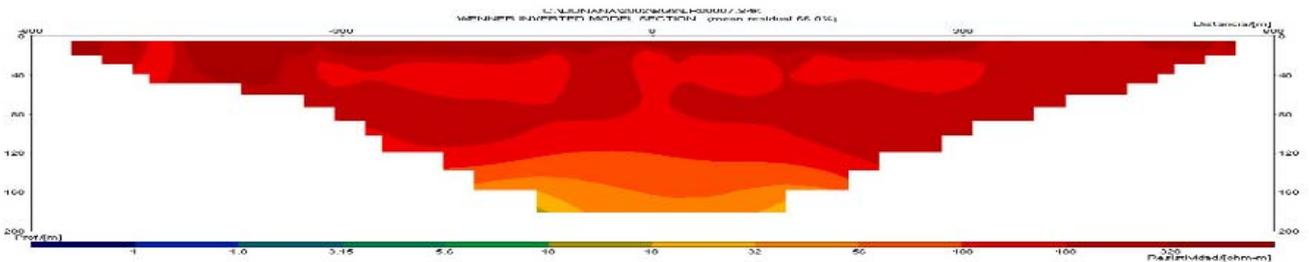


Fig. 335. Perfil eléctrico de la zona del sondeo BG.8.

Destaca la alta resistividad encontrada, por referencia al resto de los perfiles efectuados en este trabajo, para los que se ha mantenido la escala de asignación de colores a rangos de resistividad, presentando valores del mismo orden que en la zona del Palacio de Doñana (Figura 291). Se aprecia una primera capa muy resistiva (más de 300 ohm.m) de unos 10 m de potencia en todo el perfil, que debe representar la presencia de arenas secas. Con el aumento de la profundidad la resistividad en general disminuye, situándose no obstante en valores altos (superiores a 180 ohm.m), apreciándose un cambio a valores más conductores (por debajo de 30 ohm.m) a partir de unos 160 m de profundidad, que pudiera corresponderse con un paso a margas. En las arenas aparecen zonas con resistividad inferior (unos 100 ohm.m), que pueden interpretarse como tramos donde la presencia de arenas arcillosas es más importante.

Para comparar los valores de resistividad aquí obtenidos con los de la interpretación del SEV y la testificación del sondeo BG-8 se han superpuesto en la Figura 336; el primer tramo resistivo de arenas secas es detectado por todos los métodos, aunque existan diferencias cuantitativas en la resistividad y en la potencia de la capa. La disminución de resistividad sobre los 25 m de profundidad en la testificación se corresponde bien con el paso a valores más conductores en la sección del perfil.

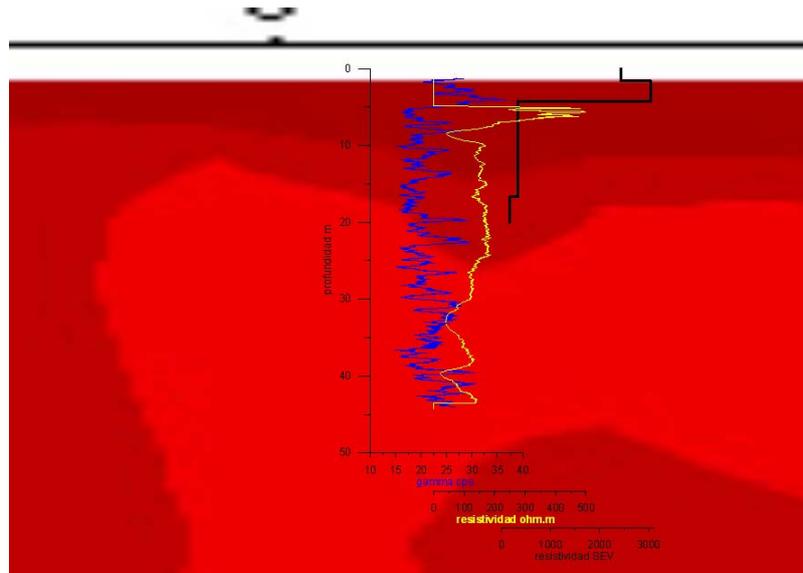


Fig. 336. Detalle del Perfil Eléctrico de la zona del sondeo BG-8 con la testificación gamma (en azul) y resistividad (en amarillo) del mismo sondeo, y el corte geoelectrico del SEV (en negro) realizado en el mismo lugar.

Finalmente, respecto de la sección de **sísmica de reflexión** obtenida en esta zona y comentada en el apartado IV-4.6.2, se trata de un perfil paralelo al eléctrico, centrado en el sondeo BG-8. Como ya dijimos anteriormente, la sección en distancia-profundidad pierde bastante resolución, probablemente debido a que las arenas tan sueltas en esta zona han amortiguado mucho las altas frecuencias, razón por la que la interpretación previa se realizó utilizando la sección distancia-tiempo (Figura 266). Sin embargo, para efectuar su traslación a la sección geoelectrica es preciso utilizar la sección distancia-profundidad (Figura 265), para lo que se ha procedido a un nuevo “picado” de reflectores utilizando el mismo criterio de diferenciar facies sísmicas (Figura 337).

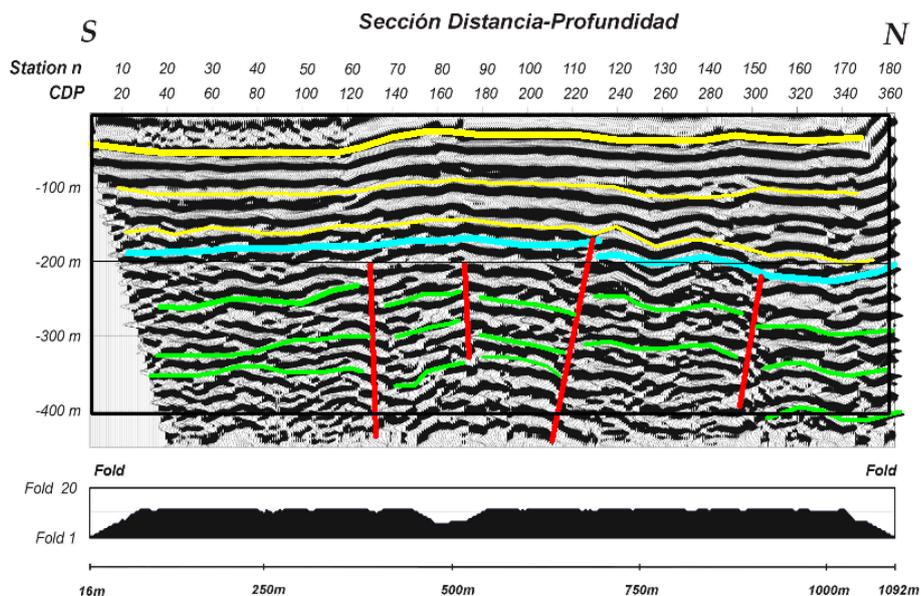


Fig. 337. Marcado o “picado” de los principales reflectores de la sección sísmica de la zona del sondeo BG-8, diferenciando las facies sísmicas observadas.

El resultado obtenido es concordante con el indicado en el apartado IV-4.6: el primer reflector (en color amarillo) debe representar la base de las arenas secas; el siguiente reflector (en color azul) indica el fin de una secuencia caracterizada por reflectores de gran continuidad, rotos o alterados en algunos sitios posiblemente por las interferencias de las numerosas intercalaciones de arcillas. Debe tenerse en cuenta la disminución de cobertura que indica el diagrama de explotación entorno de los 500 m de distancia (por la curvatura del perfil), y que coincide en posición con algunos de los supuestos “accidentes” del relieve, sobre todo en los reflectores profundos. Por debajo de este reflector marcado de color azul, el aspecto es más caótico; el carácter de discontinuidad de los reflectores (marcados en color verde) se ha señalado con líneas, que no forzosamente quieren indicar la presencia de fallas, bastante poco probables en este entorno sedimentario. Esta zona inferior creemos que se corresponda con la facies sísmica tipo 5, representando la zona superior la unidad eólica y dunar (ver Figura 76 del apartado III-2, Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sísmica de reflexión), y que por lo tanto, las margas azules se sitúan a una profundidad no alcanzada por la sección sísmica.

La traslación de estos reflectores, indicativos de cambios de ambientes de sedimentación, a la sección geoelectrica se indica en la Figura 338.

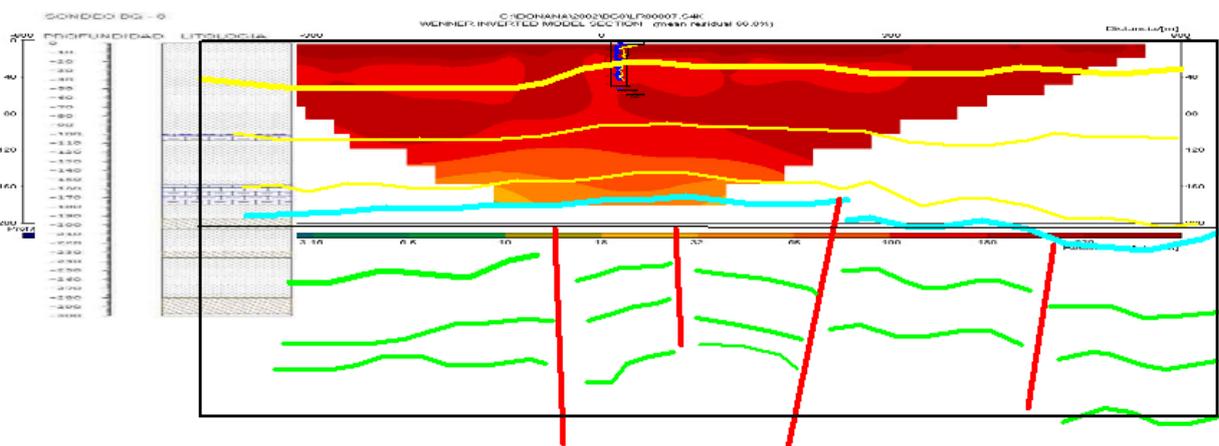
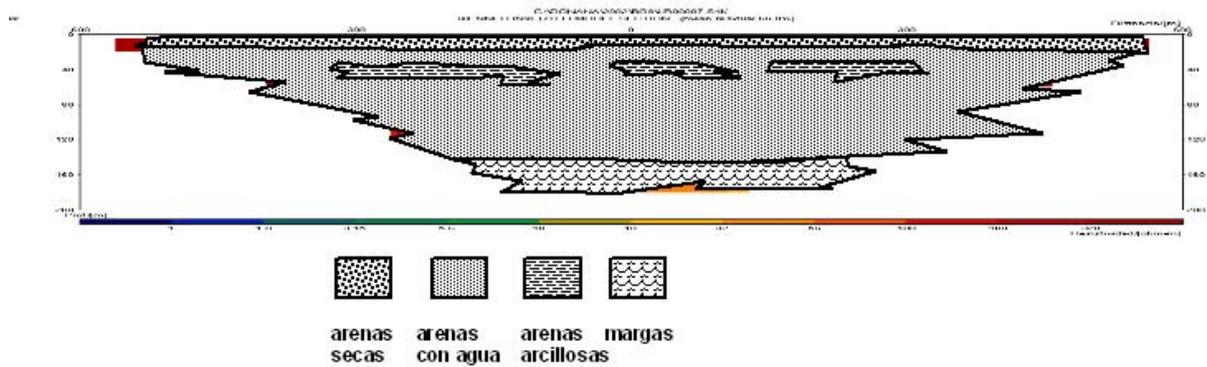


Fig. 338. Superposición de los indicadores sísmicos a la sección geoelectrica en el sector del sondeo BG-8. La columna litológica conocida del sondeo se ha situado a la izquierda del perfil como comparación.

Con las diferencias introducidas por la ley de velocidad adoptada en la conversión en profundidad de los datos sísmicos, el primer reflector puede considerarse que tiene una buena correlación con lo que geoelectricamente interpretamos como la base de las arenas secas. La zona sísmica iniciada en el reflector de color azul también mantiene una buena correspondencia con la entrada en una zona de menor resistividad, interpretada como de margas; como puede observarse, la columna litológica conocida no refleja este cambio, aunque ciertamente deja entrever la mayor presencia de arcillas intercaladas con las arenas. Es evidente que ni los sondeos ni la sección geoelectrica han alcanzado las margas azules del Mioceno.

En este sector puede concluirse por lo tanto que la sección geoelectrica ha determinado con bastante precisión los cambios litológicos en profundidad, con la resolución debida al método, como se sintetiza en el esquema interpretativo de la Figura 339.



IV.5.7 Zona de Malandar

Esta zona se encuentra en el extremo sur de la flecha litoral, junto al sondeo Cuartel del Malandar perforado por el IGME en 2001, próximo al antiguo cuartel de la Guardia Civil y a pocos metros de la costa (Figura 340).

Las observaciones efectuadas en este sondeo han sido uno de las que principales motivos que decidieron la realización del presente Proyecto, como se indicó en el apartado 0. "Introducción y antecedentes". Por una parte como consecuencia de las dataciones cronológicas realizadas por el CSIC en noviembre de 1999 se detectó que en este sondeo el Mioceno comienza a los 75 m, en contradicción con la profundidad determinada por el antiguo mapa del techo de las margas azules, que lo situaba a 200 m. Por otra parte se localizaron en el sondeo lentejones de agua salada entre los 60-70 m, reposando sobre los limos margosos del Mioceno; por encima hay arcillas y limos de marisma, siendo los primeros 20 m arenas de la flecha.

El objetivo de los trabajos efectuados en esta zona es verificar si puede identificarse la interfaz entre el agua dulce de la zona de la flecha litoral y el agua salina encontrada en el sondeo.

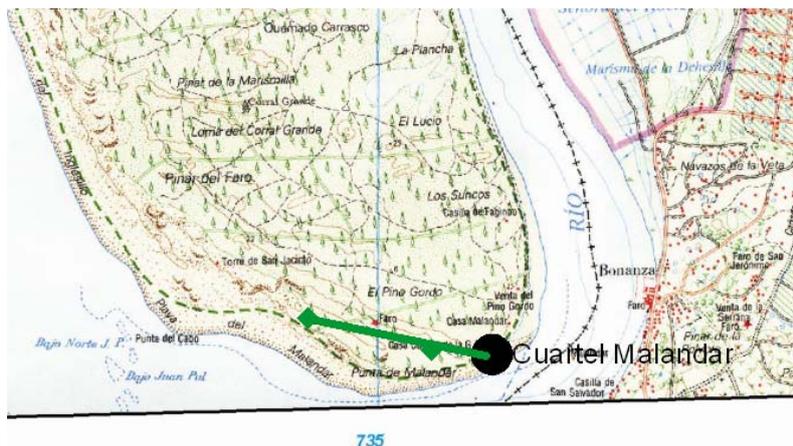


Fig. 340. Situación del perfil eléctrico efectuado en la zona del sondeo Cuartel del Malandar.

Los trabajos realizados han sido:

- testificación del sondeo Cuartel del Malandar, midiéndose la radiación gamma natural y la resistividad de la formación; efectuado en 2004 por AGS.
- Perfil Eléctrico de 1500 m de longitud, azimut de 280°, distancia interelectródica de 15 m y dispositivo Wenner, con azimut 280°. Efectuado por el equipo del IGME en 2002.

Desafortunadamente, por las razones explicadas en el apartado IV-2.3, aunque estaba previsto medir los parámetros temperatura y conductividad del agua del sondeo, este último no pudo llevarse a efecto.

Como se indicó en el apartado IV-2.1, este sondeo fue testificado en el año 2000 (Figura 341). Según estos datos (comunicación personal de M. Manzano), el agua es salubre desde el comienzo (unos 7000 uS/cm a 25° C), pasando a salmuera (42000 uS/cm) al final del sondeo (60 m). Aunque se desconoce la salinidad del agua de las arenas superficiales, es evidente que el resto está afectado por intrusión de agua del mar, por lo que se trata de averiguar la configuración de la interfase hacia el cordón dunar contiguo, que recibe la recarga de agua dulce de lluvia, así como averiguar si la salinidad sigue aumentando por debajo de la base del sondeo o permanece constante. El sondeo parece ser que encontraba ya colmatado a partir de los 62 m.

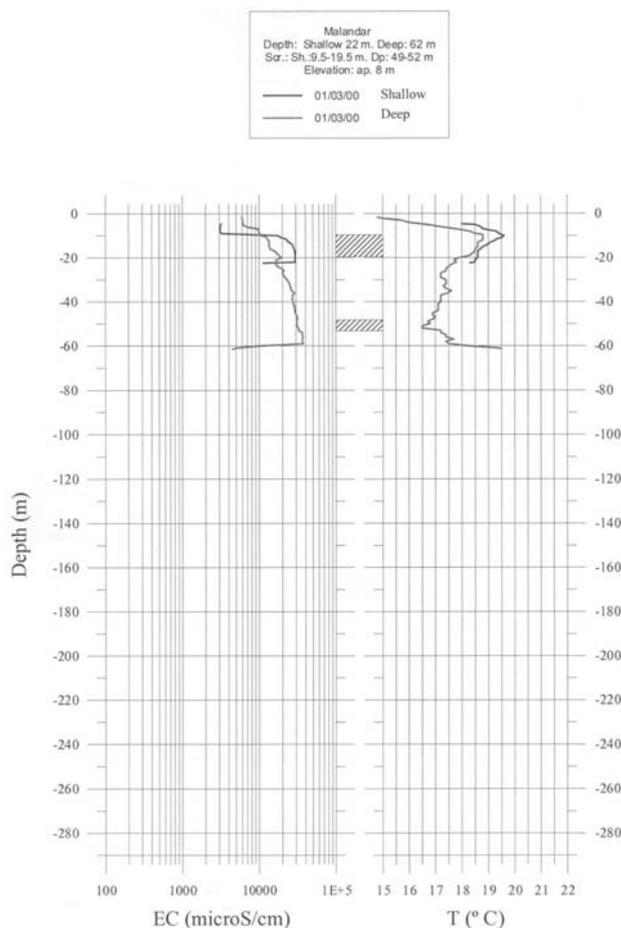


Fig. 341. Registros de conductividad y temperatura del agua del sondeo Cuartel del Malandar efectuados en 2000.

La nueva testificación efectuada en el presente Proyecto en 2004 (Figura 342-izquierda, copia de la Figura 205), encontró el sondeo colmatado ya a sólo 49 m de profundidad, por lo que las observaciones efectuadas en el año 1999 no pueden ser corroboradas. El nivel freático se encontraba a 4.72 m de profundidad en el momento en que se realizó la testificación geofísica. Aunque no haya podido disponerse de datos actuales de la conductividad del fluido, puede asumirse que la salinidad será al menos igual a la registrada en el año 2000. El registro combinado de gamma natural y resistividad permite distinguir tres grandes unidades litológicas en los primeros 48 m del sondeo: una superior hasta los 8 m, de arenas (baja radiación gamma y resistividad de 25 a 10 ohm.m); una

intermedia desde los 8 hasta los 18 m, areno-arcillosa, con resistividad del orden de 1 ohm-m, y la inferior de arcillas hasta el fin del sondeo, marcada fundamentalmente por el aumento de radiación gamma, ya que la resistividad se mantiene en el orden de 1 ohm.m.

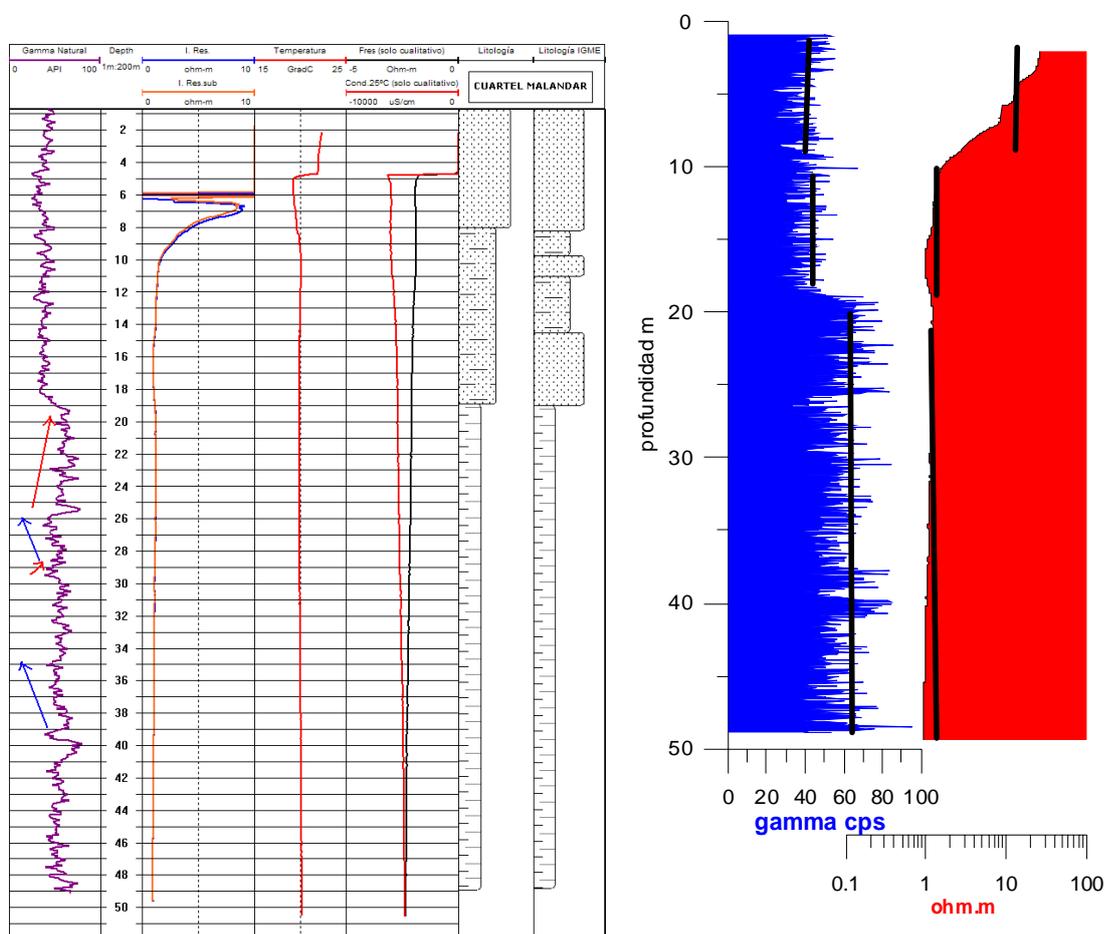


Fig. 342. Lado izquierdo: registros de gamma natural y resistividad de la formación efectuados en el sondeo Cuartel del Malandar en 2004. Lado derecho: análisis de correlación entre estos parámetros.

En el lado derecho de la Figura 342 se puede apreciar mejor el análisis de correlación entre los registros de gamma natural y resistividad de la formación. La utilización de la escala logarítmica para la resistividad permite apreciar que los aumentos de radiación son acompañados de una disminución en la resistividad, aunque esta correlación es menos evidente y marcada que en otros sondeos, como el de Santa Olalla (Figura 329) o BG-8 (Figura 333), lo que tiene que ser debido a la influencia de la salinidad del agua. Desde este punto de vista, es posible que hasta los 18 m se trate de una formación arenosa, sin arcillas, pero con el agua más salada a partir de los 8 m de profundidad. Las intercalaciones arenosas indicadas por el registro de gamma natural por debajo de los 18 m resultan no identificables en el registro de resistividad.

Las secuencias sedimentarias más destacadas se sitúan dentro del nivel arcilloso, ya que las variaciones litológicas en esta unidad permiten apreciar esos cambios evolutivos en la radiación

gamma. Estas secuencias son tanto granodecrecientes (indicadas en la Figura 342 con flechas de color rojo) como granocrecientes a techo (flechas de color azul).

El Perfil Eléctrico se ha efectuado por un camino entre la maleza, iniciándose en el Este junto al sondeo Cuartel del Malandar y extendiéndose hacia el Oeste unos 1800 m. La correspondencia entre los datos de la sección geoelectrica y la testificación del sondeo (Figura 343) son buenos, con una resistividad alta en los primeros metros, que pasa a valores de 1 ohm.m en profundidad, acompañado dicho cambio por un aumento de la radiación gamma, que en la sección geoelectrica corresponde mejor que en la testificación con el brusco cambio de resistividad.

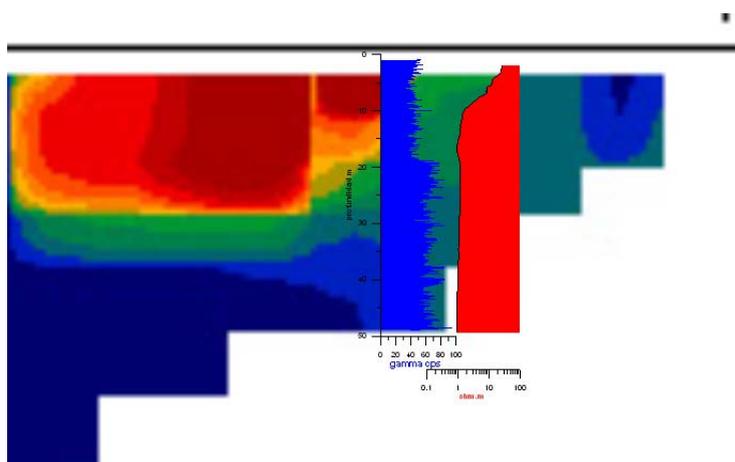


Fig. 343. Detalle del extremo oriental de la sección geoelectrica junto con la testificación gamma (en azul) y de resistividad (en rojo) del sondeo Cuartel del Malandar.

El corte geoelectrico completo se presenta en la Figura 344, donde se ha superpuesto la información litológica conocida de 1999, corroborada en sus primeros 48 m por la testificación del sondeo en 2004. A los 20 m de profundidad, la línea de color amarillo indica la base de las arenas de la flecha, que se caracterizan por su resistividad superior a 20 ohm.m, llegando a más de 100 ohm.m, lo que indica que contiene agua dulce. Hasta la primer línea de color verde, a los 60 m de profundidad se sitúan las arcillas y limos de marisma, caracterizados por resistividades normalmente inferiores a los 10 ohm.m, que en algunos sitios pasa a valores inferiores a 1 ohm.m, detectando las zonas de mayor concentración de agua salada. Entre las dos líneas verdes, tramo de 60 a 70 m de profundidad, es donde se detectó en 1999 la presencia de agua salada, siendo limos margosos hasta los 79 m, donde la línea de color azul marca el techo de las margas del Mioceno, no apreciándose un claro cambio de la resistividad.

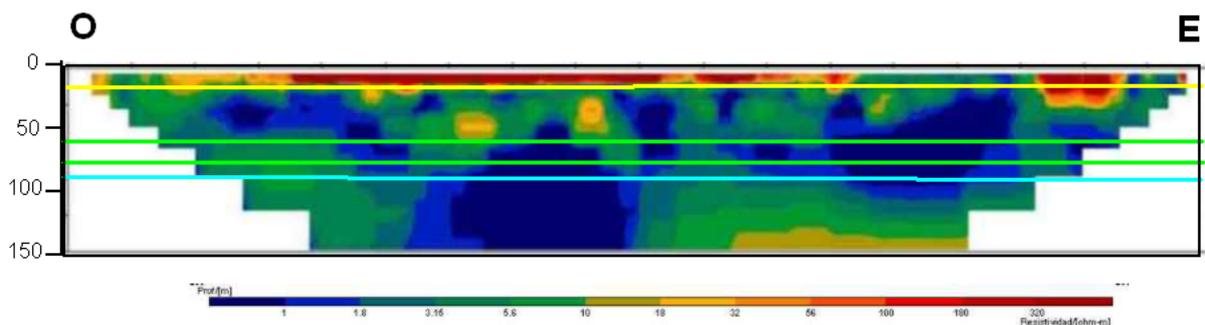


Fig. 344. Sección geoelectrica obtenida en el Cuartel del Malandar, con indicación de los horizontes litológicos identificados en 1999.

Se han llevado a cabo otras dos inversiones de los datos de campo de este Perfil Eléctrico, tratando por un lado de mejorar el error de ajuste entre el modelo y los datos, e incorporando además dos técnicas diferentes: una denominada “smooth”, en la que la transición de unos valores de resistividad a otros se hace de forma continua, y otra denominada “robust”, en donde dicha transición trata de ajustarse a cambios más bruscos. Un ejemplo de la diferencia entre ambos tipos de inversión se presenta en la Figura 345.

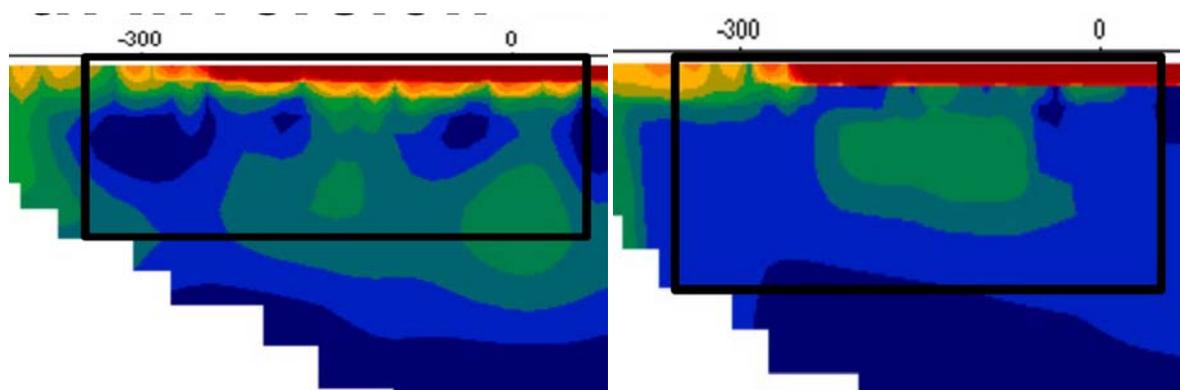


Fig. 345. Detalle de la sección geoelectrica para mostrar la diferencia obtenida con inversión tipo “smooth” (izquierda) y “robust” (derecha).

En principio, las variaciones debidas a cambios de litología obedecen más a modelos de cambio brusco, mientras que los fenómenos de intrusión salina de agua de mar deben de reflejarse mejor en variaciones suaves. Las secciones completas se presentan en la Figura 346, con indicación de las líneas de tránsito litológico anteriormente utilizadas (amarillo: base de las arenas a 20 m; en azul: entrada en las margas del Mioceno, a 75 m; en verde: lentejones de arena con agua salada).

Sobre la capa de arenas de los primeros 20 m cabe comentar lo mismo que como resultado de las diagráfias: puede tratarse de que los primeros 10 m sean arenas secas (nivel freático a unos 5 m) y/o con agua dulce, y los siguientes 10 m contengan ya agua salada, o un mayor contenido en arcillas. En ambos modelos el siguiente tramo de arcillas y limos de marisma hasta los 75 m presenta resistividades superiores a los 4 ohm.m, con zonas de menor resistividad, que pueden interpretarse

como de mayor concentración de sal en el agua. La transición a las margas del Mioceno sigue sin presentar un cambio neto observable, apareciendo como más resistivas en la parte oriental y más conductoras en la occidental. Sin embargo, esta situación puede interpretarse como debida precisamente a la interfase agua dulce- agua salada (línea discontinua de color rosa), que situaría dicha interfase a mayor profundidad en el sector occidental de la barra litoral; esta interpretación pone en duda que por debajo de los 80 m se encuentren las margas del Mioceno, ya que es poco probable que una intrusión avance de semejante manera en terrenos de tan poca permeabilidad.

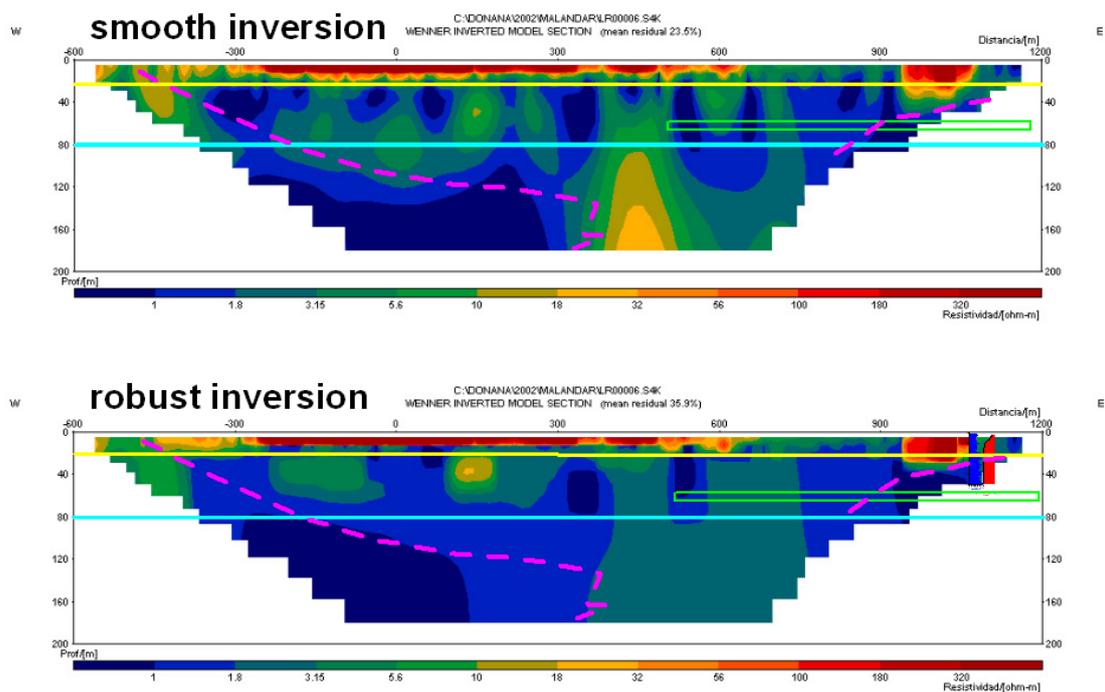


Fig. 346. Modelos geoelectricos del Perfil realizado en la zona del Cuartel del Malandar con inversión tipo "smooth" y "robust", e indicación de los horizontes litológicos identificados en 1999.

V RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente Proyecto de **REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA EXISTENTE EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS (DOÑANA)** se ha llevado a cabo con los objetivos de:

- Revisar la información geofísica existente que permita verificar la cartografía conocida como mapa de cotas del techo de las margas azules del Mioceno (Figura 3)¹, supuesta base impermeable del acuífero, a escala 1/100.000.
- En áreas restringidas, y en particular en la zona sur de la barra litoral, establecer una metodología geofísica (a escala 1/50.000), que permita ayudar a:
 - resolver problemas estratigráficos de definición del tránsito Mioceno - Pleistoceno – Holoceno
 - determinar la posición de la interfase agua dulce - agua salada.

La zona de estudio tiene una extensión de unos 3400 km² y se encuentra situada en la depresión del Guadalquivir. El sistema acuífero está constituido por materiales marinos del Mioceno-Plioceno y depósitos marinos, fluviales, eólicos, de estuario y marisma del Cuaternario. El conjunto de niveles detríticos permeables se comporta como un único acuífero libre, excepto en el sector bajo las marismas, donde funciona como semiconfinado.

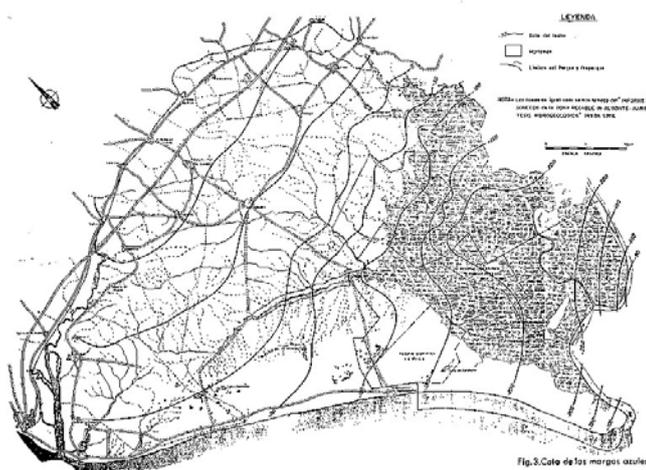


Fig. 3. Mapa de cotas del techo de las margas azules, según “Hidrogeología general del Parque Nacional de Doñana y su entorno”. IGME. 1992. [imagen 33Plano-6]

¹ Todas las Figuras indicadas en este capítulo son reproducciones, a veces ligeramente modificadas, de las presentadas en el capítulo correspondiente de la Memoria, habiendo sido incluidas en este texto para facilitar su observación.

El proyecto se ha llevado a cabo según las fases previstas:

- recopilación de la información geofísica existente
- preparación de los datos en forma digital
- análisis de la información en función de los objetivos
- ensayos de métodos geofísicos

En el **Capítulo I RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN** se hace una descripción del contenido de los 18 documentos recopilados, donde se recogen los trabajos de índole geofísica efectuados en el acuífero desde 1967 a 1995, últimos encontrados (en 2004). La documentación proviene fundamentalmente de la Oficina del IGME en Sevilla, Centro de Documentación del IGME y Universidad de Barcelona, habiendo supuesto en algunos casos el sacar a la luz importantes documentos de gran valor histórico y científico. En la síntesis efectuada se incluye la descripción de las bases geológicas con los que fueron interpretados en su día los datos geofísicos, ya que es en ese contexto como hay que entender las conclusiones entonces extraídas.

El **Proyecto Guadalquivir** de la FAO, probablemente uno de los mejores estudios de geofísica en hidrogeología realizados en España, fue el desencadenante del resto de las actuaciones, a las que hay que añadir trabajos muy puntuales orientados a estudios previos al abastecimiento de poblaciones, así como los debidos a exploración de hidrocarburos. En todos los estudios de índole hidrogeológica siempre ha participado el IGME. El objetivo del Proyecto Guadalquivir era identificar, mediante el uso de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), las zonas favorables para explotar económicamente los recursos de agua subterránea para riego.

En el informe del año 1968 **Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin** de PRAKLA se presentan los 895 SEV realizados, incluyendo de forma muy escueta una interpretación de los mismos. Ante las incertidumbres que presentaban los contrastes de resistividad de las formaciones se decidió utilizar la Resistencia Transversal T (producto de la potencia por la resistividad) para dar una mejor idea de la importancia de los paquetes resistivos (acuífero), utilizando además este parámetro como discriminador de la existencia de agua salada, aunque el criterio del valor límite a utilizar ha ido variando con los diferentes estudios. En este Informe se conservan todos los estadillos de medición en campo de los SEV.

En 1970 se realizó una reinterpretación conjunta de todos los SEV efectuados hasta esa fecha (Figura 15): **Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas**, apoyándose en 19 sondeos mecánicos que habían cortado el sustrato impermeable. Como resultado de dicha interpretación se prepararon cortes geoeléctricos de 10 perfiles, a escala 1/50.000, así como mapas en escala 1/100.000 de la profundidad y cota de la base del acuífero principal (Figura 17), espesor total de los acuíferos, profundidad y espesor de las capas de arcilla superficiales y límite entre agua dulce – agua salada en la zona de Marismas. Una novedad que se

introduce es considerar que el sustrato impermeable no es siempre las margas azules del Mioceno, sino que, en ocasiones, corresponde también a las arcillas arenosas sahelenses o villafranquienses (Plioceno superior).

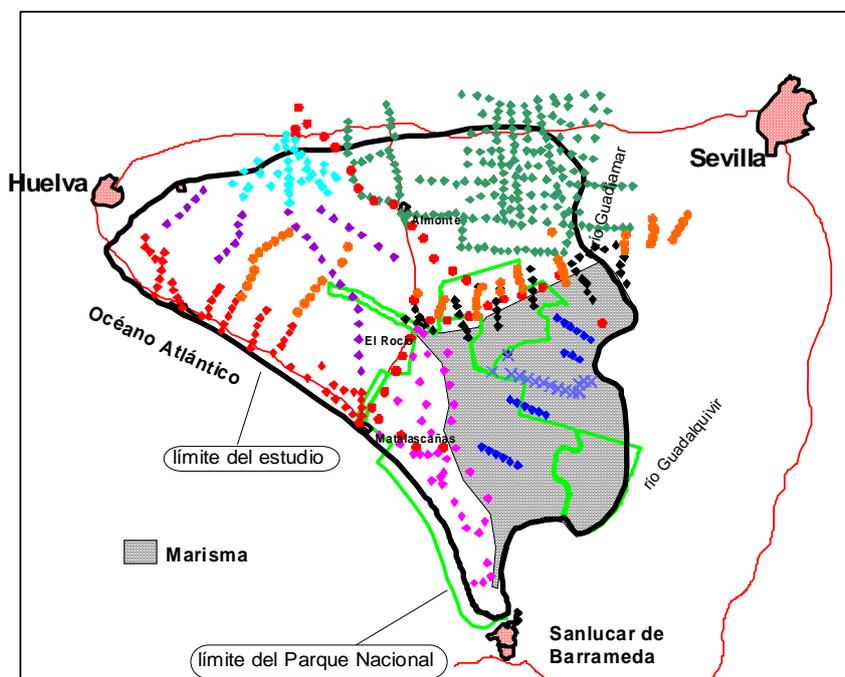


Fig. 15. Conjunto de SEV contemplados en el informe de 1970: L rombo rojo; Lerici verde oscuro; CD azul oscuro; P morado; CM naranja; Perfil 1 y Perfil 2 círculo rojo; MD rosa; MR negro; N azul claro; TS aspaspas azules.[ficheros de posición de SEV de los informes 40063, 35559, 40070, IGME 1970 S/R y Astier 1970 S/R]

Este documento puede por tanto considerarse la síntesis de todos los trabajos geoelectrónicos anteriores, y la base para los posteriores estudios, siendo su contenido de un gran interés hidrogeológico.

Otro de los pilares de la información preexistente es el documento **Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972**, que se refiere a 251 sondeos mecánicos efectuados (más de 26.000 m perforados). Se incluyen cortes geológicos de los sectores regables basados en las columnas de los sondeos, con indicación del nivel impermeable y presencia de arcillas. Sin embargo los mapas que se presentan de espesor total del acuífero y de la cota del fondo impermeable son una suavización de los dibujados en 1970, basados en los datos geoelectrónicos. Para la zona de marismas no pudo efectuarse estos mapas, por la dificultad que presenta para la medición de SEV la alta salinidad de las arcillas que recubren los acuíferos y la presencia, en determinadas zonas, de aguas muy cargadas en sales. Según esta cartografía el techo del sustrato impermeable presenta un suave buzamiento hacia el Sur, aunque en la mitad occidental, entre Palos y El Rocío, dicho buzamiento se divide en dos: uno hacia el océano y otro hacia el Sur-Este. En el borde de las marismas, al Sur del Rocío se observa un suave alzamiento de las margas, a manera de domo. La cota más baja (150 m b.n.m.) se sitúa en Torre de la Higuera.

Estos documentos son importantes para demostrar que el pretendido mapa del techo de las margas azules presentado en la Figura 3, de 1992, no tiene nada que ver con la cartografía geofísica.

De singular interés es el ***Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976.*** En este trabajo, con los datos proporcionados por 462 sondeos mecánicos se elaboró una nueva síntesis de los conocimientos adquiridos sobre la hidrogeología del acuífero y situación del frente salino en el acuífero cautivo de Marismas. Se presentan mapas de la zona regable, basados en las columnas de los sondeos mecánicos, de espesores saturados, cota del fondo impermeable y posición de la interfase agua dulce-agua salada. Se procedió además a la elaboración de un mapa del fondo impermeable para todo el acuífero, teniendo en cuenta otros sondeos mecánicos. Entre otros datos de interés para nuestro estudio actual, se proporcionan para todos los sondeos la cota del terreno, nivel estático, **cota del fondo impermeable**, techo del primer acuífero, disposición de las rejillas, transmisividad, coeficiente de pérdida de carga, recomendaciones de explotación (caudal, profundidad de bomba,...).

En 1982 se efectuó un trabajo de síntesis, ***Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME.***, en el que se recogen muy sucintamente los estudios realizados en el acuífero Almonte-Marismas, fundamentalmente por el IGME y el IRYDA, desde 1965, y olvidando, en nuestro criterio, parte de los documentos más importantes hasta entonces efectuados. Un resumen de este Informe se encuentra además publicado en los fascículos: ***Publicación IGME de la colección Informes "Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno". 1982 y 1992***, que es donde aparece el plano nº 6 COTA DE LAS MARGAS AZULES (uno de los objetivos del presente Proyecto de revisión) reproducido en la Figura 3, en el que consta que fue extraído del ***"Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica" IRYDA. 1976.***

Con posterioridad a las actividades del Proyecto Guadalquivir y derivadas, existen varios trabajos efectuados para captación, así como otros cuyo objetivo era revisar la posición de la interfase agua dulce- agua salada, como el efectuado en 1982 ***Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS.***, en el que se midieron nuevos SEV en la zona de Marismas, no observándose diferencias en la posición de la interfase respecto de la definida en 1969 con los valores de T. El último trabajo encontrado, efectuado en 1995 se refiere a un ***Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995.***, realizado en la zona nororiental del Parque Nacional de Doñana, sectores I y Marismas del Plan de Transformación Agraria. Se llevó a cabo una campaña de testificación geofísica de 31 sondeos, con registros de conductividad y temperatura de la columna de agua, y una campaña de muestreo de aguas subterráneas en un total de 34 puntos, para su posterior análisis físico-químico. Se concluye

que la posición de la interfase, cuyo avance sería debido a las extracciones, no se ha modificado desde los trabajos de 1983 del IGME-IRYDA.

El valle del Guadalquivir ha sido además objeto desde 1955 de numerosas campañas sísmicas y sondeos profundos efectuados para prospección de hidrocarburos, habiéndose recopilado aquellas líneas sísmicas y sondeos que no son confidenciales.

En el **Capítulo II PREPARACIÓN DE DATOS EN FORMA DIGITAL** se detallan los trabajos efectuados para convertir a formato digital la información de interés contenida en la documentación recopilada, a fin de facilitar su análisis. Se ha procedido a dos tipos de conversión de los documentos:

- Conversión de documentos en papel a **imágenes** mediante escáner
- Creación de **ficheros de datos**, mediante grabación por teclado a partir de listados, estadillos de campo, lectura de datos en mapas, digitalización de curvas, etc.

En total se han creado más de 749 nuevos ficheros digitales, sin contar las bases de datos de sondeos mecánicos. De estos ficheros 125 son documentos escaneados, 525 son ficheros con valores numéricos extraídos de documentos en papel (estadillos de SEV, mapas, etc.), 20 ficheros se han obtenido por digitalización, sobre mesa o pantalla, de determinadas líneas de los mapas en papel, y 79 ficheros se refieren a posicionamiento de líneas sísmicas. La información recogida consta de cortes geoelectrónicos, mapas de curvas de isoresistividad, mapas de posición de la línea de separación entre agua dulce y agua salada obtenidas en distintas épocas y por distintos métodos, mapas de profundidad y cota de la base del acuífero, mapas de espesor de acuíferos, testificaciones geofísicas, cortes geológicos por correlación de sondeos mecánicos, posición y medidas de campo de SEV, posición de líneas sísmicas y sondeos mecánicos, secciones sísmicas de reflexión, mapas de la interfase de agua dulce-salada, isolíneas de espesores saturados y cota de las margas azules, etc.

Con los datos de campo y posición de las 16 campañas de SEV revisadas se ha formado una base de datos específica con 498 SEV, que ha sido integrada en SIGEOF (Base de datos geofísicos del IGME). La Base de datos de sondeos mecánicos proviene de la fusión de 877 sondeos proporcionados por la Universidad de Barcelona y de 2394 sondeos de la base de puntos de agua del IGME, con 297 comunes a ambas y 799 sondeos con información de la columna litológica.

Toda esta información está sintetizada en el cuadro del apartado II-8, donde se indica el número de la Figura del presente Informe donde se utiliza cada fichero. El DVD adjunto a la Memoria del presente Informe contiene los Anexos Digitales II-a(DocuEscanDigita), II-b(BaseDatosSEV), II-c (BaseDatos Sondeos), con toda la información generada. También se facilitan la versión digital de las Figuras, a

fin de facilitar su mejor observación, dado el formato reducido en que aquí es presentado el material gráfico.

Las fases de recuperación y de preparación digital de la información han supuesto una labor muy superior a la inicialmente prevista, habiéndose llevado a cabo íntegramente con los medios personales y materiales del Área de Geofísica del IGME.

Una vez recopilada, sintetizada, asimilada y preparada la documentación existente, en el **Capítulo III ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN** se aborda su análisis en función de los objetivos propuestos: mapa de cotas del techo de las margas azules, caracterización geofísica de niveles estratigráficos, y posición de la interfase entre el agua dulce y el agua salada.

En primer lugar (**Capítulo III.1**) se efectúa la **Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules**, con el objetivo de conocer el origen y significado real del mapa publicado en 1982 con el nombre de “*Mapa del techo de las Margas azules*” (Figura 3). Para ello se analizó de forma sistemática todos los documentos que contienen información sobre la base impermeable del acuífero, efectuando un estudio crítico de los mismos y verificando, mediante superposición, la analogía con el mapa estudiado. El mapa de cotas del techo del sustrato impermeable de la zona Norte, presentado en el Informe *Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA. 1968*, es evidente que se refiere a las margas azules, aunque está basado en la interpretación de los SEV. Su comparación con el mapa del hipotético mismo contenido trazado en 1982 es la primera evidencia de que este último documento no parece corresponderse con el obtenido mediante información geofísica. Posteriormente, en 1970 (Informe *Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier.*), se traza un nuevo mapa, también basado en la interpretación de los SEV, de la cota de la base del acuífero principal (Figura 17), definiendo dicha base como la de la formación resistiva, y cuya naturaleza varía de norte a sur, refiriéndose a las margas azules sólo en su parte norte; su trazado se demuestra que tampoco coincide con el mapa de 1982. El mapa de 1970 es nuevamente presentado en el Informe de 1972 *Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO)*, pero con una suavización y desapareciendo la indicación de cambios de criterio en la asignación de qué capa es considerada como fondo impermeable (base del resistivo); aunque el autor del mapa asigna dicho sustrato en general a las margas azules tortonienses, advierte que la transición a las arenas sahelienses es progresiva y difícil de definir, aduciendo que las investigaciones realizadas llevaron a la conclusión de que las arenas muy arcillosas o las margas muy arenosas representan en realidad el fondo impermeable de la zona.

En 1976 (*Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA.*) se presenta un nuevo plano de cotas del fondo impermeable, pero solamente de la zona regable, basado en las columnas de 462 sondeos mecánicos, refiriendo como **muro del acuífero las series de margas arenosas con vetas de areniscas de grano fino y muy cementadas, con abundancia de fósiles entremezclados, que anteceden a las margas azules**

*propia*mente impermeables, y en las que se van transformando gradualmente al aumentar la profundidad. Se procedió además, utilizando la información de los datos de sondeos piezométricos realizados en el *Proyecto Guadalquivir* (denominados BG), así como los resultados de diversos sondeos realizados fuera de la zona regable, a una elaboración general de este mapa para todo el acuífero, *interpretándose las partes con pocos datos de la forma más probable para obtener una visión de conjunto*. En dicho mapa se indica, en una nota escrita a mano, que “se considera fondo impermeable la transición a margas plásticas (margas arenosas del Saheliense)”. La comparación de este documento con el mapa de 1982 pone de manifiesto (Figura 64) que son el mismo mapa, y que por lo tanto, el documento de referencia de 1982 ni ha sido obtenido a través de mediciones geofísicas, ni intenta reproducir la cota de las margas azules. Desconocemos por qué motivos en su traslación al documento realizado en 1982 recibió este nombre.

Con la finalidad de aclarar el alcance de este mapa se hemos llevado a cabo una serie de comprobaciones, verificando para cada sondeo utilizado en su confección cuál es la litología existente a la cota indicada en 1976 para el fondo impermeable, según la información proporcionada por la base de datos litológica preparada para el presente Proyecto. Solo en el 21% de los sondeos existen margas a dicha cota, lo que ratifica que el criterio que se siguió en 1976 fue mucho más generalista. Es decir, se adoptó un criterio subjetivo para identificar en las columnas de los sondeos el comienzo de un tramo menos permeable dentro del Saheliense, que no tiene porqué coincidir con una paquete de margas. Para ahondar en esta comprobación, se han identificado en la base de datos litológica las capas de margas existentes en cada sondeo, pudiendo concluirse que ni siquiera en la zona del área regable, con una densidad grande de sondeos mecánicos, es posible identificar una superficie con control litológico que responda al mapa trazado como base impermeable en 1976. Al considerar la extrapolación de esta superficie al resto del acuífero utilizando para ello sólo unos pocos sondeos, esta situación todavía empeora. No es por lo tanto de extrañar que sondeos actuales no hayan encontrado las margas azules, allí donde realmente nadie ha dicho que existieran.

En nuestra opinión, el mapa de cotas del techo del impermeable trazado en 1970 (ver apartado III - 1.2), utilizando una amplia cobertura de la fuente de información (mapa de SEV de la Figura 15), y con un criterio objetivo al considerar como impermeable las formaciones con resistividad inferior a 30 ohm.m, es de mayor rigor hidrogeológico que el mapa de 1982 que estamos analizando. El de 1970 considera además una variación en la naturaleza de la litología y unidad estratigráfica del fondo: pasa de ser margas azules en el norte, a arcillas arenosas del Saheliense y, más hacia el Sur, del Villafranquiense, delimitando las zonas mediante unos cambios de marcador claramente identificados (Figura 17).

Queda por lo tanto suficientemente puesto de manifiesto que en la historia del estudio hidrogeológico del acuífero de Doñana nunca se han considerado las margas azules como la única base impermeable del acuífero estudiado, ni se ha pretendido cartografiarlas.

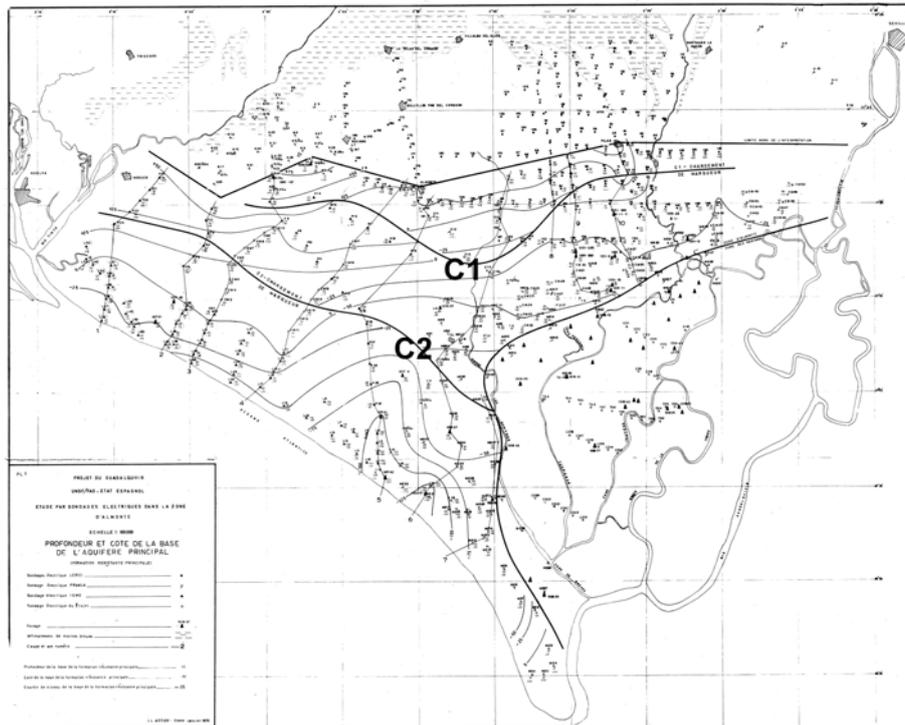


Fig. 17. Plano PL1 de interpretación efectuado en 1970: profundidad y cota de la base del acuífero principal, con indicación de los diferentes marcadores del sustrato impermeable. [archivo 26PL-1.tif]

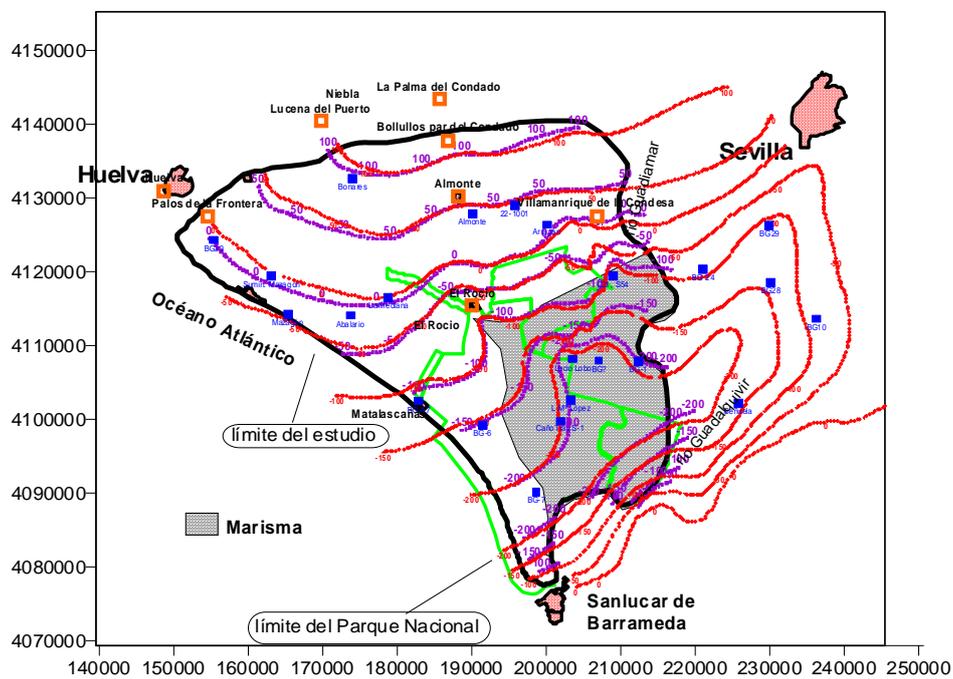


Fig. 64. Cotas del fondo impermeable extrapolado para todo el acuífero (en rojo [archivo 32PL41-curvas.xls]) efectuado en 1976, y mapa de cotas de las margas azules según su publicación en 1982 (en morado [33PLANO6Curvas.xls]). Se indica además la posición de los sondeos mecánicos utilizados en 1976 para extrapolar la información a partir de la zona regable [archivo 32sondeos TECHO_IMPERMEABLE.xls].

A pesar de lo anterior, parece aceptado que estas margas, localizadas dentro del nivel Tortoniense, del Mioceno Superior, suponen la base del resto de las formaciones detríticas susceptibles de almacenar agua, por lo que, a fin de tratar de esclarecer cuál es realmente el mapa de cotas de las margas azules se ha utilizado la información geofísica de sísmica de reflexión disponible para efectuar su trazado, lo que se expone en **capítulo III.2 Trazado del mapa de las margas azules mediante sísmica de reflexión**. En este capítulo se procede previamente a hacer una síntesis de los conocimientos estratigráficos de los que se dispone actualmente (2004), para establecer su equivalencia con la terminología usada en los años en que se efectuaron los sondeos y líneas sísmicas de prospección de hidrocarburos. A pesar de las indeterminaciones existentes, se ha concluido que el horizonte correspondiente a las margas azules es el denominado Grupo Bética. Identificado este horizonte en los sondeos mecánicos se puede comprobar que, excepto en la parte norte, la profundidad a la que se encuentran las margas azules no permite su exploración mediante los SEV disponibles, pudiendo ser, no obstante un posible objetivo con sísmica de reflexión.

Se ha llevado a cabo un análisis de facies sísmicas de las secciones disponibles, estableciendo cinco tramos, que pueden interpretarse como los propios de una secuencia sedimentaria de regresión, pasando de ambientes marinos profundos (margas azules) a un ambiente continental (unidad eólica), con una etapa intermedia de naturaleza deltaica, lo que ha facilitado, junto con los sondeos mecánicos, la identificación y seguimiento del reflector adecuado. Solamente se ha podido disponer de 20 secciones sísmicas, lo que supone unos 422 km de líneas, habiéndose efectuado los cálculos en unos 1200 puntos de tiro. Puesto que tanto los mapas de posición como las secciones están en soporte de papel, se ha diseñado una metodología específica para este trabajo, descrita sucintamente en la Memoria del presente Informe. El picado de los reflectores se ha hecho mediante digitalización en pantalla, leyendo el tiempo cada 10 puntos de tiro. La conversión de los tiempos en profundidad se ha llevado a cabo por cálculo a partir de los resultados del análisis de velocidad, apoyado en los datos de los sondeos mecánicos próximos a las líneas sísmicas, estimándose que los valores finales se han obtenido con una precisión de ± 20 m.

De esta forma, se ha obtenido un mapa de las isobatas del techo del nivel impermeable margas azules (Figura 92). Algunas de las conclusiones que pueden obtenerse de este mapa es que la profundidad de las margas azules es superior a la supuesta por estudios anteriores al presente, si bien, la fauna encontrada ya inclinaba a suponer una profundidad de media a grande; según el nuevo mapa la cuenca marina sobre la cual se sedimentaron las margas azules tuvo más de 1000 m de profundidad. La morfología de la cuenca tiene forma triangular de vértices las localidades de Sevilla, Huelva y Sanlúcar de Barrameda, aunque para asegurarlo es necesario la aportación de más datos. Es una superficie cóncava, pudiendo admitirse, en principio, que se debe a una trasgresión marina diferencial en la zona. La tendencia de la curvatura de las isobatas hacia el mar parece indicar que durante el Mioceno Superior la invasión marina, causante de la deposición de las margas azules, tuvo una morfología de golfo. La fuerte pendiente inicial desde su afloramiento hasta el centro de la cuenca puede revelar características de talud oceánico. De esta forma, se produciría un aumento de

la potencia de los sedimentos en el centro de la cuenca. Según la morfología del techo de la capa, los límites de la invasión marina se establecerían en la zona septentrional a su afloramiento.

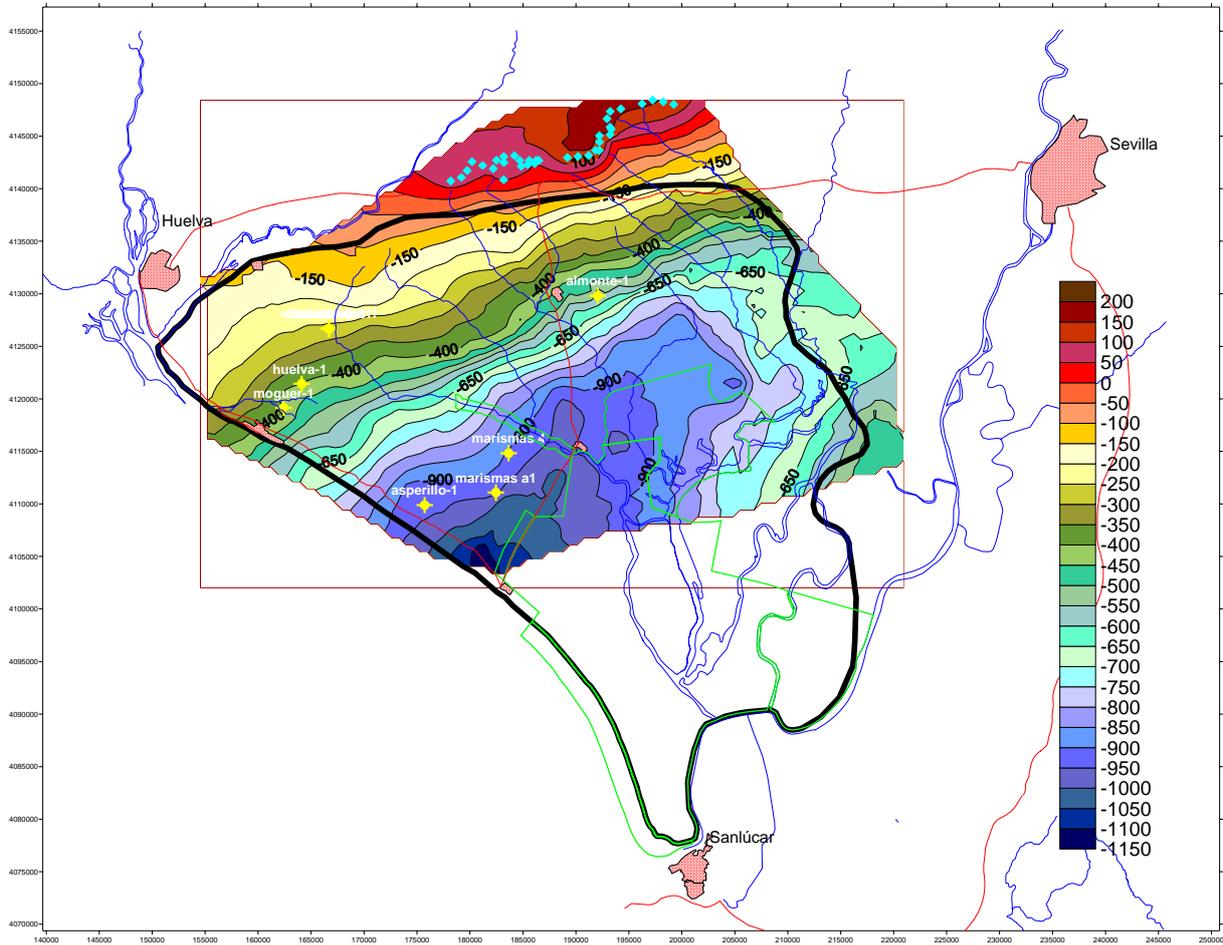


Fig. 92. Mapa de isobatas del techo de las margas azules. Se indica la situación del afloramiento de las margas azules en el Norte y sondeos profundos.

En el **capítulo III.3** se efectúa una **Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970**, teniendo en cuenta las mejores herramientas de cálculo actualmente disponibles y la evolución del conocimiento geológico, con los objetivos de validar la interpretación hecha en su día y estudiar la viabilidad de establecer relaciones entre fácies geoelectricas y unidades estratigráficas.

El resultado final que los SEV aportaron al conocimiento del acuífero está sintetizado en forma de cortes geoelectricos y diversos mapas derivados (profundidad de la base del acuífero, espesor total de formaciones acuíferas, límites entre agua dulce y salada, porosidad-resistividad del acuífero principal, etc.), que se presentan en los documentos recopilados. En este capítulo se revisan previamente los criterios utilizados en su día para trazar estos mapas. Las interpretaciones efectuadas originalmente se hicieron con un punto de vista exclusivamente hidrogeológico: asignación de una resistividad a una litología, y más simplificada, el establecimiento del carácter más o menos permeable de la formación según su resistividad. Algunos de los principales

criterios que fueron utilizados en las asignaciones litología-resistividad y en la interpretación consisten en tener en cuenta que la diferenciación geoelectrica entre sustrato y arenas presenta con frecuencia algunas incertidumbres, lo que motivó la preferencia en el uso del indicador T (resistencia transversal). En la zona de Marismas otro condicionante a tener en cuenta, y es que el relleno plio-cuaternario existente bajo las arcillas saladas o bajo las dunas, está formado por una alternancia de gravas, arenas y arcilla, cuyo contenido en agua es tanto dulce como salada; mientras que las arenas con agua dulce son resistivas, las arcillas y las arenas con agua salada son muy conductoras, lo que imposibilita aun más su diferenciación respecto de una base conductora formada por margas. Por otra parte, las resistividades de los primeros metros del terreno son tan variables (desde 0.5 ohm.m para arcillas saladas hasta miles de ohm.m para arenas secas), que pueden influir mucho en los resultados de los SEV. Se tomaron como impermeables las formaciones con resistividad inferior a 30 ohm.m y permeables las que tienen más de 80 ohm.m. El sustrato impermeable no se supone siempre que son las margas azules del Mioceno, sino que, en ocasiones, corresponde también a las arcillas arenosas sahelenses o villafranquienses (Plioceno superior).

Actualmente (2004) se dispone de mucha más información, sobre todo geológica, procedente de los numerosos sondeos mecánicos efectuados, por lo que se ha procedido a intentar una comparación sistemática de las columnas litológicas con los cortes geoelectricos cuando SEV y sondeo mecánico están en una razonable proximidad. El resultado general de esta comparación y reinterpretación de una muestra de 16 SEV es que en algunas ocasiones las descripciones de las columnas de los sondeos son excesivamente simples (p.e. arenas para todo el sondeo), no pudiendo establecerse una correspondencia con las variaciones de resistividad; en otras ocasiones, se produce la situación contraria: columnas con una descripción de litología muy variada se corresponden a cortes geoelectricos monótonos. La identificación de las margas que suponen la base impermeable del acuífero tampoco presenta siempre buena correlación entre su localización por resistividad y los cortes geológicos. Cabe concluir que, desde el punto de vista de la metodología utilizada, la interpretación realizada en 1970 usando métodos gráficos precisa, en general, de muy pocos retoques para mejorar el ajuste a los datos de campo, respecto de una modelización efectuada con las herramientas informatizadas actuales. El mejor ajuste numérico no significa mejor ajuste geológico. Respecto a la mejora que la información de los sondeos mecánicos ahora disponibles puede aportar a la interpretación, es evidente que permite mejorar los ajustes entre datos de campo y modelo, aunque con resultados no siempre concluyentes, ya que no es infrecuente que la información de las columnas no sea representativa de la distribución de las resistividades en su conjunto. Por lo tanto se puede aceptar que la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales efectuados en 1970, y por lo tanto los mapas de ellos derivados, es conforme desde el punto de vista numérico con la que podría efectuarse con los medios actuales de tratamiento de datos, y además es conforme con la mayor información geológica actualmente disponible. La disposición geométrica que manifiestan los materiales de mayor permeabilidad (resistividad superior a 30 ohm.m) y acuitardos, así como su evolución espacial, puede considerarse correcta en términos generales, sin olvidar la enorme dificultad de establecer correlaciones espaciales en este entorno, ni aun disponiendo de la

descripción de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos. La indicación de la existencia de cambio de “marcador” o capa conductora, asimilada al fondo impermeable del acuífero, debe entenderse en términos geofísicos, es decir, detectan la última capa conductora visible en los SEV, ya que debido al buzamiento de las capas hacia el Sur llega un momento en que la profundidad de la situada más hacia el norte, deja de manifestarse en las curvas de campo AB/2-resistividad.

El segundo objetivo de esta revisión de los SEV, es analizar si existe alguna relación entre los ambientes sedimentarios y la distribución de la resistividad; es decir, si existe alguna equivalencia entre facies sedimentarias y facies geoelectricas. Tras efectuar una síntesis de los conocimientos geológicos, incluyendo las actuales ideas sobre este entorno sedimentario, y tratando de reconciliar las aparentes divergencias existentes entre las diferentes fuentes, se han analizado 10 de los cortes geoelectricos efectuados en 1970, sobre los que se ha integrado toda la información disponible hasta la fecha (2004), superponiendo la división de facies litoestratigráficas. Aunque sería demasiado aventurado establecer una relación entre la resistividad y las distintas facies, si que es posible establecer algunas relaciones, cuya disposición para toda el área se muestra en la Figura 142. Los cortes muestran una secuencia sedimentaria de evolución progradante de facies hacia el sur. La *facies de cuenca* aparece en la parte norte del área y evoluciona (vertical y horizontalmente) a *facies lagoon* y *delta-playa* para acabar con la *facies barrera*, situada siempre en el sur, aflorante y que supone el último estadio evolutivo de la zona. Intercalados aparecen niveles de gravas, en algunos casos potentes, que corresponden a antiguas terrazas del río Guadalquivir.

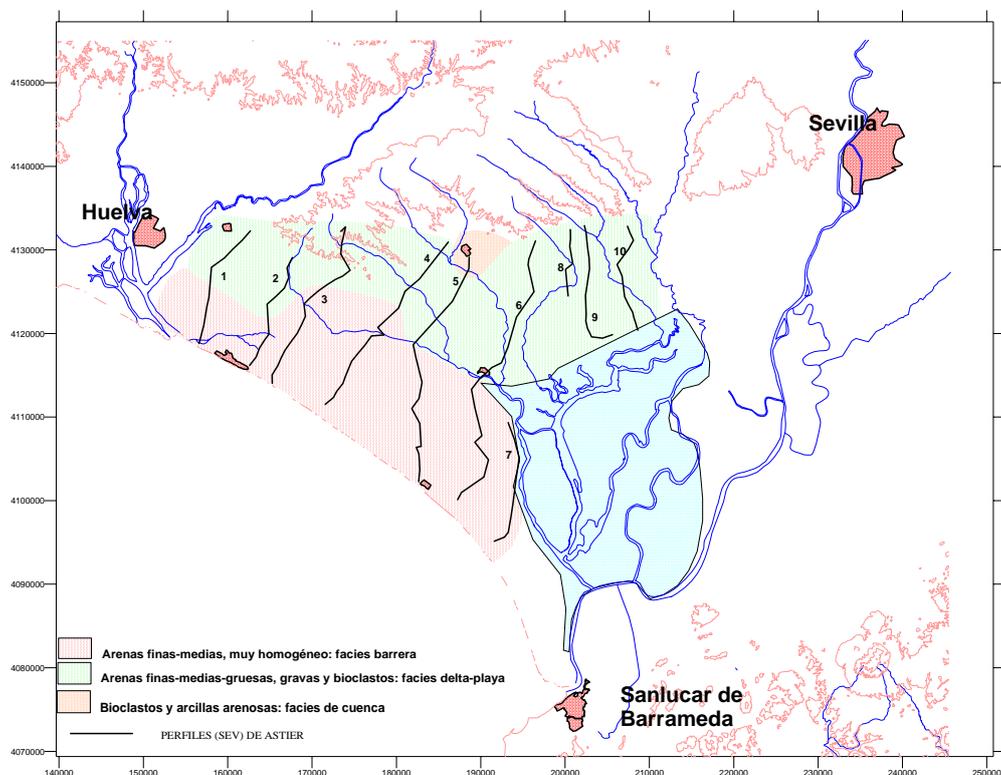


Fig. 142. Disposición de facies en superficie, deducida de la interpretación efectuada en los cortes geoelectricos.

En las facies de barrera se obtienen las mayores resistividades, entre 100-400 ohm.m. Las facies aluviales, con resistividades entre 200-300 ohm.m, no puede ser individualizada sin datos de sondeos mecánicos. La facies delta-playa, con resistividad entre 100-200 ohm.m, en principio podrían confundirse con las facies barrera, pero la posición estratigráfica y el rango de resistividades ligeramente menor ha permitido separar estas facies, sobre todo en los cortes donde existen sondeos mecánicos que lo confirmen. La facies de lagoon se caracteriza por resistividades entre 0-50 ohm.m, identificable en la zona de Marisma, pero en el resto de la zona estas resistividades corresponderían a niveles muy conductores de margas o arcillas. Finalmente, la facies de cuenca, con resistividad en torno a 100 ohm.m, se deduce por estratigrafía y relación de imbricación entre facies.

Por lo tanto se llega a la conclusión de que se puede obtener una cierta relación facies sedimentarias/resistividad, aún teniendo en cuenta que existe un solapamiento importante entre ellas. Sin embargo, sin otra información de apoyo las resistividades no discriminan entre un tipo y otro de facies.

El **capítulo III.4** se dedica a la **Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce-agua salada**. De acuerdo con el conocimiento actual (2006), el agua salada existente bajo las Marismas tiene su origen en el proceso de colmatación del estuario del Guadalquivir, durante el cual la zona estaba ocupada por aguas marinas, que durante el relleno quedaron ocluidas en las formaciones geológicas. Posteriormente, por el empuje de las aguas de recarga procedentes de la zona libre del acuífero, el agua salada fue desplazada hacia el Sur-Este desde su posición original. Por lo tanto, se piensa que existen dos zonas de calidad de agua bien diferenciadas, separadas por un frente salino de alto gradiente en las Marismas. La localización de la posición de esta interfase ha formado parte de los estudios realizados en el acuífero desde sus comienzos. Las técnicas utilizadas han ido variando, así como la extensión de los trabajos, que han pasado de contemplar la totalidad de las Marismas a concentrarse en su parte Norte, que fue la declarada como zona regable y donde se efectuaron la casi totalidad de los sondeos mecánicos. La técnica básica utilizada para efectuar una discriminación del tipo de agua de formación a partir de las medidas de resistividad aparente deducidas de los SEV fue la resistencia transversal T (producto de resistividad por potencia de la capa), como parámetro mejor discriminador de las zonas con mayor interés como acuífero: zonas con valor de resistividad superior a 30 ohm.m y de potencia superior a 20 m, en líneas generales. La existencia de agua salada en la formación puede dar lugar a resistividades muy bajas en potencias medias, dando bajos valores de T, por lo que se utilizó un límite del valor de este parámetro T para indicar la presencia de agua salada. Los valores de partida de las resistividades utilizadas han ido variando, debido a trabajos de revisión y reinterpretación de los SEV. Así mismo, los criterios utilizados para marcar un límite al valor de T también se han ido modificando. En síntesis, estos criterios han sido:

- En 1968, se utiliza $T=1000$ ohm.m.m (equivalente a una concentración de 2 g/l bajo el supuesto de un 20% de porosidad y 20 m de potencia), trazando la línea de interfase apoyada sólo por mediciones de SEV en los extremos y utilizando la información intermedia de dos sondeos BG.

- La reinterpretación de los mismos SEV en esas fechas, utilizando más sondeos BG para apoyar el trazado de la interfase hace utilizar el valor $T=5000$ ohm.m.m. La ejecución de nuevos SEV (campaña TS) en la Marisma obliga a modificar de nuevo su trazado.
- Nuevos SEV efectuados en 1970 (campaña CD) sobre la Marisma, y la variación del criterio a $T=3000$ ohm.m.m (suponiendo una equivalencia con 1.5 g/l), modifica el trazado de la interfase.
- En el mismo año, otro estudio con los SEV reinterpretados, establece un criterio más fidedigno de equivalencias entre la T y la concentración, utilizando análisis de agua en sondeos, marcando ahora la línea $T=3000$ ohm.m.m para 1.5 g/l en posición algo distinta de la anterior.
- Posteriormente, en 1982 se efectúan nuevos SEV en la Marisma para verificar la posición de la línea de interfase, utilizando esta vez como criterio la resistividad directamente, poniendo el límite en 4 ohm.m, que se hace equivalente a 1.5 g/l. El resultado es el mismo que el conseguido en 1970 (Figura 160)

A escala regional, el trazado de estas líneas presenta una cierta fiabilidad, aunque en ningún momento puede hablarse del trazado de una interfase, que por su naturaleza es una superficie bi o tridimensional, con una zona de transición de situaciones intermedias entre las de concentración nula de sales, hasta la zona de agua saturada. Aparte de otras determinaciones basadas en estimaciones realizadas con los sondeo de la zona norte en 1976, el trabajo más completo para situar la interfase fue el realizado en 1995, utilizando las concentraciones calculadas mediante testificación geofísica de la conductividad del agua en sondeos mecánicos. La situación parece ser la de una interfase bastante brusca (en cada sondeo el agua pasa en muy poco intervalo de profundidad de ser dulce a tener una determinada concentración, que mantiene hasta el final del sondeo), aunque presenta una variación espacial: el agua va siendo más salada de forma paulatina de Oeste hacia el Este. Esto es lo que reflejan las isolíneas de igual conductividad representadas en la Figura 162.

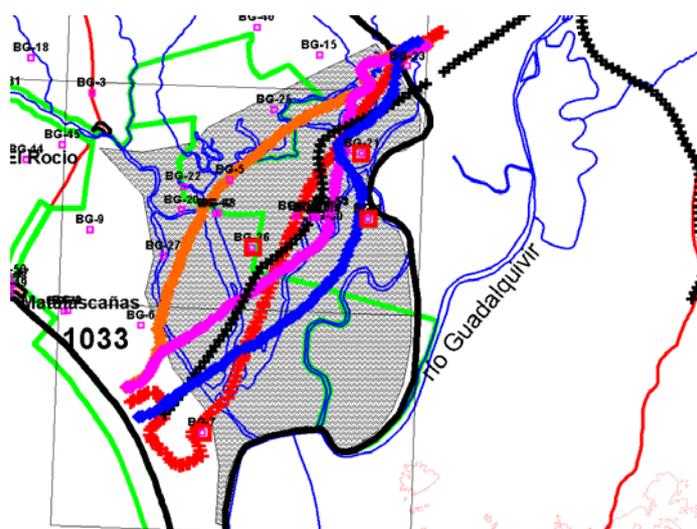


Fig. 160. Diferentes trazados de una línea que separa la zona de agua dulce y de agua salada. 1968, $T=1000$: rojo; 1967, $T=5000$: naranja y rosa; 1970, $T=3000$: negra; 1970, $T=3000$, azul. En 1982 se confirma la posición de la línea negra mediante nuevos SEV. [ficheros rojo: línea1000Tde22.blm; naranja: línea5000Tde23.blm; rosa: línea5000Tde23b.blm; negro: 25FIGURA-1.xls; azul: línea2glde26.blm]

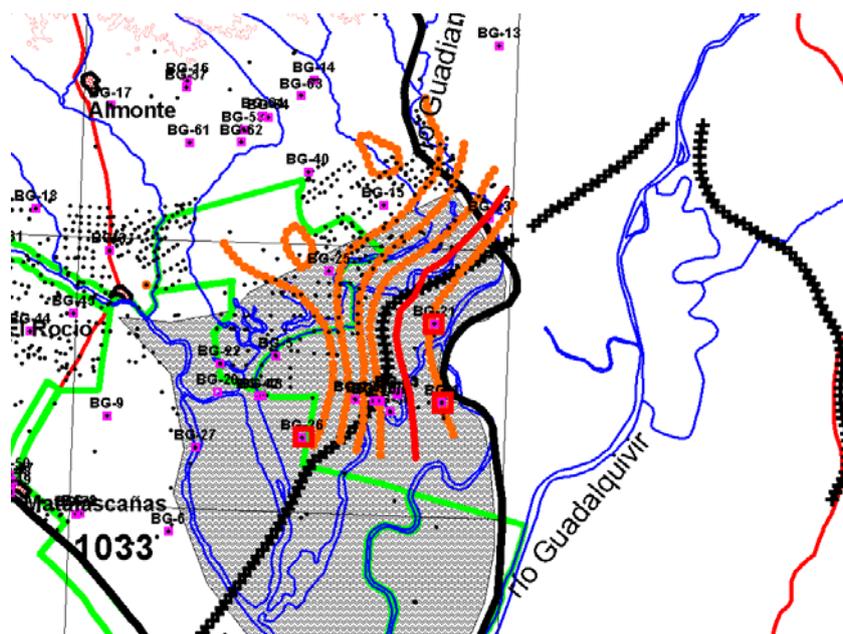


Fig. 162. Superficie de la interfase entre agua dulce y agua salada indicada mediante líneas que marcan situaciones de diferente concentración. Los valores son de 0.5-1-1.5-3-20 mS/cm, de Oeste a Este. En rojo se ha marcado la curva de 5 mS/cm. En negro la línea de interfase según valores de T en 1970 para T=3000. [Fichero 46Fig-5.xls]

En el fondo, este trazado ratifica el significado de las líneas trazadas utilizando el valor de la resistencia transversal T, así como la no variación de la situación de la interfase desde 1968. Por lo tanto, en nuestra opinión todos estos trabajos son de utilidad para establecer criterios de zonas con agua dulce y con agua salada, teniendo los métodos eléctricos la ventaja de que no presentan las dificultades de los estudios realizados con sondeos mecánicos, donde la posición de los filtros y las mezclas de aguas hace difícil el obtener observaciones de fiabilidad en cuanto al origen de la salinidad y su extrapolación al agua de la formación. Debe tenerse no obstante en cuenta que es posible que en la zona de Marismas exista más de una superficie de interfase, dada la naturaleza de la salificación de estas capas.

La **REALIZACIÓN DE NUEVOS ENSAYOS DE METODOLOGÍA GEOFÍSICA** se trata en el **capítulo IV**. Tras la revisión de la información geofísica previa y su utilización para mejorar el conocimiento de la situación del techo del Mioceno e interfase agua dulce-agua salada, estos nuevos trabajos están encaminados a definir la mejor metodología geofísica para resolver problemas estratigráficos de definición del tránsito Mioceno - Pleistoceno – Holoceno (determinar el tránsito entre el relleno pleistoceno-holoceno de la marisma (gravas, arenas, limos y arcillas), los limos margosos del techo del Mioceno y las arenas de la barra de costa), así como para situar la posición de la interfase agua dulce - agua salada en la zona suroriental de la barra litoral.

Tanto las situaciones geométricas planteadas, como la pobre diferenciación petrofísica existente entre las litologías contempladas, hacen necesario efectuar una serie de pruebas de diversos métodos geofísicos en áreas donde las diferentes temáticas propuestas se encuentren bien

conocidas y controladas, disponiendo de sondeos mecánicos con las necesarias testificaciones geofísicas y con una descripción geológica y estratigráfica detallada, a fin de efectuar una correcta parametrización de las medidas tomadas desde la superficie. Con esta finalidad se seleccionaron las zonas indicadas en la Figura 163, además de 44 sondeos mecánicos en los que efectuar testificaciones geofísicas.

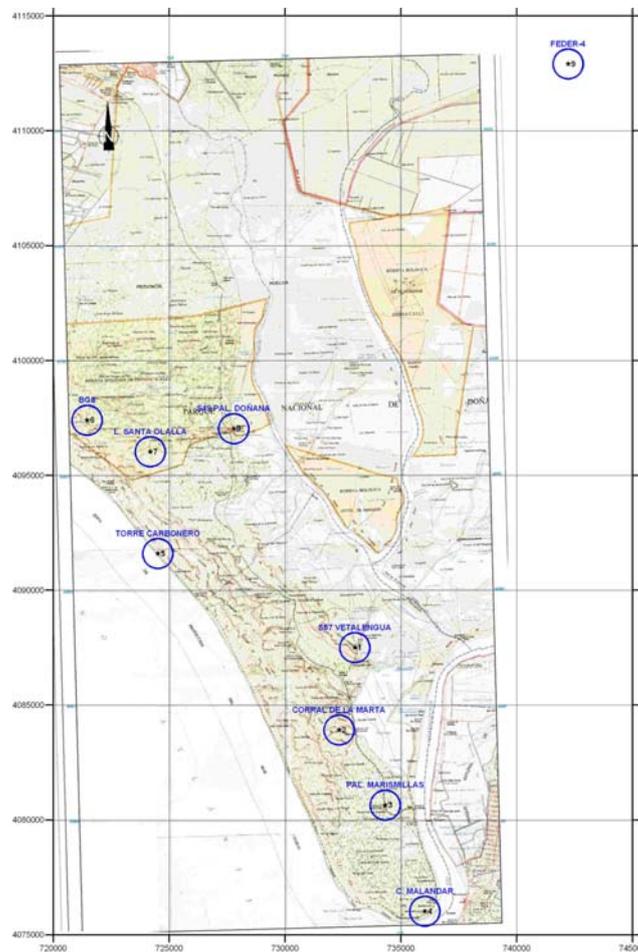


Fig. 163. Selección de zonas para realización de ensayos metodológicos de geofísica. Coordenadas UTM29

Los trabajos finalmente realizados pueden dividirse en:

- ensayos previos de métodos eléctricos (2001)
- medición de perfiles por sísmica de reflexión (2002-2003)
- trabajos complementarios de Perfiles Eléctricos (2001,2002)
- testificación geofísica de sondeos (2002, 2005-2006)

El siguiente cuadro resume los trabajos de geofísica de superficie efectuados (se indica en amarillo los efectuados mediante asistencia técnica):

TRABAJOS DE GEOFÍSICA DE SUPERFICIE

| | Vetalengua | Marismillas | Malandar | BG8 | Palacio Doñana | Zona Norte(M-6-5) | Santa Olalla |
|---------------------|------------------------|-------------|----------|--------|----------------|-------------------|--------------|
| Sísmica (2002) | | 3 km | | 1 km | 0,95 km | 2,8 km | |
| down hole (2002) | 190 m | | | | 190 m | 197 m | |
| SEDT (2001) | 3 | 18 | | | 3 | | 1 |
| P. eléctrico (2001) | 1,3 km | | | | | | |
| SEV (2001) | 3 | 9 | | 1 | 3 | | 1 |
| P. eléctrico (2002) | 1.5 (2001) + 2.7 km | 3 km | 1.5 km | 1.2 km | 1.5 + 5 km | 3.3 km | |

El apartado IV.2 recoge las campañas de **Testificación geofísica de sondeos mecánicos**. De un total de 2428 sondeos mecánicos existentes en la zona de trabajo del presente Proyecto (datos referidos a finales del año 2003), sólo se tiene conocimiento de algún tipo de registro de testificación geofísica en unos 145 sondeos (del orden de un 6% de los perforados), estando 64 de ellos testificados varias veces a lo largo de los años 1968-2003. Estas testificaciones fueron realizadas con diversos objetivos dentro de los Proyectos mencionados en el capítulo I (Recopilación de la información Geofísica) y actuaciones posteriores, presentándose en el apartado IV.2.1 un análisis de aquellos que han podido ser recuperados. Las testificaciones actuales se han llevado a cabo en dos campañas, 2002 y 2005-2006 (Figura 198).

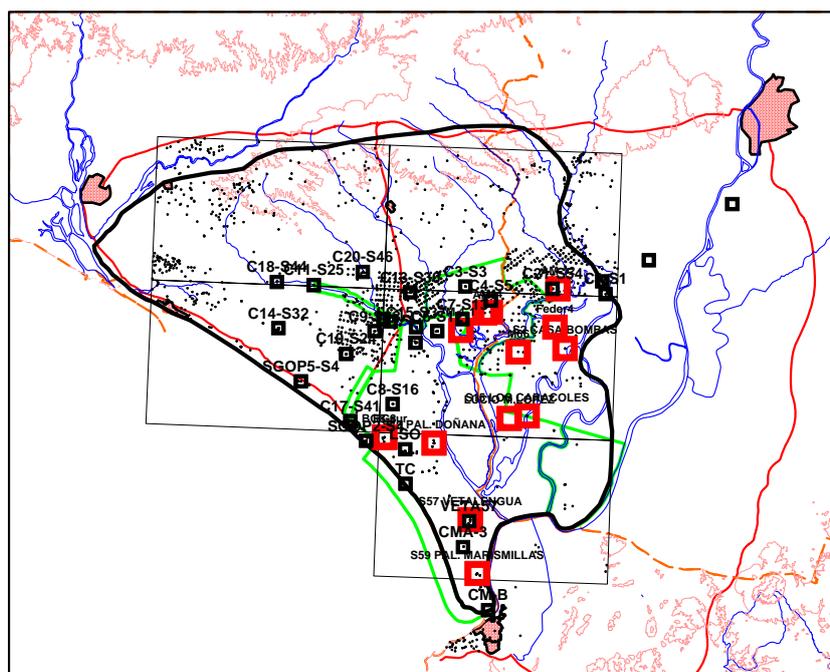


Fig. 198. Situación de los sondeos finalmente testificados en la campaña de 2005 [en negro]. Sondeos testificados en la campaña de 2002[en rojo]

En 2002 se registraron 14 sondeos (1685 m) con los parámetros Gamma Natural, temperatura y conductividad del agua. En 6 de ellos (1088 m con tubería de PVC), se utilizaron además métodos más innovadores, y se midió la resistividad de la formación por inducción, y en 5 sondeos (948 m) se registró la radiación gamma espectral, esperando así obtener parámetros que permitan diferenciar entre los tipos de limos y arcillas contenidos en las diversas unidades estratigráficas. Tres sondeos fueron además utilizados para la medición de velocidad de ondas sísmicas por el sistema de down hole, a fin de disponer de datos reales para la interpretación de los trabajos de sísmica de reflexión.

De la información analizada de estas testificaciones, se deduce que las variaciones litológicas pueden ser identificadas por variaciones de resistividad de la formación siempre que el agua contenida en ésta tenga valores de conductividad inferiores a 15 mS/cm; para valores superiores, la salinidad es el factor que controla los registros de resistividad de las rocas, no permitiendo establecer diferenciaciones litológicas, puestas en evidencia por los registros de gamma natural, pero de imposible deducción en medidas desde superficie. Los registros de gamma espectral permiten además conocer la diferente composición de los tramos arcillosos y/o arenosos, lo que unido al establecimiento de una secuencia estratigráfica permitirá determinar criterios sedimentológicos basados en datos geofísicos.

En la campaña de testificación de 2005-2006 se midieron 30 sondeos con unos 2630 m testificados, teniendo en cuenta para su selección los nuevos planteamientos que otros grupos han venido realizando sobre la geología del acuífero de Doñana, estableciendo redefiniciones de la estratigrafía de la zona y revelando a la estratigrafía secuencial como la única herramienta útil para resolver parte de los problemas planteados. De esta forma, en la nueva campaña de testificación geofísica se han utilizado como parámetros fundamentales a medir la resistividad de la formación y la radiación gamma natural. La selección de los sondeos se ha hecho buscando la mejor adaptación a perfiles geológicos ya interpretados según la nueva idea de secuencia estratigráfica, a fin de evaluar la contribución que la testificación geofísica puede hacer a este análisis. Por una parte, estos registros podrán utilizarse para una mejor definición de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos, según se ha establecido en la campaña de 2002; por otra, los registros de gamma natural se han interpretado en términos de análisis secuencial: identificación de secuencias granocrecientes y granodecrescentes.

En la Memoria del presente informe se incluyen todos los registros efectuados, junto con la columna litológica previamente conocida y corregida según las testificaciones, haciéndose comentarios sobre las nuevas mediciones e interpretación de los registros para la mayoría de ellos. Los efectuados en las áreas especiales seleccionadas son tratados de forma integral junto con el resto de los trabajos geofísicos de superficie efectuados en las mismas zonas, en el apartado IV.5.

En el **apartado IV.3** se recogen los **Ensayos previos por métodos eléctricos** realizados para verificar la existencia de suficiente contraste de resistividad eléctrica entre los niveles detríticos y los materiales arcillosos en que se intercalan aquellos, con independencia de la unidad geológica a la que pertenezcan, y comprobar el contraste en las zonas de transición entre agua dulce y agua salada. Para ello, y a fin de disponer de medidas paramétricas en lugares de columna litológica conocida, se seleccionaron las zonas de los sondeos Vetalengua, Marismillas, Santa Olalla, Palacio de Doñana y BG8, con las mediciones indicadas para 2001 en la tabla anterior.

Como resultado de estos trabajos se concluye que los métodos utilizados de SEDT y SEV no ofrecen la resolución suficiente para dar respuesta a los problemas planteados. Aunque los SEDT suponen una mejor alternativa que los SEV para trabajar en el entorno que Doñana por no ser necesario el extendimiento de grandes longitudes de cable, se ha encontrado el problema de la existencia de bajos valores de resistividad, lo que por un lado dificulta la profundidad de penetración deseable, y por otro da lugar a curvas resistividad aparente-tiempo de ambigua interpretación. En cuanto a la Tomografía o Perfiles eléctricos, se considera necesario ensayar nuevas variantes de los dispositivos de medida, tratando principalmente de incrementar la profundidad de investigación hasta el orden de 200 metros si es posible y sin perder resolución lateral de forma excesiva. Los modelos geoelectricos conseguidos no son en muchas ocasiones capaces de informar adecuadamente de las alternancias litológicas realmente existentes, ya que los contrastes de resistividad esperados entre diferentes formaciones no se producen, como consecuencia de su contenido en agua de diferente salinidad, o por ser de potencias inferiores a la resolución del método.

Es previsible que con la utilización del método sísmico puedan eliminarse las ambigüedades y limitaciones de los métodos geoelectricos, ya que los contrastes de impedancia acústica no se ven afectados (o al menos lo son de forma despreciable) por los cambios de salinidad del agua. En consecuencia se efectuaron en 2002 varios **Perfiles de sísmica de reflexión**, que se presentan en el **apartado IV.4**, en los mismos lugares donde se efectuaron mediciones geoelectricas: área de Palacio de Marismillas, Palacio de Doñana, sondeo BG-8, añadiendo la zona de Casa Bombas, en el norte. Como apoyo para la interpretación de estas secciones, se planificó igualmente la medición de velocidad de las ondas sísmicas a través de ensayos denominados de "down hole" en los sondeos mecánicos de Marismillas (S-59), Santa Olalla, Palacio de Doñana (S-49) y Feder-4, de los que obtiene que las arcillas presentan velocidad en el rango 1500-1800 m/s, las arenas 2000-2600 m/s, las gravas entre 2300-2700 m/s y las margas 2200 m/s. Estos valores son suficientes para dar lugar a coeficientes de reflexión importantes, dependiendo la resolución real alcanzable de la potencia de las capas y de su secuencia.

Por requerimiento de las autoridades del Parque Nacional de Doñana, el estudio sísmico ha constado de una primera fase para ensayar diversas fuentes de energía para la generación de las señales sísmicas, con el fin de seleccionar la más adecuada desde el punto de vista de impacto ambiental. Se efectuaron finalmente diversas pruebas con maza de 8 kg, sistema VIBSIST-50 fabricado por la

Sociedad VIBROMETRIC OY, basado en la técnica SIST (Swept Impact Seismic Technique), y Explosivo pirotécnico. El análisis de los ensayos se presenta en detalle en la Memoria del presente Informe. Desde el punto de vista ambiental tanto la fuente de vibración como los cartuchos recibieron la conformidad para su empleo, demostrándose que las cargas utilizadas no producían ni ruido ni proyecciones que pudieran perturbar los hábitos y apacible vida de la fauna del Parque. La señal conseguida es mejor con el empleo de cartuchos, por lo que se decidió utilizar dicha fuente en el registro de los perfiles programados. Los perfiles se midieron con un dispositivo de 24 canales, espaciado de 6 metros entre geófonos y cobertura 12. En total se han registrado 9078 m de perfil. Tras el proceso de datos (efectuado en 2003), se han analizado las secciones sísmicas, caracterizando las principales facies presentes y marcando los reflectores que las singularizan. La profundidad de investigación está en torno a los 400 m, frente a los 100-150 m conseguidos con las mediciones geoelectricas.

Además de los trabajos de Geofísica anteriormente expuestos, se han efectuado en 2002 otros **Trabajos complementarios en las diferentes zonas** seleccionadas, utilizando la instrumentación disponible en el IGME. Estos trabajos se presentan en el **apartado IV.V**, junto con la **Integración de resultados** de todos los ensayos realizados e información disponible de cada lugar. Como consecuencia de las experiencias anteriores, en esta fase sólo se ha empleado el método de Perfiles Eléctricos, que permite obtener una información con mayor continuidad y resolución espacial, salvo algunos SEV en la zona del sondeo BG8, midiéndose cerca de 17 km de perfiles en las zonas de Vetalegua, Palacio de Marismillas, Malandar, BG8, Palacio de Doñana y en la zona norte. Los perfiles eléctricos se efectuaron en coincidencia con las líneas de Sísmica de reflexión referidas en el apartado IV-4. Para cada zona se efectúa en la Memoria un detenido análisis de toda la información disponible, sintetizada (en parte) en un esquema interpretativo sobre la base de cada Perfil Eléctrico.

En la **zona de Marismillas** se trata de estudiar el contacto de las aguas salobres (detectadas en el sondeo mecánico) y el agua dulce en las dunas de arena situadas al sur-oeste. Se dispone de Testificación, perfil de 18 SEDT, 9 SEV, Perfil continuo de resistividad y Perfil de sísmica de reflexión. En la *testificación del sondeo S-59* se observa que existe un aumento de salinidad con la profundidad, llegando a 110 mS/cm, lo que justifica los bajos valores de resistividad registrados con la sonda de inducción, en constante disminución con la profundidad. Por comparación con testificaciones de 1997-99, el sondeo ha ido colmatándose de agua muy salada. Sin embargo, el hecho de que un pequeño nivel de margas a los 78 m quede reflejado en el registro de resistividad de la formación, induce a pensar que el agua de 100 mS/cm que existe dentro de la columna del sondeo no está presente en toda la formación litológica, ya que entonces hubiera imposibilitado detectar este contraste de resistividad.

La interpretación de *los SEDT* indica una continuidad de las unidades geoelectricas, deduciéndose que toda la zona contiene agua salinizada; sin embargo la inversión de los datos medidos tiene una

importante ambigüedad, por lo que sin apoyo del sondeo mecánico S-59 los resultados no serían coherentes. La *campana de SEV* estuvo condicionada por el suficiente espacio para la apertura de los dispositivos de electrodos y los pequeños potenciales medidos. Todos los SEV, con menor penetración (20-50 m) que los SEDT (hasta 150 m), indican una disminución constante de la resistividad con la profundidad, conforme con las indicaciones de la testificación. Los SEV efectuados en el Oeste pueden interpretarse como indicativos de presencia de agua más dulce en las arcillas, lo que no es apreciable en el perfil de SEDT.

En el *perfil continuo de resistividad* (Figura 281) se detecta una cobertera resistiva, que coincide con la medida por los SEV, por los SEDT y por la testificación. Por debajo se sitúa una capa muy conductora, también registrada en los SEDT y SEV. Finalmente, por debajo de los 100 m de profundidad se detecta una capa más resistiva, no vista en los SEV, ni en los SEDT, ni en el registro de resistividad, y que puede considerarse como un falso resultado de la inversión, no siendo la sección válida por debajo de unos 120 m.

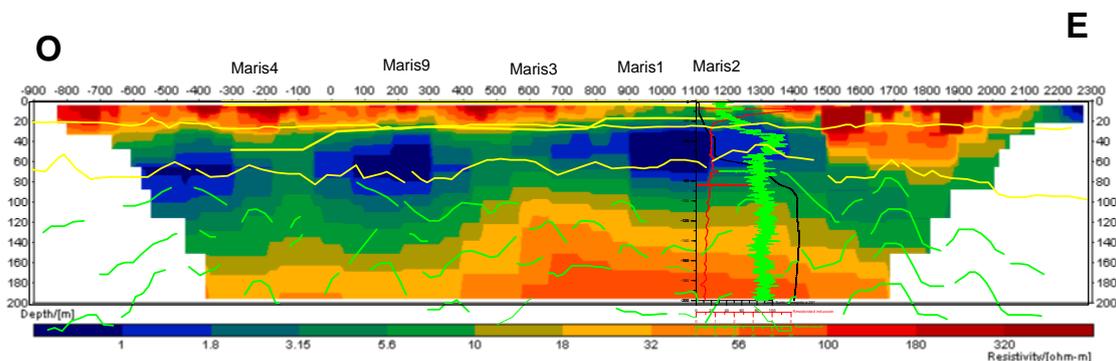


Fig. 281 (parcial). Superposición de la interpretación de los SEV próximos, testificación del sondeo S-59m y de los reflectores sísmicos a la sección geoelectrica.

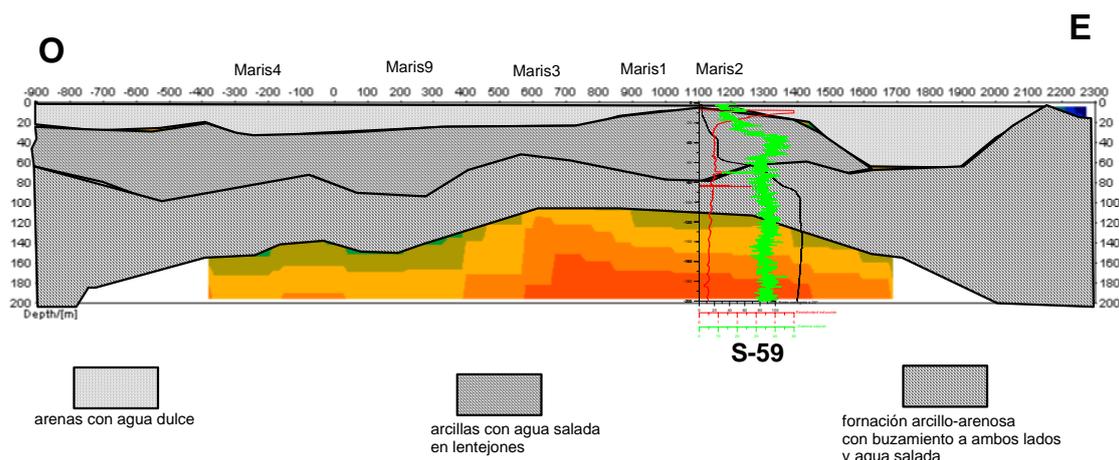


Fig. 282. Esquema de Interpretación geológica del perfil de Palacio de las Marismillas.

La superposición de los reflectores interpretados en la sección sísmica, permite apreciar una franca correspondencia de facies sísmicas y eléctricas. El primer reflector marca la base del tramo inicial

resistivo (>20 ohm.m), que según la columna del sondeo se trata de arenas. El segundo reflector marca la base de un primer tramo arcilloso, de menos de 2 ohm.m, reconocido por la testificación gamma natural. En el extremo oriental, este reflector marca el paso del resistivo de más de 200 ohm.m a un tramo más conductor, en total coincidencia con la sección geoeléctrica. El segundo tramo de reflectores (“verdes” en la Figura 281) se sitúa en la zona de terrenos con mayor resistividad, que según la testificación tienen menor arcillosidad. En la Figura 282 se representa un esquema geológico-conceptual de este perfil, donde se ha dejado el aludido tramo resistivo de existencia poco probable. Este esquema es la respuesta al interrogante planteado en esta zona sobre la superficie el contacto de las aguas salobres (detectadas en el sondeo mecánico Marismillas S-59) y las dunas de arena situadas al sur-oeste, donde el agua es dulce, procedente de la recarga de lluvia.

En conclusión, las arcillas de la zona del Palacio de Marismillas están fuertemente salinizadas, siendo más superficiales en la zona del sondeo mecánico. Este modelo viene confirmado por las interpretaciones de los SEV, SEDT, el perfil eléctrico continuo realizado y la sección sísmica. Metodológicamente, cabe concluir que los perfiles eléctricos son una buena opción para este tipo de investigaciones, siendo la geometría aportada por la sísmica complementaria de la información de las resistividades de las formaciones.

En la **Zona de Palacio de Doñana** quiere estudiarse la transición de los materiales Pleistocenos-Holocenos a la Marisma, disponiéndose de Testificación del sondeo S-49, 3 SEDT, 3 SEV, Perfil continuo de resistividad y Perfil de sísmica de reflexión. La litología predominante del sondeo S-49 son las arenas, con algunas intercalaciones de arcilla y gravas. La resistividad de las arenas es mayor (100-300 ohm.m) por encima de los 60 m, pasando posteriormente a tener un gran contenido en arcilla. Se detectan claramente los paquetes de gravas por el aumento de la resistividad, con independencia de que el agua contenida sea dulce o salada. Es decir, el factor que controla fundamentalmente la resistividad de la formación en este sondeo no es, aparentemente, la salinidad del agua (que con un máximo de 0.7 mS/cm correspondería a aguas con menos de 0.5 g/l de ClNa), sino el contenido en arcillas. En función de los registros de conductividad medidos ahora y en 1996-2000 se deduce que el agua dulce que penetra por la rejilla (paquete de gravas a los 150-158 m) parece estar diluyendo el agua salada (contenida en niveles de arenas y arcillas más someros) que penetra en la columna del sondeo entre los 12 y los 45 m, lo que supondría un flujo ascendente.

Los *SEDT* efectuados manifiestan una resistividad decreciente con la profundidad; en el situado en la marisma, tras un nivel más conductor en los primeros 20 m se observa niveles más resistivos que los encontrados por debajo de la zona de arenas y dunas. Los *SEV*, que presentan una buena correlación con la información dada por la testificación (aunque con valores absolutos de resistividad distintos), alcanzando una penetración no mayor de unos 70 m. El *SEV* realizado dentro de la marisma presenta un tramo conductor superficial que no se observa en los restantes. En todos los casos resulta difícil la correlación entre la interpretación obtenida con los *SEDT* y los *SEV*. En

definitiva podemos decir que la zona de arenas y dunas en esta área posee un carácter resistivo heterogéneo, sin que sea factible correlacionar medidas aisladas. Por esta razón se realizó un *perfil eléctrico* (Figura 293). Existe una buena correspondencia de valores y cambios de resistividad de la testificación y del perfil eléctrico, siendo así mismo buena la correlación con el resultado de los SEV, aunque el perfil permite apreciar el carácter más heterogéneo que realmente existe, con la presencia de grandes lentejones resistivos con cierta continuidad a lo largo del perfil. El paso a la marisma se produce en forma de cuña, introduciéndose el resistivo por debajo de la marisma de manera suave y gradual.

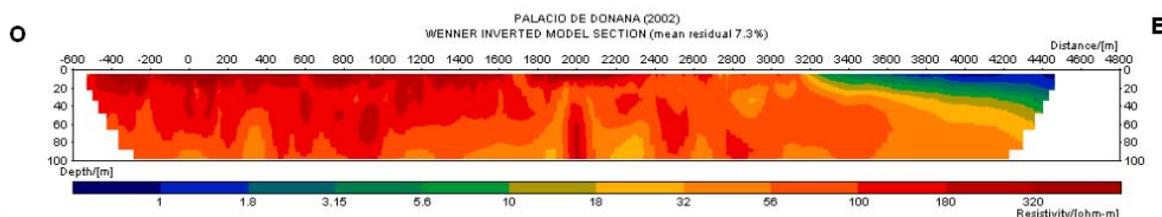


Fig. 293. Perfil geoelectrico de 5 km medido en la zona de Palacio de Doñana en 2002, formado por la union de los tres segmentos de la Figura 292.

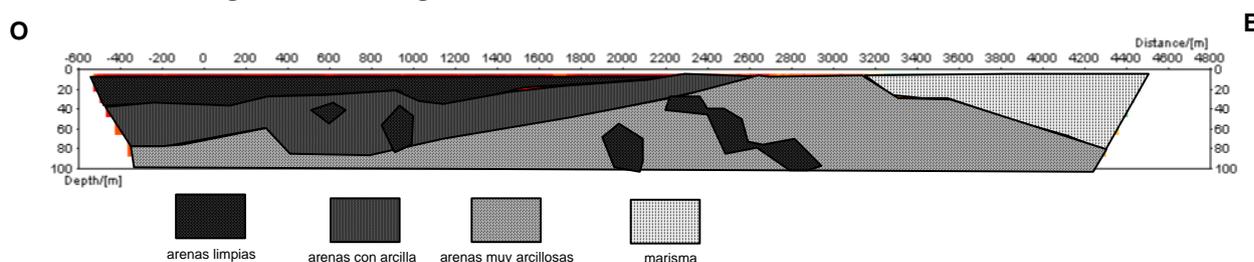


Fig. 295. Esquema de Interpretación geológica del perfil de Palacio de Doñana.

El perfil sísmico sólo ocupa la parte central del perfil eléctrico. Aunque la información sísmica alcanza mucha mayor profundidad (sobre los 400 m frente a los 100 m de la eléctrica), la primera zona de reflectores coincide con las estructuras aisladas de mayor resistividad que por debajo de los 60 m aparecen en la sección geoelectrica; a mayor profundidad, los reflectores buzan hacia el Oeste y pueden corresponderse con la formación del Grupo Andalucía (“margas azules”).

En la Figura 295 se representa un esquema general de acuerdo con la interpretación de todas las mediciones efectuadas, y que da respuesta al planteamiento de selección de esta zona para verificación de la posibilidad de utilizar métodos geofísicos para diferenciar el tránsito de la zona de dunas a la de Marisma.

En conclusión, en esta zona la información proporcionada por el método de perfiles eléctricos es la que mayor información proporciona, al menos hasta los 100 m de profundidad. Los cuerpos de mayor resistividad se corresponden con arenas-gravas, detectándose de forma muy clara el cambio de resistividad al pasar a los materiales que forman la zona de marismas. Es notable la diferencia de

buzamientos generales aparentes: hacia el Oeste en la zona de parque y hacia el Este en la de marismas.

En la zona de **Vetalengua** el objetivo es ensayar la posibilidad de delimitar mediante geofísica de superficie la profundidad y forma de la interfase de las aguas salobres bajo la marisma y manto eólico, así como el contacto dunas-marisma. Los trabajos realizados son testificación del sondeo S-57, 3 SEV , 3 SEDT , 1 Perfil Eléctrico paralelo a los SEDT y dos Perfiles Eléctricos adentrándose más en la marisma.

La litología predominante del sondeo son arcillas, permitiendo la *testificación* identificar un mayor número de intercalaciones de arenas y gravas que las inicialmente conocidas. La conductividad del fluido indica la existencia de aguas muy saladas en toda la columna, habiendo sufrido este sondeo un proceso de salinización análogo al del sondeo S-49 (P. Doñana) o S-59 (Marismillas), ya que en el año 1997 el agua era dulce hasta los 140 m. Es evidente la influencia de la salinidad del agua en esta zona: mientras que el paquete de gravas y arenas situado entre los 70 m y los 100 m se identifica claramente tanto en el registro de gamma natural como en el de resistividad, los situados a mayor profundidad sólo son detectados por gamma natural, sin presentar contraste de resistividad con las arcillas.

La distribución de resistividad de los SEV efectuados en la marisma es totalmente consistente con la testificación de resistividad de la formación. En los SEV efectuados sobre las dunas no pudo establecerse buenos contactos de los electrodos por la gran resistividad de las arenas secas. Los SEDT efectuados en la entrada de la marisma presentan una secuencia monótona de resistividad decreciente, en la que la intercalación de cualquier otra capa de mayor resistividad en la inversión de los datos resulta posible, pero no forzosamente justificada, no siendo tampoco fiable la profundidad de investigación dada en la inversión. En conjunto la interpretación obtenida por los SEV y los SEDT se parece cualitativamente, pero con diferencias importantes en los valores de profundidad y espesor de las capas. Este hecho se debe a la ambigüedad existente en la interpretación de estos datos aislados. En la sección de resistividad obtenida mediante un *Perfil Eléctrico* junto a los SEDT destaca la mejor capacidad del PE para diferenciar fiablemente y sin las ambigüedades de los SEDT niveles que representan muy pequeño contraste de resistividad en un medio marcadamente conductor. Esta mayor posibilidad de investigación que ofrecen los perfiles eléctricos ha motivado la ejecución de nuevos perfiles, esta vez más próximas al sondeo mecánico. La comparación de la testificación del sondeo S-57 con la sección geoelectrica muestra una secuencia de resistividades coincidente en ambos documentos, aunque la sección evidencia la rápida variación lateral existente, por lo que los datos del sondeo son difícilmente extrapolables a una geometría con continuidad subhorizontal. La porción occidental del nuevo perfil medido en 2001 (Figura 306 mod) está sobre las dunas y muestra un carácter resistivo en superficie, con una brusca transición al entrar en la marisma, a diferencia de lo obtenido en la zona de Palacio de Doñana (Figura 293). Un nuevo perfil, medido en 2002, que

comienza un poco más hacia el interior de la zona de dunas y se prolonga mucho más hacia el interior de la marisma (Figura 306 mod.) se ha medido con varios tipos de dispositivo. La diferencia de los resultados puede sintetizarse en la mayor fiabilidad de la inversión que ha proporcionado el dispositivo Wenner. Sin embargo entre los perfiles Wenner medidos en 2001 y en 2002 se aprecian importantes diferencias, que deben estar fundamentalmente motivadas por el diferente contexto geológico de su trazado y/o condiciones de contacto de los electrodos. En ambos perfiles se observa un paso a marisma neto y verticalizado, pero una vez dentro de la marisma en el medido en 2002 no se observa la anomalía resistiva del perfil de 2001, sino una zona ligeramente más resistiva y que va ganando en potencia a medida que se adentra en la marisma (situación inversa al perfil en la zona del Palacio de Doñana). Teniendo en cuenta los objetivos de los trabajos realizados en esta zona, el contacto dunas-marisma queda claramente identificado por su diferencia de resistividad; sin embargo, la apreciación del límite del agua dulce- agua salada no es viable, ya que no es posible diferenciar si la variación de resistividad se debe a la salinidad del agua de formación o a un cambio de litología, siendo esto último muy probable, a la vista de los resultados obtenidos con mediciones bastante próximas entre sí: es decir, se trata de una situación realmente tridimensional, en donde la extrapolación de homogeneidad de capas a unos pocos centenares de metros del sondeo no resulta ni posible ni fiable.

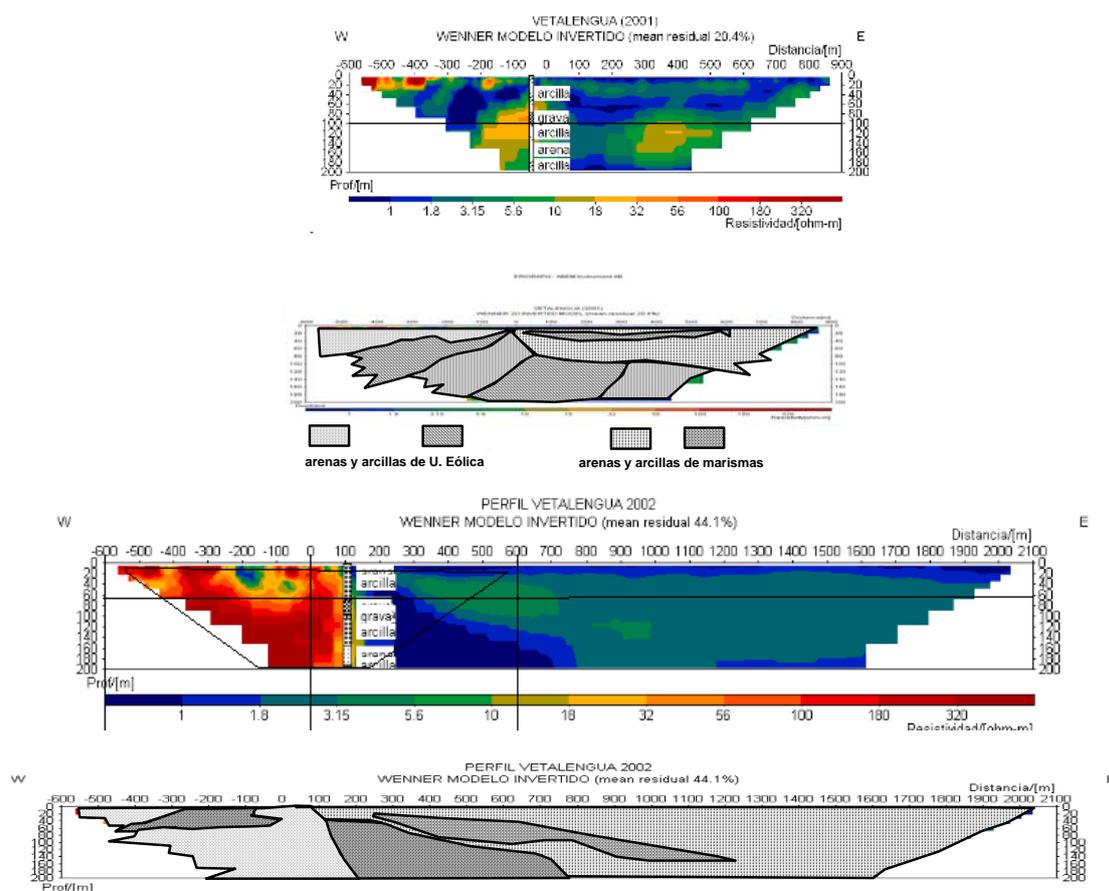


Fig. 306mod. Comparación de los perfiles eléctricos obtenidos en la zona de Vetalengua: parte superior perfil Wenner medido en 2001. Parte inferior: perfil medido en 2002 con dispositivos Wenner, y eEsquemas de interpretación geológica. Las formaciones asignadas a “arcillas”, por su menor resistividad, pudieran también en algún caso tratarse de arenas con agua de formación más salada.

Las condiciones de medición de estos perfiles (dificultad de buenos contactos eléctricos, gran heterogeneidad de resistividades, etc.), puede ser la causa de gran parte de las fuertes anomalías puntuales, sobre todo las superficiales, que presentan las secciones geoelectricas. No obstante, aunque el ruido puede afectar de una forma local a la interpretación, no distorsiona tanto las tendencias generales, por lo que es aceptable la interpretación general aquí expuesta. Con este criterio se ha realizado la interpretación cualitativa esquemática expresada en la Figura 306 mod.

La **zona** seleccionada en el área regable del **norte del Parque** tiene especial interés porque en ella se sitúan numerosos sondeos mecánicos que pueden servir de apoyo a los trabajos geofísicos encaminados a la determinación de la interfase entre agua dulce y agua salada. Como se recoge en detalle en el apartado III-4, desde los estudios iniciales del acuífero de Marismas en 1969, se han llevado a cabo hasta ahora diversas determinaciones mediante Geofísica de la situación de la interfase agua dulce - agua salada. La metodología empleada en cada caso fue diferente: el valor de la resistencia transversal; el empleo de la resistividad aparente; la correlación de los mencionados parámetros geoelectricos con análisis químicos de agua; y finalmente la testificación de la conductividad del agua en sondeos. De cualquier manera, parece que ninguna de estas medidas y teorías construidas acerca de la interfase es todavía lo bastante buena para explicar las observaciones realizadas en los últimos trabajos de investigación. Una de las explicaciones a esta situación puede provenir de la falta real de información en muchos sectores del acuífero, donde la interfase se ha situado mediante datos extrapolados de observaciones bastante alejadas. Otra razón es que una línea separando puntos con diferentes valores de cualquier parámetro nunca puede ser considerada representativa de un fenómeno bi-tridimensional. La geometría compleja del acuífero dentro de las Marismas puede contribuir de manera importante a la dificultad de una correcta delimitación de la interfase, que en realidad puede tratarse de múltiples interfaces.

La zona escogida es donde se realizaron los últimos trabajos de importancia para el estudio de la interfase en 1995, que representa las isocías de conductividad obtenidas a partir de la testificación geofísica de 31 sondeos mecánicos y de los resultados de 34 análisis químicos. Para su verificación se ha utilizado un Perfil Eléctrico, un perfil de sismica de reflexión paralelo al perfil eléctrico, y los sondeos testificados en esta zona (S2, Feder4, M-6-6, AM4, M-1-1 y AM-12).

Asumiendo que la conductividad de la columna de agua en el sondeo es un reflejo de la salinidad en el agua de la formación, en la Figura 319 se representa la comparación entre el trazado de isocías de conductividad efectuado en 1995 (considerando la línea de 1 mS/cm como el límite entre agua dulce y agua salada) y el resultado de la nueva campaña de testificación efectuada en 2005 en el presente Proyecto. La conductividad medida en los sondeos AM-12, Feder-4 y S-2 indica que la línea de 20 mS/cm está muy modificada respecto de su posición en 1995, siendo especialmente notable la profundidad a la que se encuentra el agua salada en los diferentes sondeos. Otra modificación, aun

más notable, es la debida a los valores encontrados en los sondeos AM-3 y M-1-1, que situados en 1995 dentro de la zona con valores inferiores a 0.5 mS/cm, tienen actualmente valores de 12 mS/cm y 2 mS/cm respectivamente, lo que obligaría a introducir una fuerte modificación sobre la situación indicada en 1995, corroborando nuestra hipótesis de que no puede hablarse de una sola interfase, sino de un conjunto de zonas, que presenta cada una de ellas su propia interfase.

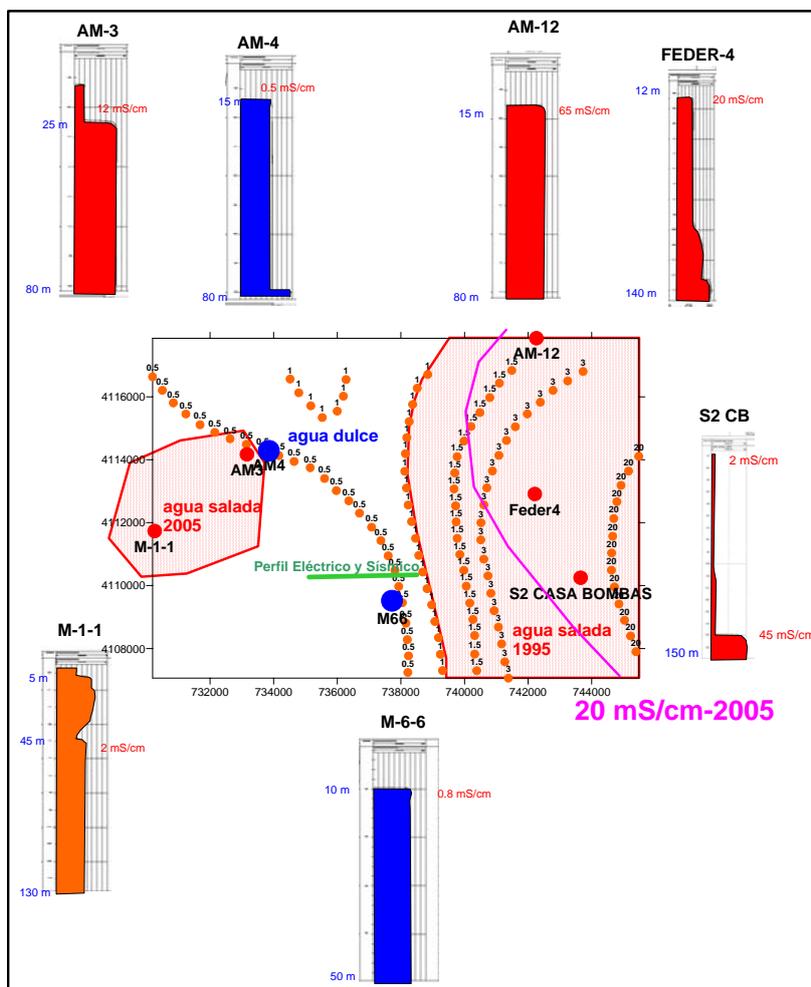


Fig. 319. Comparación de la distribución de la interfase agua dulce-agua salada obtenida en 1995 (indicada por las líneas de puntos color naranja con valor de conductividad en mS/cm) y la resultante de la nueva testificación efectuada en el presente trabajo. Para cada sondeo considerado se incluye un esquema de su testificación de conductividad del agua.

Para la interpretación de los perfiles eléctricos y sísmico se han utilizado los cortes geológicos efectuados en 1976 con una clasificación en términos de permeabilidad, y posteriormente reinterpretados en términos de estratigrafía secuencial, con clasificación litoestratigráfica: Unidad Deltaica, Unidad Aluvial, Unidad de las Marismas y Unidad Eólica. En la Memoria se efectúa además un detallado análisis de la información suministrada por la testificación de los sondeos, siendo notable la presencia de un primer tramo muy arcilloso, no recogido en ninguno de los perfiles geológicos anteriores.

La distribución de resistividad presenta buena correlación con la testificación del sondeo M-6-6, sin que aparezca visible la presencia de zonas afectadas por agua salada. La traslación de información del perfil geológico 7 a la sección geoelectrica (Figura 323) permite apreciar que el contacto entre la capa de limos-arcillas de la formación Marismas con la capa de arenas de la formación deltaica no se manifiesta geoelectricamente. Las terrazas de gravas-arenas deben ser las responsables del aumento de resistividad. Tampoco es posible diferenciar por su resistividad y potencia los limos dentro de las arenas. En la sección geoelectrica, que no ha profundizado hasta llegar a las margas azules, se detectan varios cambios laterales de resistividad de no fácil explicación, sin evidencias de que exista agua salada.

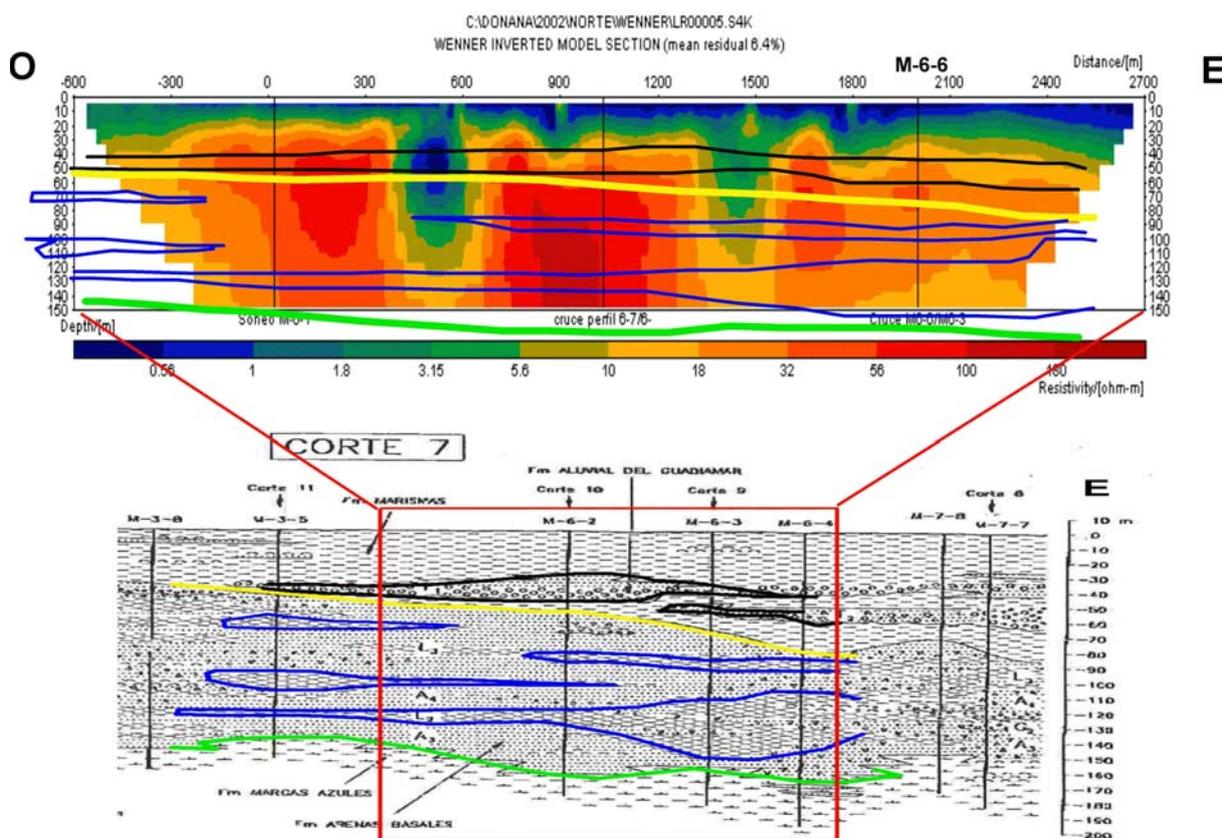


Fig. 323. Traslación de los principales contactos litológicos del perfil 7 (parte inferior de la Figura) a la sección geoelectrica.

El primer reflector de la sección sísmica, sobre los 50 m de profundidad (Figura 325 mod.), por comparación con el perfil 7 indica la base de la primera capa de arcillas o unidad de Marismas; sobre los 150 m de profundidad se ha marcado un segundo reflector continuo, que se corresponde con la base de las arenas de la Unidad Deltaica. Sin embargo, por debajo de los 150 m la sección sísmica presenta una secuencia potente de reflectores de amplia amplitud y continuidad, que según el análisis de facies sísmica efectuado en el presente Proyecto debe tratarse de la unidad deltaica, y no a las “margas azules”, como indica el perfil 7.

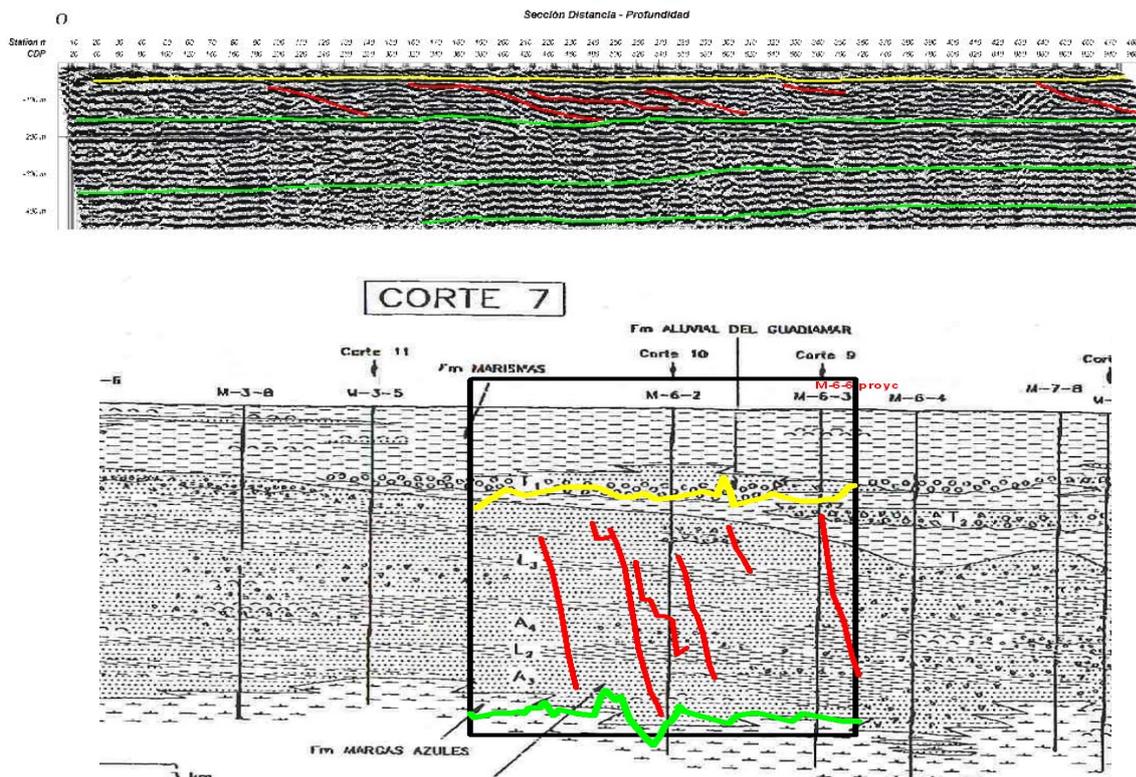


Fig. 325 mod. Parte superior: línea sísmica con los reflectores indicativos de cambios de facies sísmica. Parte inferior: traslación de los reflectores sísmicos al corte geológico.

Un esquema interpretativo de la sección se presenta en la Figura 324.

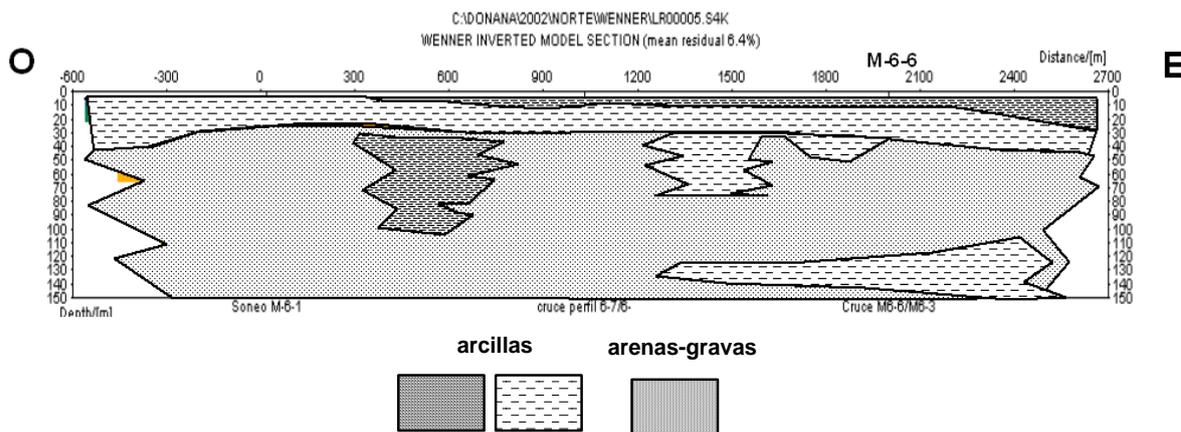


Fig. 324. Esquema interpretativo de la sección geoelectrica de la zona Norte.

Los trabajos de testificación, 1 SEV y 1 SEDT efectuados en el área de **Santa Olalla** ponen de nuevo de manifiesto que el SEDT es un método poco apropiado para resolver intercalaciones resistivas; así como la evidente diferente resolución que es esperable en cada método, y la ambigüedad de los modelos que, sin información a priori, es razonable adoptar en su interpretación. Los registros de testificación permiten identificar secuencias transgresivas y regresivas.

El objetivo de los trabajos en la **zona del sondeo BG8** es intentar verificar la presencia de las margas azules, referida en la información disponible del sondeo BG-8 posiblemente sobre los 280 m de profundidad. Las mediciones han consistido en un SEV, un Perfil Eléctrico, Perfil sísmico de reflexión de 1100 m y Testificación, que sólo pudo efectuarse hasta los 40 m por colmatación del sondeo. De la testificación disponible de 1968 se deduce que la resistividad de la formación no está afectada por la salinidad del agua, corroborándose en la testificación de 2002 que se trata de agua dulce, por lo que los registros presentan una buena correlación entre la radiación gamma natural y la resistividad de la formación, lo que permite la identificación de importantes intercalaciones de arcilla en el tramo de arenas supuestamente limpias. La información suministrada por el SEV no sobrepasa los primeros 20 m de profundidad, coincidiendo bien con la de la testificación, aunque con un ligero desfase en las profundidades.

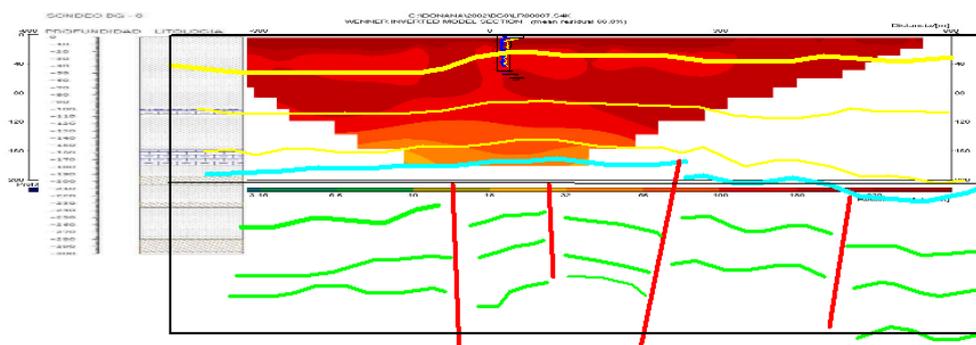


Fig. 338. Superposición de los indicadores sísmicos a la sección geoléctrica en el sector del sondeo BG-8. La columna litológica conocida del sondeo se ha situado a la izquierda del perfil como comparación.

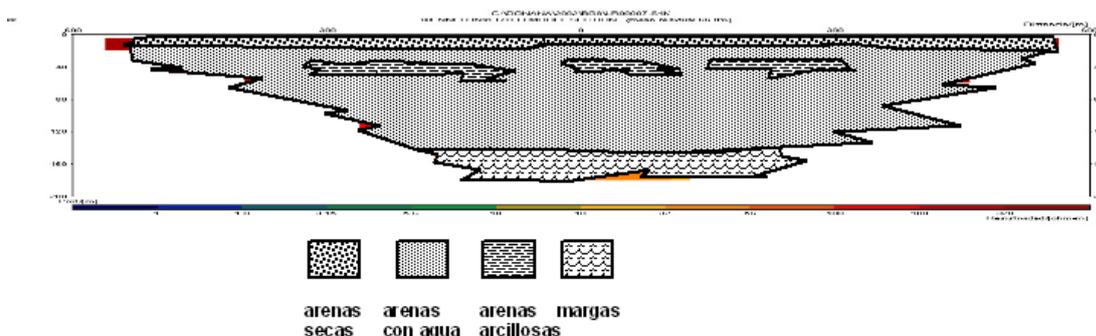


Fig. 339. Esquema interpretativo de la sección geoléctrica realizada en el sector del sondeo BG-8.

En el *Perfil Eléctrico* (Figura 338) destaca la alta resistividad encontrada, por referencia al resto de los perfiles efectuados en este trabajo. Se aprecia una primera capa muy resistiva (más de 300 ohm.m) de unos 10 m de potencia en todo el perfil, que debe representar la presencia de arenas secas. El cambio a valores por debajo de 30 ohm.m a partir de unos 160 m de profundidad, pudiera corresponderse con un paso a margas. En las arenas aparecen zonas con resistividad inferior (unos 100 ohm.m), que pueden interpretarse como tramos donde la presencia de arenas arcillosas es más importante. El primer reflector de la sección sísmica debe representar la base de las arenas secas; el siguiente reflector (en color azul) coincide con el paso a valores inferiores de resistividad. Por debajo de este reflector la secuencia pensamos que se corresponde con la facies sísmica de la zona eólica y dunar, y que por lo tanto, las margas azules se sitúan a una profundidad no alcanzada por la sección sísmica ni por el sondeo.

Puede concluirse por lo tanto que la sección geoeléctrica ha determinado con bastante precisión los cambios litológicos en profundidad, con la resolución debida al método, como se sintetiza en el esquema interpretativo de la Figura 339.

Las observaciones efectuadas en 1999-2000 en el sondeo de la **zona de Malandar**, en el extremo sur de la flecha litoral, han sido uno de los principales motivos que decidieron la realización del presente Proyecto. Por una parte como consecuencia de las dataciones cronológicas realizadas por el CSIC en noviembre de 1999 se detectó que en este sondeo el Mioceno comienza a los 75 m, en contradicción con la profundidad determinada por el antiguo “mapa del techo de las margas azules”, que lo situaba a 200 m. Por otra parte se localizaron en el sondeo lentejones de agua salada entre los 60-70 m, reposando sobre los limos margosos del Mioceno; por encima hay arcillas y limos de marisma, siendo los primeros 20 m arenas de la flecha. El objetivo de los trabajos efectuados en esta zona es verificar si puede identificarse la interfaz entre el agua dulce de la zona de la flecha litoral y el agua salina encontrada en el sondeo, para lo que los trabajos realizados han sido la testificación del sondeo Cuartel del Malandar y un Perfil Eléctrico. Aunque por las razones explicadas en el apartado IV-2.3 no pudieron medirse los parámetros temperatura y conductividad del agua del sondeo, la testificación disponible del año 2000 indica que el agua es salubre en todo el sondeo (60 m). Con el perfil eléctrico se ha tratado de averiguar la configuración de la interfase hacia el cordón dunar contiguo, que recibe la recarga de agua dulce de lluvia, así como averiguar si la salinidad sigue aumentado por debajo de la base del sondeo.

El registro combinado de gamma natural y resistividad permite distinguir las unidades litológicas, aunque las intercalaciones arenosas indicadas por el registro de gamma natural por debajo de los 18 m resultan no identificables en el registro de resistividad, debido a la influencia de la salinidad. Las secuencias sedimentarias más destacadas se sitúan dentro del nivel arcilloso, ya que las variaciones litológicas en esta unidad permiten apreciar esos cambios evolutivos en la radiación gamma. Estas secuencias son tanto granodecrescentes como granocrecientes a techo.

La sección geoelectrica se corresponde bien con la información litológica del sondeo (Figura 346). Las arenas de la flecha se caracterizan por su resistividad superior a 20 ohm.m, llegando a más de 100 ohm.m, lo que indica que contiene agua dulce por lo menos en los primeros 10 m. Las arcillas y limos de marisma están caracterizados por resistividades normalmente inferiores a los 10 ohm.m, que en algunos sitios pasa a menos de 1 ohm.m, detectando las zonas de mayor concentración de agua salada. El cambio de la resistividad al pasar a las margas del Mioceno puede interpretarse también, por su morfología, como debido a la interfase agua dulce- agua salada, que situaría dicha interfase a mayor profundidad en el sector occidental de la barra litoral; esta interpretación pone en duda que por debajo de los 80 m se encuentren las margas del Mioceno, ya que es poco probable que una intrusión avance de semejante manera en terrenos de tan poca permeabilidad.

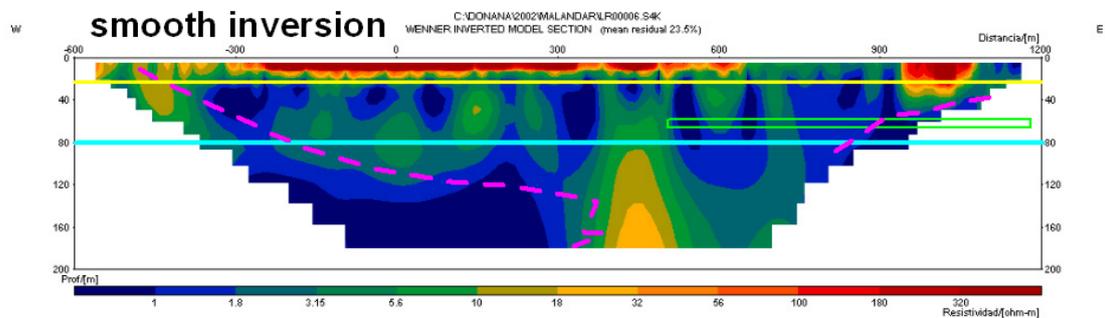


Fig. 346mod. Modelo geoelectrico del Perfil realizado en la zona del Cuartel del Malandar con inversión tipo "smooth", e indicación de los horizontes litológicos identificados en 1999. Línea amarilla: límite de las arenas; línea azul: límite de las arcillas y limos de marismas. Línea rosa: posible interfase agua dulce-agua salada (en el Oeste).

INDICE GENERAL EXTENDIDO

TOMO 1

0. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Pag.

| | |
|-----------|--|
| 1 | 0.1 Situación y límites de la zona de estudio |
| 2 | 0.2 Geología de la zona |
| 6 | 0.3 Funcionamiento hidrogeológico |
| 10 | 0.4 Información Geofísica existente |
| 11 | 0.5 Objetivos generales del Proyecto |
| 12 | 0.6 Definición de los problemas de índole geofísica actualmente planteados |
| 14 | 0.7 Definición de la metodología a seguir en el Proyecto |

I RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOFÍSICA

Pag.

- 17 I.1 Introducción histórica de la documentación analizada**
- 21 I.2 Descripción del contenido de los informes parciales del periodo 1967-1976**
- 21 I.2.1 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063
- 22 I.2.2 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559
- 28 I.2.3 Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967. Sin Ref.
- 32 I.2.4 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070
- 33 I.2.5 Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref.
- 34 I.2.6 Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.
- 41 I.2.7 Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35.538
- I.3 Descripción del contenido de los informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982**
- 42 I.3.1 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.
- 45 I.3.2 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.
- 53 I.3.3 Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649
- I.4 Descripción del contenido de los informes recopilados posteriores al Proyecto Guadalquivir**
- 56 I.4.1 Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939
- 56 I.4.2 Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655
- 60 I.4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213
- 61 I.4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347
- 63 I.4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408
- 64 I.4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963
- 67 I.5 Datos de campañas de sismica de reflexión**
- 70 I.6 Sondeos de prospección de hidrocarburos**

II PREPARACIÓN DE DATOS EN FORMA DIGITAL

Pag.

| | |
|------------|---|
| 71 | II.1 Tipos de documentos digitales generados |
| | II.2 Información procedente de informes parciales hasta 1976 |
| 73 | II.2.1 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en la zona costera al S. E. de Huelva. IGME. 1967. Ref. 40.063 |
| 73 | II.2.2 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559 |
| 75 | II.2.3 Etude hidrogeologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les resultats de la prospection geophysique. Astier. 1967. Sin Ref. |
| 76 | II.2.4 Informe preliminar de la prospección geofísica realizada en Moguer (Huelva). IGME. 1968. Ref. 40.070 |
| 77 | II.2.5 Informe sobre unos sondeos eléctricos verticales realizados en las Marismas del Puntal (Sevilla). IGME. 1970. Sin Ref. |
| 77 | II.2.6 Interpretation d'ensemble des sondages electriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref. |
| 80 | II.2.7 Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538 |
| | II.3 Procedentes de informes finales del Proyecto Guadalquivir, hasta 1982 |
| 81 | II.3.1 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522. |
| 83 | II.3.2 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref. |
| 85 | II.3.3 Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base. IGME. 1982. Ref. 35.649 |
| | II.4 Procedentes de informes posteriores al Proyecto Guadalquivir |
| 86 | II.4.1 Estudio hidrogeológico para abastecimiento a Niebla (Huelva). IGME. 1982. Ref. 35.939 |
| 86 | II.4.2 Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte-Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce- agua salada. CGS. 1982. Ref. 35.655 |
| 87 | II.4.3 Informe técnico de la prospección geofísica realizada en Villalba del Alcor (Huelva). IGME. 1985. Ref. 32.213 |
| 88 | II.4.4 Apoyo geofísico al establecimiento de una red de control de contaminación de acuíferos por intrusión marina. INTECSA. 1988. Ref. 40.347 |
| 88 | II.4.5 Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408 |
| 88 | II.4.6 Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963 |
| 90 | II.5 Datos de campañas de sismica de reflexión. "Documentos sobre la Geología del Subsuelo de España", 1990, Ref. 29036. |
| 94 | II.6 Base de datos de SEV |
| | II.7 Adaptación de la base de sondeos mecánicos |
| 100 | II.7.1 Bases de partida |
| 102 | II.7.2 Proceso de filtrado |
| 103 | II.7.3 Base final |
| 106 | II.7.4 Baselitologica.xls |

Pag.

108 II.7.5 Ficheros para base de datos en ARC/VIEW

110 **II.8 Cuadro general de ficheros generados**

Anexo Digital II-a (DocuEscanDigita)

Anexo Digital II-b (BaseDatosSEV)

Anexo Digital II-c (BaseDatosSondeos)

III ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Pag.

- 121 III.1 Revisión del mapa de cotas del techo de las margas azules**
- 123** III.1.1 Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA. 1968. Ref. 35559
- 126** III.1.2 Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.
- 130** III.1.3 Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir (FAO). 1972, 1975. Ref. 35522.
- 133** III.1.4 Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.
- 136** III.1.5 Análisis del mapa de cotas del fondo impermeable de 1976.

Anexo Digital III-1 (Margas azules)

III.2 Trazado del mapa de cotas de las margas azules mediante sísmica de reflexión

- 141** III.2.1 Introducción
- 142** III.2.2 Antecedentes geológicos.
- 149** III.2.3 Información suministrada por los sondeos mecánicos profundos.
- 152** III.2.4 Datos geofísicos sísmicos de partida. Facies sísmicas.
- 156** III.2.5 Metodología seguida en la interpretación de las secciones sísmicas.
- 159** III.2.6 Obtención de las coordenadas de los puntos de tiro. Sistema de control
- 162** III.2.7 Obtención de los tiempos del reflector en las secciones sísmicas.
- 169** III.2.8 Obtención de la velocidad para la conversión tiempo-profundidad
- 173** III.2.9 Mapa de isobatas del techo de las margas azules
- 174** III.2.10 Conclusiones

177 Anexo III-2.8

Anexo Digital III-2 (Margas azules Sísmica)

III.3 Revisión de la interpretación de los SEV efectuados en 1968-1970

- 191** III.3.1 Objetivos y alcance de esta revisión
- 193** III.3.2 Síntesis de la información geoeléctrica sobre el acuífero de Almonte-Marismas de 1970.
- 202** III.3.3 Otros documentos
- 204** III.3.4 Planteamiento para la verificación de la interpretación de los SEV
- 206** III.3.5 Verificación de la interpretación
- 208** III.3.5.1 Corte geoeléctrico 5
- 218** III.3.5.2 Corte geoeléctrico 6
- 224** III.3.5.3 SEV MD-15 y P1-3
- 227** III.3.6 Verificación del nuevo modelo estratigráfico con los cortes geoeléctricos
- 227** III.3.6.1 Síntesis geológica de partida

Pag.

236 III.3.6.2 Análisis de los cortes geoelectricos

251 III.3.7 Conclusiones

Anexo Digital III-3 (revisión de SEV)

III.4 Revisión de la cartografía de la interfase agua dulce- agua salada

255 III.4.1 Primera línea de separación trazada en 1968 basándose en la Resistencia Transversal T

256 III.4.2 Otras versiones contemporáneas del trazado de la línea

258 III.4.3 Nuevas verificaciones del trazado de la línea en 1970

259 III.4.4 Cuantificación del límite establecido

261 III.4.5 Nueva verificación de la posición de la línea que separa las partes dulce y salada del acuífero en 1982.

263 III.4.6 Trazado de la superficie interfase en un área restringida, en 1976.

266 III.4.7 Nuevos trazados de la superficie de la interfase en 1995, mediante testificación de sondeos.

268 III.4.8 Otras mediciones de la interfase

270 III.4.9 Conclusiones

Anexo Digital III-4 (interfase)

TOMO 2

IV REALIZACIÓN DE NUEVOS ENSAYOS DE METODOLOGÍA GEOFÍSICA

Pag.

IV.1 Introducción

277 IV.1.1 Objetivo y alcance de los ensayos

278 IV.1.2 Planificación de los ensayos

281 IV.1.3 Trabajos realizados

IV.2 Testificación geofísica de sondeos mecánicos

285 IV.2.1 Antecedentes

285 IV.2.1.1 Testificaciones con finalidad litológica

292 IV.2.1.2 Testificaciones para determinar la salinidad del agua

IV.2.2 Nueva campaña de testificación realizada en 2002

303 IV.2.2.1 Selección de sondeos a testificar en la campaña de 2002

306 IV.2.2.2 Sondeos testificados en la campaña de 2002

307 IV.2.2.3 Instrumentación utilizada

309 IV.2.2.4 Presentación de los resultados

330 IV.2.2.5 Ficheros de datos digitales

330 IV.2.2.6 Información proporcionada por los registros

333 IV.2.2.7 Comentarios sobre la interpretación de las diagrfías de GN,RI

337 IV.2.2.8 Comentarios sobre la interpretación de las diagrfías de GE

IV.2.3 Campaña de testificación de 2005

339 IV.2.3.1 Selección de sondeos a testificar en la campaña de 2005

341 IV.2.3.2 Sondeos testificados en la campaña de 2005

343 IV.2.3.3 Instrumentación utilizada

344 IV.2.3.4 Presentación de los resultados

345 IV.2.3.5 Ficheros de datos digitales

346 IV.2.3.6 Información proporcionada por los registros

348 IV.2.3.7 Interpretación de los registros

Anexo Digital IV-2 (Testificación)

Anexo IV-2- a: Informe de testificación realizada por IGT

Anexo IV-2- b: Informe de testificación realizada por AGS

Pag.

IV.3 Ensayos previos por métodos eléctricos

| | |
|------------|--|
| 407 | IV.3.1 Introducción |
| 407 | IV.3.2 Breve explicación de los métodos utilizados en el estudio |
| 407 | IV.3.2.1 Sondeos EM de Dominio de Tiempos (SEDT) |
| 410 | IV.3.2.2 Tomografía o Perfil Eléctrico |
| | IV.3.3 Descripción del trabajo de campo realizado |
| 413 | IV.3.3.1 Trabajos de campo |
| 415 | IV.3.3.2 Instrumentación empleada |
| 415 | IV.3.4 Procesado de los datos y presentación de los resultados |
| 415 | IV.3.4.1 Sondeos EM de Dominio de Tiempos (SEDT) |
| 416 | IV.3.4.2 Tomografía eléctrica |
| 418 | IV.3.4.3 Ficheros digitales. |
| 418 | IV.3.5 Resultados del estudio |
| 419 | IV.3.5.1 Zona de VETALENGUA |
| 422 | IV.3.5.2 Zona de MARISMILLAS |
| 423 | IV.3.5.3 Zona de SANTA OLALLA |
| 424 | IV.3.5.4 Zona de PALACIO DE DOÑANA |

Anexo Digital IV-3 (Eléctricos)

Anexo IV-3 Informe de trabajos presentado por IGT

IV.4 Perfiles de sísmica de reflexión

| | |
|------------|--|
| 427 | IV.4.1 Objetivos de los ensayos con el método de sísmica de reflexión |
| 428 | IV.4.2 Resultados de las mediciones de velocidad por “down hole” |
| 432 | IV.4.3 Ensayos de diversas fuentes de energía para la generación de las señales sísmicas |
| 436 | IV.4.4. Ejecución de la campaña de medidas en los perfiles |
| 436 | IV.4.4.1 Parámetros de registro |
| 437 | IV.4.4.2 Mediciones realizadas |
| 439 | IV.4.4.3 Procesado de los registros y presentación de los resultados |
| 442 | IV.4.4.4. Ficheros digitales |
| 443 | IV.4.5 Comparación de resultados entre fuentes de energía |
| 449 | IV.4.6 Análisis de las secciones |
| 449 | IV.4.6.1 Sección Doñana-1 (Zona Norte) |
| 451 | IV.4.6.2 Sección Doñana- 2 (Zona sondeo BG-8) |
| 454 | IV.4.6.3 Sección Doñana- 3 (Zona Palacio de Doñana) |
| 456 | IV.4.6.4 Sección Doñana- 4 (Zona Palacio de Marismillas) |

Anexo Digital IV-4 (Sísmica)

Anexo IV-4 Informe de la campaña sísmica realizada por IGT

Pag.

459 IV.5 Trabajos complementarios realizados por el IGME en las diferentes zonas. Integración de resultados.

461 IV.5.1 Zona de Marismillas

471 IV.5.2 Zona de Palacio de Doñana

482 IV.5.3 Zona de Vetallengua

494 IV.5.4 Zona Norte

511 IV.5.5 Zona de Santa Olalla

515 IV.5.6 Zona del BG8

522 IV.5.7 Zona de Malandar

Anexo Digital IV-5 (Datos campo IGME)

529

V RESUMEN Y CONCLUSIONES

REFERENCIA de los ANEXOS
(en soporte de papel)

Archivados exclusivamente en el Área de Geofísica del IGME:

- A- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SONDEOS MECÁNICOS**
- B- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE TESTIFICACIÓN DE SONDEOS**
- C- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SÍSMICA**
- D- DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA – CARTOGRAFÍA Y VARIOS**
- E- COPIAS EN FORMATO A4 DE LOS DOCUMENTOS ESCANEADOS**
- F- COPIA PARCIAL DEL INFORME FINAL DE LOS SONDEOS DE LA ZONA REGABLE Y SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA. IRYDA. 1976**
- G- COPIA PARCIAL DEL INFORME PROYECTO PILOTO DE UTILIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA EL DESARROLLO DE LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR. FAO. 1972-1975. Ref. 35522**
- H- INFORME SOBRE UNOS SEV REALIZADOS EN LAS MARISMAS DEL PUNTAL (SEVILLA). 1970.**

Archivados en el Centro de Documentación del IGME:

- ANEXO IV-2-a: TRABAJOS DE TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA EN LA PROVINCIA DE HUELVA. IGT. DICIEMBRE 2002.**
- ANEXO IV-2-b: REGISTROS GEOFÍSICOS EN SONDEOS EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS. AGS. 2005.**
- ANEXO IV-3: ENSAYOS GEOFÍSICOS EN EL ÁREA DE DOÑANA. IGT. DICIEMBRE 2001.**
- ANEXO IV-4: TRABAJOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN EN EL ACUÍFERO DE ALMONTE-MARISMAS. IGT. 2002-2004**

- ANEXO ESPECIAL 1- Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967.**
- ANEXO ESPECIAL 2- Projet du Guadalquivir. UNSF/FAO Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970.**

ANEXO A

DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SONDEOS MECÁNICOS

Contenido:

- 1 - Columnas y fichas de sondeos que forman el perfil 1 del informe 35963**
- 2 - Salidas en papel de los ficheros MM.xls y BaseFinal(>20).xls, de la base de datos de sondeos.**
- 3 - Mapa sondeos BG**
- 4 - Ficha de construcción de los sondeos III-11-11, III-11-11bis, III-10-7, III-12-49, IV-5-1**
- 5 - Relación y fichas de sondeos profundos del Archivo de Hidrocarburos.**
- 6 - Ficha de construcción de los sondeos Mazagón-3 y IV, Villarrasa, Niebla I y II, Bonares**

ANEXO B

DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE TESTIFICACIÓN DE SONDEOS

Contenido:

1- Testificaciones procedentes del Informe *Guadalquivir Project. Electrical Prospecting in the Guadalquivir River Basin. PRAKLA.1968.Ref. 35559*

- Fig. 164 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

- Se presentan copias de los registros originales. Los correspondientes a los sondeos mecánicos BG-6 (34-1033) y BG-7 (35-1033), se han digitalizado.

| Sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof. | FECHA | testificación |
|--------|------------|-----------------|-------|-------|---------------|
| BG-6 | 114310004 | | 210 | 1968 | PS,R,R16-64" |
| BG-7 | 114360006 | | 218 | 1968 | PS,R,R64-16" |
| BG-8 | 114310005 | Charco del Toro | 300 | 1968 | PS,R |

Con columna litológica y construcción del BG-6

2- Testificaciones procedentes del Informe *Informe sobre las testificaciones eléctricas y radiactivas realizadas en los sondeos del IRYDA en la zona de Almonte-El Rocío (Huelva). IGME . 1974. Ref. 35538,*

- Fig. 165 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

- Se presentan copias de los registros originales:

| sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof | fecha | testificación |
|--------|------------|----------------|------|-------|---------------|
| JR-1 | P102 | Lucio del Lobo | 100 | 1974 | GN |
| M-6-5 | 114230024 | | 186 | 1974 | GN |
| M-8-14 | 114230049 | | 138 | 1974 | GN, PS, R |
| AM-1 | 114220018 | | 130 | 1974 | GN,PS,R |

Con columna litológica y/o ficha de base datos sondeos IGME

3- Testificaciones procedentes del Informe *Prospección eléctrica en Mazagón (Huelva). IGME. 1992. Ref. 40.408,*

Fig. 167 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006:

Sondeo S-2 de Mazagón, digitalizado. (gamma natural, neutrón, gamma-gamma y diámetro del sondeo)

4-Testificaciones procedentes del *Estudio sobre la evolución de la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas. CGS. 1995. Ref. 35.963.*

Fig. 169 y 170 del Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006:

| Nº registro | Denominación | testificación | profundidad test | Aparato |
|-------------|----------------|---------------|------------------|---------|
| 114170034 | I-2-5 | GN,T,dT,C | 65 | CC |
| 114180079 | I-6-2 | GN,T,dT,C | 65 | CC |
| 114220018 | AM-1 | GN,T,dT,C | 120 | CC |
| 114220045 | AM-5 | GN,T,dT,C | 87 | CC |
| 114230035 | AM-10 | GN,T,dT,C | 98 | CC |
| 114220013 | M-1-1 | GN,T,dT,C | 135 | CC |
| 114220025 | M-2-6 | GN,T,dT,C | 102 | CC |
| 114220037 | M-4-3 | GN,T,dT,C | 105 | CC |
| 114230030 | M-6-3 | GN,T,dT,C | 132 | CC |
| 114170069 | AM-13 | GN,T,dT,C | 110 | CC |
| 114230062 | M-7-6 | GN,T,dT,C | 82 | CC |
| 114210156 | Pichiricha-4 | GN,T,dT,C | 105 | CC |
| 114160018 | L.Anguila-1 | GN,T,dT,C | 65 | CC |
| 114220047 | Juncos-1 | GN,T,dT,C | 65 | CC |
| 114240021 | C. Bombas | GN,T,dT,C | 175 | CC |
| 114180096 | Pescante | GN,T,dT,C | 145 | CC |
| 114170034 | I-2-5 | T,C | 60 | INS |
| 114180079 | I-6-2 | T,C | 60 | INS |
| 114170110 | I-4-19 | T,C | 60 | INS |
| 114170120 | I-8-8 | T,C | 60 | INS |
| 114220017 | AM-3 | T,C | 80 | INS |
| 114170138 | AM-12 | T,C | 80 | INS |
| 114220039 | M-1-5 | T,C | 65 | INS |
| 114220023 | M-2-3 | T,C | 65 | INS |
| 114260002 | M-2-7 | T,C | 65 | INS |
| 114220022 | M-3-4 | T,C | 55 | INS |
| 114260006 | M-4-5 | T,C | 80 | INS |
| 114220014 | M-4-7 | T,C | 95 | INS |
| 114230060 | M-5-5 | T,C | 60 | INS |
| 114230061 | M-6-8 | T,C | 140 | INS |
| 114170073 | M-8-4 | T,C | 65 | INS |
| 114270023 | Casa Lobo | T,C | 48 | INS |
| 114280006 | Lucio Cangrejo | T,C | 105 | INS |

CC: equipo de medición continua Century Compulog

INS: equipo de medición discreta Instran

Para todos ellos se adjunta esquema de columna litológica

5- Testificaciones facilitadas por la UPC

- Fig. 171 del Informe Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

-Testificaciones de los sondeos Vet Lengua S57, Marismillas S59, Palacio Doñana S49, Malandar

| sondeo | Nº Invent. | Toponimia | Prof | FECHA | testificacion |
|--------------|------------|------------------------|------|-----------|---------------|
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 15-mar-99 | T,C |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 24-nov-00 | T,C |
| C19-S49 | 114310016 | Palacio Doñana | 164 | 11-jun-96 | T,C |
| MARISM59-C24 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 06-may-97 | T,C |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 21-oct-99 | T,C |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 01-mar-00 | T,C |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 06-may-97 | T,C |
| MARISM59 | 114360020 | Palacio de Marismillas | 289 | 21-oct-99 | T,C |
| VETA57 | 114360018 | Vet Lengua | 190 | 06-may-97 | T,C |
| VETA57 | 114360018 | Vet Lengua | 190 | 01-mar-00 | T,C |
| VETA57 | 114360018 | Vet Lengua | 190 | 01-mar-00 | T,C |
| VETA57 | 114360018 | Vet Lengua | 190 | 21-oct-99 | T,C |
| MALANDAR | | Cuartel de Malandar | | 01-mar-00 | T,C |

6- Testificaciones facilitadas por IGME-SEVILLA

Fig. 172 del Informe Proyecto Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana). 2001-2006.

- Campaña CGS (sin fecha)

| sondeo | Toponimia | testificación |
|---------|---------------------------------|---------------|
| C1-S1 | El Pescante | GN, T,C |
| C10-S21 | El Alamillo * | GN, T,C |
| C14-S32 | El Abalarío * | GN, T,C |
| C15-S37 | Depuradora El Rocio * | GN, T,C |
| C16-S40 | Hotel Coto * | GN, T,C |
| C17-S41 | Guardia Civil Matalascañas * | GN, T,C |
| C2-S2 | Casa Bombas | GN, T,C |
| C21-S54 | Partido Resina * | GN, T,C |
| C9-S18 | Los Mimbrales * | GN, T,C |
| C4-S5 | La Juncosilla (o Portachuelo) * | GN, T,C |
| C7-S13 | Chozas del Raposo * | GN, T,C |
| C19-S49 | Palacio Doñana | GN, T,C |
| C5-S15 | Los Caracoles | GN, T,C |
| C6-S12 | Casa de la Pichiricha | GN, T,C |

* se adjunta esquema de columna litológica y de construcción del sondeo

- Testificaciones realizadas con un equipo Mount-Soupris probablemente en 1996.

| sondeo | Toponimia | testificación |
|---------|----------------------------|---------------|
| C1-S1 | El Pescante * | GN |
| C17-S41 | Guardia Civil Matalascañas | GN,T,C |
| C2-S2 | Casa Bombas * | GN |
| C24-S59 | Palacio de Marismillas | GN,PE,C,T,R |
| C19-S49 | Palacio Doñana * | GN |
| C5-S15 | Los Caracoles * | GN |
| C3-S57 | Vetalengua | GN,T,C |

Para todos ellos se adjunta esquema de columna litológica y de construcción del sondeo, así como ficha Informe del Sondeo (*)

7- Testificaciones procedentes del sondeo Lucio Mari López efectuada por Tragsa en 1999

Parámetros: Gamma natural, Conductividad y temperatura del fluido de todo el sondeo (157 m), y de PS, Resistividad larga (64") y corta (16") desde el metro 80. Con ficha de construcción del sondeo.

8- Testificaciones procedentes del sondeo Poblado Escobar-2 (Veta La Palma, Sevilla). 2004

Facilitado por la Universidad de Salamanca.

Parámetros: Resistividad y temperatura del fluido, gradiente de temperatura, Resistividad Normal 16" y 64", Resistividad lateral, Potencial Espontáneo, Gamma natural, Resistencia monoelectrónica, Verticalidad y desviación. Con Informe completo de AGS y coordenadas sondeo.

9- Copia en papel de los datos de litología del fichero BaseLitologica.xls referentes a los sondeos testificados en la campaña de 2002 Y 2004

AM-3, AM-4, AM-5, AM-12

M-1-1, M-6-6

IV-3-3, V-1-9

BG-8

VETALENGUA S56

CASA BOMBAS

PALACIO MARISMILLAS S59

PALACIO DOÑANA S49

LOS CARACOLES

SANTA OLALLA

FEDER IV (HATO RATON)

MARI LOPEZ

MATALASCAÑAS

EL ABALARIO

EL ALAMILLO

LOS MIMBRALES

DEPURADORA

PICHIRICHA

RAPOSO

JUNCOSILLA

PARTIDO RESINA

ASPERILLO

SULFUSARUS

ANEXO C

DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA DE SÍSMICA

- **Reproducciones en papel escala 1/20.000 (líneas PF) y 1/10.000 (HV) de las líneas de Hidrocarburos:**

PF-84-17, PF-84-19, PF-84-30, PF-84-31, PF-84-34, PF-84-37, PF-84-39

PF-86-04, PF-86-06, PF-86-07, PF-86-08,

HV-85-05, HV-85-06, HV-85-07

- **Reproducciones en papel tamaño A3 de las siguientes líneas:**

PF-84-17, PF-84-19, PF-84-30, PF-84-31, PF-84-34, PF-84-37, PF-84-39,

PF-86-04, PF-86-06, PF-86-07, PF-86-08,

HV-85-05, HV-85-06, HV-85-07

PF-9, PF-10, PF-11, PF-12, PF,13

MA-01, MA-02, MA-03, MA-04

- **Reproducciones en papel tamaño A3 de las siguientes líneas, con facies marcadas:**

PF-84-17, PF-84-19, PF-84-30, PF-84-31, PF-84-34, PF-84-37, PF-84-39,

PF-86-04, PF-86-06, PF-86-07, PF-86-08,

HV-85-05, HV-85-06, HV-85-07

PF-9, PF-10, PF-11, PF-12, PF,13

MA-04

- **Reproducciones en papel escala 1/5.000 de las líneas registradas en el Proyecto:**

-Perfil Doñana 1 (tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 1 Vibro (tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 2(tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 3 (tiempo twt y profundidad)

-Perfil Doñana 4 (tiempo twt y profundidad)

ANEXO D

DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA – CARTOGRAFÍA Y VARIOS

1- Documentos relativos a la interfase agua dulce-salada

- Informe sobre la intrusión marina 1982 Ref. 35915
- Red de intrusión marina abril 1982 . Ref 35910
- Red de control de acuíferos 1993-94., Ref. 35951

2- Copias de algunos mapas de los informes de Astier 1970 e IRYDA 1976

- **Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970. Sin Ref.**

PL 1: Zona Almonte. Profundidad y cota de la base del acuífero principal: **26PL-1.tif**

- **Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte Marismas y síntesis hidrogeológica. IRYDA. 1976. Sin Ref.**

- plano 15 (espesores hasta el fondo impermeable): **32PL-15.tif** y **32PL15-curvas.xls**
- plano 16 (cotas del fondo impermeable): **32PL-16.tif** y **32PL16-curvas.xls**
- plano 23 Situación de los perfiles
- plano 24 Perfiles V-1 a V-4
- plano 25 Perfil V-5
- Plano 26 perfiles V-6 a V-8
- Plano 27 perfiles H-1 y H-2
- Plano 28 perfiles H-3 y H-4
- Plano 29 perfil H-5

3- Reproducciones en papel de los mapas cartográficos "Mulhacen" 1:20.000

ANEXO E

COPIAS EN FORMATO A4 DE LOS DOCUMENTOS ESCANEADOS

ANEXO F

COPIA PARCIAL INFORME FINAL DE LOS SONDEOS DE LA ZONA REGABLE Y SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA.IRYDA.1976

Contenido:

- Introducción
- Testificación eléctrica
- Tiempos de perforación
- Hidrogeología del acuífero Almonte-Marismas
- Perfiles litológicos
- Anexo 1-Fichas de datos hidrogeológicos de sondeos
- Planos:
 - 14-Espesor hasta el fondo impermeable
 - 15-Potencia del acuífero
 - 16-Cota del fondo impermeable (sector riego)
 - 41-Cotas del fondo impermeable de todo el acuífero
 - 23 a 29 Perfiles litológicos H y V
 - 31-32 Situación de la interfase en profundidad (sector riego)
 - 37- Datos hidrogeológicos de sondeos fuera de la zona regable

ANEXO G

COPIA PARCIAL DEL INFORME PROYECTO PILOTO DE UTILIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA EL DESARROLLO DE LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR. FAO. 1972-1975. Ref. 35522

Contenido:

- Copia parcial del informe técnico 1:

Mapa I.2.2 Prospección Geofísica Sondeos Eléctricos Verticales

Mapa I.2.4 Espesor del terreno acuífero

Mapa I.2.5 Fondo impermeable

Mapa I.2.6 Profundidad hasta el agua

Mapa I.2.7 Hidrogeología

- Copia parcial del informe técnico 7

Mapa posición sondeos

Perfiles de resultados hidrogeológicos

Columnas y construcción sondeos: IV-5-1, III-12-49, III-10-7, III-11-11, III-11-11bis

- Copia parcial Informe técnico 4 (Tablas información hidrogeológica sondeos BG)

ANEXO H

INFORME SOBRE UNOS SEV REALIZADOS EN LAS MARISMAS DEL PUNTAL (SEVILLA). 1970.

(Copia del original existente en la Oficina del IGME en Sevilla)

ANEXO IV-2-a

TRABAJOS DE TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA EN LA PROVINCIA DE HUELVA. IGT. DICIEMBRE 2002.

Informe original entregado por la empresa IGT, referente a los trabajos de testificación realizados en 2002. Su contenido se encuentra recogido en el capítulo IV-2. En este Anexo se pueden consultar reproducciones de las testificaciones en formato A3.

ANEXO IV-2-b

REGISTROS GEOFÍSICOS EN SONDEOS EN EL ACUÍFERO ALMONTE- MARISMAS. AGS. 2005.

Informe original entregado por la empresa AGS, referente a los trabajos de testificación realizados en 2005. Su contenido se encuentra recogido en el capítulo IV-2.

ANEXO IV-3

ENSAYOS GEOFÍSICOS EN EL ÁREA DE DOÑANA. IGT. DICIEMBRE 2001.

Informe original entregado por la empresa IGT, referente a los trabajos realizados en las zonas de Vetalegua, Marismillas y Palacio de Doñana de SEDT y Perfil Eléctrico. Su contenido está recogido en el capítulo IV-3: Ensayos previos por métodos eléctricos.

ANEXO IV-4

TRABAJOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN EN EL ACUÍFERO DE ALMONTE-MARISMAS. IGT. 2002-2004

Informe original entregado por la empresa IGT, referente a los trabajos de sísmica realizados en las zonas de Norte, sondeo BG-8, Palacio de Doñana y Palacio de Marismillas. Se recogen también los trabajos de ensayos de fuentes sísmicas. Su contenido está recogido en el capítulo IV-4: Perfiles de Sísmica de Reflexión.

ANEXO ESPECIAL 1

Etude hydrogéologique du bassin du Guadalquivir. Rapport sur les résultats de la prospection géophysique. Astier. 1967.

Informe del supervisor de la campaña de SEV efectuada por Prakla en el Guadalquivir, antes de dar por concluidos los trabajos sobre el terreno. Se refiere a las zonas de Orce, Huescar, Dólar, **Marismas** y Jerez de los Caballeros (campaña hecha por el IGME). Contiene el primer trazado de línea de separación entre agua dulce y salada.

Contiene una Memoria de 19 páginas y 4 Planos:

- PL-1 Interpretation des sondages electriques. ZONE D´ORCE
- PL-2 Interpretation des sondages electriques. ZONE D´HUESCAR
- PL-3 Interpretation des sondages electriques. ZONE D´DOLAR
- PL-4 Interpretation des sondages electriques. ZONE DES MARISMAS. Septembre 1967
- PL-4 Interpretation des sondages electriques. ZONE DES MARISMAS. Octobre 1967

DOCUMENTO INÉDITO DE GRAN INTERÉS.

ANEXO ESPECIAL 2

Projet du Guadalquivir. UNSF/FAO Interprétation d'ensemble des sondages électriques des zones d'Almonte et des Marismas. Astier. 1970.

Este documento puede considerarse la síntesis de todos los trabajos geoelectricos anteriores, y la base para los posteriores estudios hidrogeológicos del Proyecto Guadalquivir. Se trata de la reinterpretación conjunta de 380 SEV, con una Memoria de 10 páginas y los siguientes documentos en escala 1/100.000:

- PL 1: Zona Almonte. Profundidad y cota de la base del acuífero principal
- PL 2: Zona Almonte. Espesor total de los acuíferos (formaciones con más de 80 ohm.m)
- PL 3: Zona de Almonte. Resistividad del acuífero principal
- PL 4: Zona de Almonte. Profundidad y espesor de las capas de arcilla superficiales.
- PL 5: Zona de Marismas. Límite entre agua dulce – agua salada.
- PL 6 y 7: Cortes geoelectricos de 10 perfiles, a escala 1/50.000, cuya situación se indica en todos los planos anteriores.

Se ha añadido un listado anónimo de profundidad de las margas azules, cuya indicación puede referirse a la denominación de los SEV.

DOCUMENTO INÉDITO DE GRAN INTERÉS.

PUBLICACIONES EFECTUADAS:

PLATA J.L., RUBIO F.M. 2003. **AVANCE DE LOS TRABAJOS GEOFÍSICOS ÚLTIMAMENTE REALIZADOS EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS (DOÑANA, HUELVA, ESPAÑA)**. Libro de Comunicaciones TIAC'03. Alicante. IGME, SERIE HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS Nº 8. TOMO I.2003. pp 177-186. ISBN 84-7840-470-8.

PLATA J.L., RUBIO F.M. 2004. **NUEVAS TESTIFICACIONES GEOFÍSICAS EN EL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS**. IV ASAMBLEA HISPANO-PORTUGUESA DE GEODESIA Y GEOFISICA Figueira da Foz. PORTUGAL. S08.8 pp 367-368.

PLATA J.L., RUBIO F.M. 2005. **STUDY OF THE SALT WATER- FRESH WATER INTERFACE IN ENVIRONMENTS OF LOW RESISTIVITY: DOÑANA AQUIFER (SPAIN)**. GROUND WATER AND SALINE INTRUSION. SELECTED PAPERS FROM 18TH SWIM Cartagena. 2004. pp 435-446. Publicaciones del IGME. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº15. ISBN 84-7840-588-7.Madrid.

PLATA J.L., RIVEIRA M., IBARRA P. 2008. **RECOVERING OLD GEOPHYSICAL DOCUMENTS FOR DEEP AQUIFER RESEARCH**. CD Extended Abstracts Near Surface 2008 EAGE. Cracovia (Polonia). ISBN 978-90-73781-56-6

